



01162
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Facultad de Ingeniería

ESTUDIO OCEANO-METEOROLÓGICO
DEL RIESGO GENERADO POR CICLONES TROPICALES
EN EL LITORAL MEXICANO

PRESENTA

ADOLFO CONTRERAS RUIZ ESPARZA

DIRECTOR DE TESIS

Dr. RODOLFO SILVA CASARIN

TESIS

PRESENTADA A LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA
(HIDRÁULICA)

CIUDAD UNIVERSITARIA

MÉXICO, D.F.

SEPTIEMBRE 2000



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	1
CAPÍTULO I.....	1
1 INTRODUCCIÓN.....	2
1.1 Introducción.....	2
1.2 Objetivos.....	2
CAPITULO II.....	4
2 MODELOS DE VIENTO.....	5
2.1 Generador del viento.....	5
2.2 Factores que afectan el movimiento del aire.....	5
2.3 Tipos de Viento.....	7
2.4 Ocurrencia de ventarrones y rachas en el mar.....	8
2.5 Descripción de los modelos numéricos de predicción de riesgo oceanográfico.....	9
2.5.1 Antecedentes.....	9
2.5.2 Filosofías en la predicción del oleaje.....	10
2.5.3 Descripción de los modelos de predicción de presión, viento ciclostrofico y oleaje en aguas profundas.....	11
2.5.4 Modelo de presión.....	12
2.5.5 Evaluación del perfil de presiones.....	14
2.5.6 Modelo simplificado de predicción de oleaje.....	15
2.5.7 Metodología de Cálculo.....	16
2.6 Resumen del Capítulo II.....	22
CAPITULO III.....	23
3 NORMALIZACIÓN Y ANALISIS DE LA BASE DE DATOS.....	24
3.1 Descripción de la base de datos.....	24
3.2 Estadística global de la base de datos.....	29
3.3 Climatología del Atlántico.....	31
3.4 Conclusiones del Capítulo III.....	35

CAPITULO IV	36
4 Descripción del Sistema.....	37
4.1 Diagrama de flujo.....	37
4.2 Mapas generados por ciclón por el sistema	38
4.3 Descripción del Sistema de Información Geográfica (SIG).	42
4.4 Conclusiones del Capítulo IV.....	45
CAPITULO V.....	46
5 Presentación de los Resultados	47
5.1 Vertiente del Atlántico	47
5.2 Vertiente del Pacífico.....	54
CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	62
6 Conclusiones.....	63
7 Futuras líneas de trabajo	63
Bibliografía.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 2.1. Sistema idealizado del comportamiento terrestre de presiones y vientos
- Figura 2.2. Circulación ciclónica en ambos hemisferios.
- Figura 2.3. Circulación anticiclónica en ambos hemisferios.
- Figura 2.4. Resultados de P_r vs. r/R obtenidos para los 4 diferentes modelos considerados, utilizando $R = 10$ millas náuticas, $P_R = 962$ mbs y $\text{máx}(r \, dp/dr) = 30$ mbs.
- Figura 2.5. Resultados de dp/dr vs. r/R obtenidos para los diferentes modelos considerados, utilizando $R = 10$ millas náuticas, $P_R = 962$ mbs y $\text{máx}(r \, dp/dr) = 30$ mbs
- Figura 2.6. Resultados de $r \, dp/dr$ vs. r/R obtenidos para los diferentes modelos considerados, utilizando $R = 10$ millas náuticas, $P_R = 962$ mbs y $\text{máx}(r \, dp/dr) = 30$ mbs
- Figura 2.7. Relaciones entre el N_C y R_g/R_C para los modelos: Hydromet Rankin vortex, Fujita y Bret X.
- Figura 2.8. Variación de K' en función de fR/U_R ($K' = 29.329*(fR/U_R)$).
- Figura 2.9. Velocidad relativa del viento, U_r/U_R , en función de N_C y r/R .
- Figura 2.10. Relación de la altura de ola significativa H_r/H_R en función de la distancia radial, r/R , medida desde el ojo del ciclón.
- Figura 3.1. Regiones de estudio de las vertientes Atlántica y Pacífica.
A continuación se muestran las trayectorias y la intensidad registrada en cada posición por los ciclones en la escala Saffir – Simpson. Considerando a 1 como la intensidad de una depresión tropical y 7 a un ciclón con intensidad de huracán clase 5.
- Figura 3.2. Trayectorias e intensidades registradas en vertiente Atlántica.
- Figura 3.3. Trayectorias e intensidades registradas en la vertiente del Pacífico.
- Figura 3.4. Distribución de los datos de presión vs. velocidad de viento, para la vertiente Atlántica, así como el la curva de ajuste propuesta.

Figura 3.5. Distribución de los datos de presión vs. velocidad de viento, para la vertiente Pacífica, así como el la curva de ajuste propuesta.

Figura 3.6. Ajuste entre los datos de P_C vs. R_C . Se presentan dos ajustes el propuesto por el IMTA y el de este estudio.

Figura 3.7. Número de eventos por año en ambas vertientes, Atlántica y Pacífica, así como sus ajustes de tendencia.

Figura 3.8. Número de eventos probables por intensidad en el Océano Atlántico.

Figura 3.9. Número de eventos probables por intensidad en el Océano Pacífico.

Figura 3.10. Ciclones generados en el mes de mayo en todo el período de registro, así como su intensidad máxima alcanzada, en función de la escala Saffir – Simpson.

Figura 3.11. Ciclones generados en el mes de junio en todo el período de registro, así como su intensidad máxima alcanzada, en función de la escala Saffir – Simpson.

Figura 3.12. Ciclones generados en el mes de julio en todo el período de registro, así como su intensidad máxima alcanzada, en función de la escala Saffir – Simpson.

Figura 3.13. Ciclones generados en el mes de agosto en todo el período de registro, así como su intensidad máxima alcanzada, en función de la escala Saffir – Simpson.

Figura 3.14. Ciclones generados en el mes de septiembre en todo el período de registro, así como su intensidad máxima alcanzada, en función de la escala Saffir – Simpson.

Figura 3.15. Ciclones generados en el mes de octubre en todo el período de registro, así como su intensidad máxima alcanzada, en función de la escala Saffir – Simpson.

Figura 3.16. Ciclones generados en el mes de noviembre en todo el período de registro, así como su intensidad máxima alcanzada, en función de la escala Saffir – Simpson.

Figura 4.1. Diagrama de flujo del sistema para evaluar el riesgo océano – meteorológico

Figura 4.2. Malla con la velocidad del viento generada por el ciclón Gilberto, se puede apreciar la posición de la ciudad de Cancún, Quintana Roo.

Figura 4.3. Altura de ola significativa generada por el ciclón Gilberto en 1988.

Figura 4.4. Mapa de isobaras generadas por el ciclón Mitch en 1998.

Figura 4.5. Velocidad de desplazamiento del ciclón Paulina en 1997.

Figura 4.6. Período del oleaje significativo generado por el ciclón Nora en 1997.

Figura 4.7. Campo de presiones generadas por el ciclón Gilberto frente a las costas de Quintana Roo.

Figura 4.8. Campo de vientos ciclónicos generados por el ciclón Gilberto frente a las costas de Quintana Roo.

Figura 4.9. Campo de oleaje en aguas profundas generado por el ciclón Gilberto frente a las costas del Estado de Quintana Roo.

Figura 4.10. Resultado de la consulta al SIG, donde se presenta el nombre de la población y el nivel del riesgo al que son vulnerables.

Figura 5.1. Mapa de velocidades de viento máximo generado por ciclones tropicales en la vertiente del Atlántico.

Figura 5.2. Mapa de alturas de ola máximas generadas por ciclones tropicales en la vertiente del Atlántico.

Figura 5.3. Mapa de períodos de ola máximos generados por ciclones tropicales en la vertiente del Atlántico.

Figura 5.4. Mapa de velocidades de desplazamiento promedio para ciclones tropicales en la vertiente del Atlántico.

Figura 5.5. Mapa de presiones mínimas generadas por ciclones tropicales en la vertiente del Atlántico.

Figura 5.6. Mapa con el número de eventos por celda con intensidad mayor o igual que huracanes clase 1.

Figura 5.7. Mapa con el número de eventos por celda con intensidad mayor o igual que huracanes clase 2.

Figura 5.8. Mapa con el número de eventos por celda con intensidad mayor o igual que huracanes clase 3.

Figura 5.9. Mapa con el número de eventos por celda con intensidad mayor o igual que huracanes clase 4.

Figura 5.10. Mapa con el número de eventos por celda con intensidad mayor o igual que huracanes clase 5.

Figura 5.11. Mapa con intensidades máximas registradas en todo el período de registro.

Figura 5.12. Mapa de velocidades de viento máximo generado ciclones tropicales en la vertiente del Pacífico.

Figura 5.13. Mapa de alturas de ola máximas generadas por ciclones tropicales en la vertiente del Pacífico.

Figura 5.14. Mapa de períodos de ola máximos generados por ciclones tropicales en la vertiente del Pacífico.

Figura 5.15. Mapa de presiones mínimas generadas por ciclones tropicales en la vertiente del Pacífico.

Figura 5.16. Mapa de Intensidades máximas generadas por ciclones tropicales en la vertiente del Pacífico.

Figura 5.17. Mapa con el número de eventos por celda con intensidad mayor o igual que huracanes clase 1 en el Océano Pacífico.

Figura 5.18. Mapa con el número de eventos por celda con intensidad mayor o igual que huracanes clase 2 en el Océano Pacífico.

Figura 5.19. Mapa con el número de eventos por celda con intensidad mayor o igual que huracanes clase 3 en el Océano Pacífico.

Figura 5.20. Mapa con el número de eventos por celda con intensidad mayor o igual que huracanes clase 4 en el Océano Pacífico.

Figura 5.21. Mapa con el número de eventos por celda con intensidad de huracanes clase 5 en el Océano Pacífico.

Figura 5.22. Mapa con el número de eventos registrados en cada celda, sin importar la intensidad del evento.

Figura 5.23. Mapa de velocidades de desplazamiento máximas registradas en la vertiente del Océano Pacífico.

Tabla 2.1. Radio del máximo gradiente de presiones contra radio del máximo viento ciclostrofico, relacionados para los modelos: Hydromet Rankin vortex, Fujita y Bret X.

Tabla 2.2. Modelo 2dimensional de oleaje para ciclones estacionarios, relación entre K' y N_c , Bretschneider 1972.

Tabla 4.1. Escala de intensidades de ciclones tropicales Saffir- Simpson.

INDICE DE SÍMBOLOS

P_C	presión en el centro del ciclón, [mb]
P_r	presión a una distancia radial r desde el centro [mb]
P_∞	presión a una distancia considerada infinita [mb]
R_C	radio del máximo viento ciclostrofico [km]
r	radio a cualquier distancia del centro [km]
N_C	Número de Rankin-Vortex
V_{CR}	Velocidad máxima del viento ciclostrofico [km/h]
$r \frac{dp}{dr}$	máximo gradiente de presiones.
f	parámetro de Coriolis
ρ_a	densidad del aire el cual es función de la temperatura y la presión del aire en el radio de máximo viento ciclostrofico.
ϕ	latitud en la cual se encuentra el centro del ciclón [°]
K_0	constante interna del modelo.
C_1	constante teorica [1/e].
K_1	constante teórica que depende de las unidades utilizadas para la presión y velocidad.
$P_N - P_C$	gradiente de presiones entre el centro del huracán y una distancia suficientemente alejada (en [mb]).
dp/dr	gradiente de presiones.
ω	velocidad angular de la tierra
ΔP_C	gradiente de presión desde el centro del huracán a la presión normal [mb]
V_F	es la velocidad de avance del ciclón [km/h]

- β es el ángulo entre la dirección de avance del ciclón y del viento U_r .
- U_{RC} velocidad del viento máxima ciclostrofica [km/h]
- U_{Rg} viento gradiente máximo [km/h]
- U_R velocidad del viento en cualquier punto a distancia R del centro, [km/h]
- ΔP_C gradiente de presión desde el centro del huracán a la presión normal [km/h]
- U_{100} cuacha
- H_{Rsta} altura de ola significativa sin considerar la velocidad de desplazamiento, [m]
- H_{r0} Altura de ola significativa considerando la velocidad de desplazamiento, [m]
- V_{100} campo de velocidades del viento a 10 metros sobre el nivel medio del mar [km/h]
- β ángulo entre la dirección de avance del ciclón y del viento U_r .
- Fe fetch efectivo [km]

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Anualmente se generan un promedio de 23 ciclones tropicales en los océanos que bañan los litorales nacionales de estos el 61% ocurren en la vertiente Pacífica y el restante 39% en la Atlántica. Del total anterior un promedio de 4 eventos se aproxima o penetra a territorio nacional y en algunos casos debido a la gran intensidad con la que estos arriban (caso Gilbert 1988), provoca grandes daños tanto económicos, ecológicos y sociales.

Las principales zonas afectadas por la ocurrencia de estos fenómenos son las costeras donde las marejadas, marea de tormenta, lluvias y vientos ciclónicos arriban horas antes que el paso del ciclón, lo cual provoca el cierre de puertos, así como la supresión de actividades pesqueras e industriales y en algunos casos el desalojo de habitantes en zonas de alto riesgo.

La República Mexicana cuenta con una línea de costa de 11,000 km de longitud, bañadas por 2 océanos y distribuida en 17 estados de la República, con una población total de 12,000,000 de habitantes. Debido al incrementado desarrollo en las zonas costeras con motivos tanto turísticos, industriales como petroleros y la necesidad de contar con parámetros confiables de diseño, aumenta en regiones donde se cuenta con poca o nula información sobre velocidades del viento máximo, altura y periodo del oleaje en las condiciones más desfavorables, así como periodos de retorno, sobre-elevación por marea de tormenta, etc. Ante la problemática anterior el desarrollo de sistemas capaces de analizar y generar información confiable se torna fundamental.

El trabajo que a continuación se presenta muestra la metodología seguida con miras a poder pronosticar 4 fenómenos océano – meteorológicos generados durante la ocurrencia de ciclones tropicales. Los fenómenos son:

- Variación de la presión alrededor del ojo del ciclón.
- Viento ciclostrófico.
- Altura de ola significativa máxima.
- Periodo relativo a la altura de ola significativa máxima.

1.2 Objetivos

Los principales objetivos de este trabajo son los siguientes:

- Desarrollar una metodología capaz de evaluar la magnitud de algunos parámetros generados durante la ocurrencia de ciclones tropicales.

2 MODELOS DE VIENTO

2.1 Generador del viento

Este tratado inicia explicando el concepto de viento, como se genera, que tipos de viento existen, para una vez comprendidos los conceptos de generación, proceder a proponer modelos de simulación de este fenómeno.

Cuando nos referimos a la palabra viento se trata de un movimiento horizontal o aproximado a éste, del aire. El movimiento del aire en la vertical se le denomina corriente, aunque es importante, especialmente en el desarrollo de ciertas nubes y en la precipitación resultante, la cantidad de aire moviéndose verticalmente es despreciable comparado con el viento.

El aire en movimiento en niveles bajos es fuertemente afectado por la fricción con la superficie y por la convección térmica, no ocurriendo lo mismo en capas superiores donde la temperatura y la velocidad de desplazamiento son en general constantes, presentado un flujo laminar el cual prevalece en la parte alta y se va convirtiendo en turbulento conforme se acerca a las capas más bajas. La turbulencia del aire se incrementa con la rugosidad del terreno y la velocidad.

El comportamiento de la velocidad del viento en la vertical tiende a incrementarse rápidamente partiendo del nivel del suelo, hasta una altitud entre los 460 y los 610 m después de la cual el incremento de velocidad es menor. En general el viento puede considerarse variable en dirección y velocidad para períodos cortos, como consecuencia principalmente de la viscosidad, pero en períodos más largos, el flujo de aire se considera constante para una dirección dada.

2.2 Factores que afectan el movimiento del aire

El movimiento del viento en la atmósfera es en promedio cíclico partiendo de un principio de estabilidad térmica, generado por el enfriamiento y calentamiento de la tierra por la luz solar. En este proceso se desarrollan patrones de desplazamiento debidos principalmente a la fuerza de gravedad (fuerzas centrífugas) y la rotación terrestre (efecto de Coriolis).

A pequeña escala el movimiento del aire es extremadamente variable, directamente afectado por una convección local y con poca influencia por los efectos arriba mencionados, sin embargo el flujo a nivel global se puede simplificar considerando únicamente el siguiente grupo de parámetros:

Gradiente horizontal de presiones. El gradiente de presiones horizontales proporciona la fuerza horizontal, determinando así la velocidad y dirección inicial del movimiento del aire. La tendencia del viento es desplazarse de la mas alta a la más baja presión y perpendicular a las isobaras (líneas de igual presión).

Fuerzas friccionantes. Son generadas por el comportamiento del movimiento del aire, como cualquier movimiento de fluidos, con respecto a una superficie como frontera. En general éste efecto es menor por encima de los océanos, cuyas superficies en promedio, son mucho mas suaves que las áreas sobre la superficie de la tierra, la cual es más rugosa. El efecto de la baja rugosidad de los océanos afecta la velocidad del viento en apenas un 20% mientras que la superficie de la tierra el porcentaje es mucho mayor.

Fuerza de Coriolis. La aparente fuerza resultante de la rotación, causante de la deflexión en el movimiento del aire, es conocida como fuerza de Coriolis. Dicha fuerza afecta el comportamiento de todos los objetos que se mueven libremente sobre la superficie de la tierra. Al efecto de considerar en el desplazamiento de una masa de aire los efectos de gradiente de presiones y efecto de Coriolis se conoce como viento Geostrofico.

Una vez explicadas las principales fuerzas que rigen el desplazamiento del viento en la atmósfera, el siguiente paso es explicar los sistemas de vientos globales más importantes. Para lo cual en la figura 1.3, se muestra las regiones idealizadas sobre el planeta del comportamiento de los patrones de flujo.

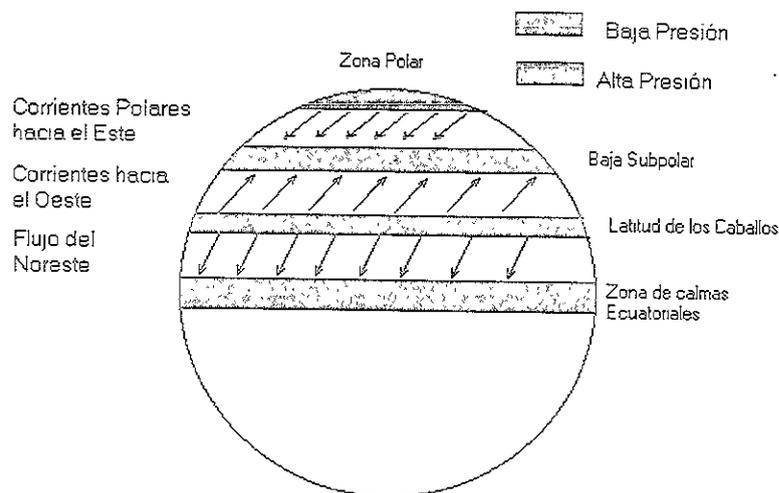


Figura 2.1. Sistema idealizado del comportamiento terrestre de presiones y vientos

En el modelo atmosférico existen cuatro "cinturones" principales de presión, la zona de calmas ecuatoriales (Doldrums), donde debido a el constante calentamiento solar, presenta una región de alta convección y por lo mismo una zona de baja presión constante.

El cinturón de calmas subtropicales o "Latitud de los Caballos", que se localiza en ambos hemisferios alrededor de los 30° de latitud, presenta una marcada tendencia a mantener un sistema de alta presión debido a un proceso adiabático constante, debido a lo anterior en esas regiones se mantiene una baja humedad y por lo mismo cielos claros la mayor parte del año.

El cinturón Subpolar de baja presión, se presenta en latitudes mayores a los 65° y se deben principalmente al efecto térmico de mayor temperatura en el agua de los océanos que en la zonas terrestres, lo cual genera una depresión con respecto a la alta presión constante sobre los casquetes polares.

Los casquetes polares debido a las bajas temperaturas y su consecuente baja humedad, presentan una zona de alta presión todo el año.

2.3 Tipos de Viento

Considerando que los patrones de viento resultan más afectados por las diferencias térmicas entre tierra y océano, aún así se pueden considerar patrones definidos de flujo.

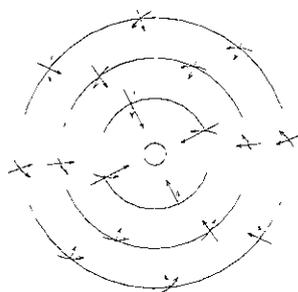
Flujo del Este o Alisios, esta corriente se genera en la latitud de los caballos y viaja hacia el ecuador con una deflexión hacia la derecha en nuestro hemisferio. Esta corriente se mantiene casi constante todo el año, con una velocidad promedio de 23 km/h.

Flujo del Oeste, estas corrientes dirigidas hacia los polos que se generan de la latitud de los Caballos y mantienen casi todo el año una velocidad de 41 km/h.

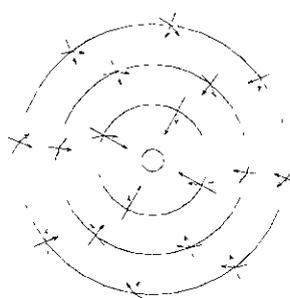
Monzones, son vientos que estacionalmente cambian de dirección, invirtiendo totalmente el sentido, generalmente de noreste a sudoeste, estos vientos son conocidos también por el su drástico cambio de humedad, esto principalmente por su origen de generación seco cuando se generan sobre continentes y húmedo cuando lo hacen sobre los océanos.

Vientos ciclónicos. Un ciclón es un área circular rugosa de bajas presiones, cuyo diámetro varía desde una decena a muchos kilómetros, la presión atmosférica en el centro de ésta región es baja y se incrementa con al aumentar el radio.

En la siguiente figura el gradiente de presión es mostrado dirigido hacia dentro, sin embargo, el viento en la parte baja tiene la influencia deflectiva de Coriolis, fuerza centrífuga, fuerzas fricciones, además de la influencia del gradiente de presiones.



Circulación ciclónica en el Hemisferio Norte



Circulación ciclónica en el Hemisferio Sur

Figura 2.2. Circulación ciclónica en ambos hemisferios.

La espiral de movimiento circular, en el sentido contrario a las manecillas del reloj en el hemisferio norte es conocido como circulación ciclónica. Noté que el término ciclónico no necesariamente implica una tormenta peligrosa o destructiva pues este es uno de los típicos y comunes modelos de climas de las latitudes medias. Aunque para gradientes de presiones excesivos pueden provocar ventarrones, estos ocasionalmente se producen en latitudes medias en áreas de bajas presiones, el término no debe ser confundido con algo violento; en distinción, en las latitudes bajas el término ventarrón se utiliza para ciclones extratropicales. Los vientos ciclónicos extratropicales son más intensos durante la época fría del año y provocar condiciones peligrosas para la navegación en los océanos.

Anticiclones. Las áreas rugosas de altas presiones dan origen a vientos cuyos movimientos con respecto al centro son opuestos a los desarrollados en las de bajas presiones. Bajo la influencia del gradiente de presión y las fuerzas deflectivas, los vientos que tienden a moverse directamente hacia afuera del centro del sistema de alta presión, desarrolla un movimiento en el sentido horario, hacia afuera del centro de la espiral en el hemisferio norte y viceversa en el hemisferio sur.

Comúnmente se asocian tormentas y fuertes vientos con la actividad ciclónica, por otra parte los anticiclones se asocian con grandes masas de aire frío que surgen desde los árticos hasta las latitudes bajas. Por ejemplo en el centro de la Unión Americana y el Golfo de México frecuentemente se experimentan estos efectos durante los meses fríos del año. En tales temporadas, se registran severos vientos fríos y lluvias a lo largo del este medio y el suroeste, a estos fenómenos se les conoce como nortes.

2.4 Ocurrencia de ventarrones y rachas en el mar

La mayor parte de los ventarrones y rachas en el mar son asociados con gradientes de presión bien desarrollados de ciclones fuertes y anticiclones en lugar del promedio del flujo del viento planetario. En general, los vientos intensos en las latitudes medias están mejor caracterizados en ambos hemisferios que los de las latitudes bajas, excepto para los ciclones tropicales (huracanes)

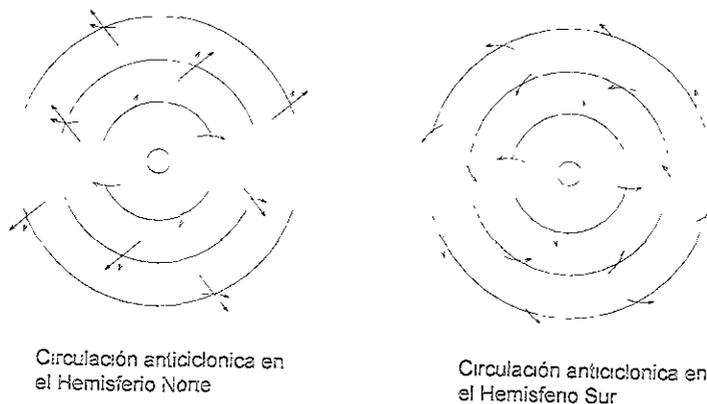


Figura 2.3. Circulación anticiclónica en ambos hemisferios.

2.5 Descripción de los modelos numéricos de predicción de riesgo oceanográfico

2.5.1 Antecedentes

Los ciclones tropicales generan básicamente cuatro diferentes tipos de fenómenos oceanográficos y meteorológicos que pueden producir daños a estructuras dentro y fuera de costa así como a la población en las zonas aledañas. Estos fenómenos son en orden de generación: disminución de la presión atmosférica como consecuencia del rápido ascenso convectivo de masas de aire caldeado sobre las aguas de los océanos en las latitudes ecuatoriales, hacia capas superiores; debido principalmente al efecto de Coriolis se forma un vórtice, que en nuestras latitudes, gira hacia la izquierda en sentido antihorario.

Como consecuencia de la disminución de la presión atmosférica, se genera un flujo de viento que en función del campo barométrico se dirigen hacia el centro de la depresión, siendo más pronunciado el gradiente de presiones, más intenso será el campo de vientos.

Debido a la intensidad del campo de vientos generado por el ciclón tropical, cuando este se localiza en mar abierto, genera un campo de oleaje, el cual en función a la intensidad y velocidad de desplazamiento de la estructura del ciclón, será más o menos intenso.

Directamente relacionado a las características del campo de presiones, el campo de vientos y las características del oleaje en aguas someras, se genera en las zonas costeras la marea de tormenta, la cual entre mayor sea la intensidad del ciclón, la batimetría y la velocidad de desplazamiento del macizo nuboso, puede ser mayor o menor. En este trabajo solo se contemplan los primeros tres fenómenos, debido a la complejidad del cuarto, el cual merece un estudio aparte.

Los modelos que se presentaran a continuación que son básicamente predictores del oleaje, estos tienen su origen en 1943, debido principalmente a la necesidad de contar con información útil para la realización de desembarcos en playas del mar del norte.

En este orden de ideas los primeros trabajos en el área son los realizados por Sverdrup y Munk, presentados en un reporte con el nombre "Viento oleaje y propagación: Principios en el pronóstico (1943)", siendo este un excelente borrador, pero carecía de estudios en gráficos adimensionales que relacionaran la altura de ola con el fetch.

El siguiente trabajo del que se tienen noticias es el desarrollado por O'Brien el cual presenta en diciembre de 1943 un resumen con el nombre "Viento oleaje y propagación, una teoría básica para su pronóstico", en el cual O'Brien desarrolla las primeras relaciones H/U^2 , F/U^2 . En septiembre de 1945 O'Brien presenta un memorándum más detallado con las relaciones F/U^2 , H/U^2 , v/U , L_D/L_F , H_D/H_F y T_D/T_F . Este informe fue presentado a Sverdrup y Munk.

El Instituto de Oceanografía de California Scripps presenta en 1944 un reporte con el nombre "Representación adimensional de la generación y propagación de oleaje".

Finalmente un método adimensional aparece como la ecuación 72, en la página 9 del libro "Viento, oleaje y propagación: Sus relaciones teóricas para predicción" de H.U. Sverdrup y W.H Munk, publicado por la oficina de hidrografía de la armada de los Estados Unidos en 1947. En esta publicación ellos se refieren a su ecuación 52, igual que O'Brien lo hiciera a esta en su memo de diciembre de 1943, en la cual el presentaba un método adimensional de pronóstico.

2.5.2 Filosofías en la predicción del oleaje

De los diferentes métodos de predicción de oleaje, existen básicamente dos conceptos:

- o La ola significativa.
- o El espectro del oleaje.

Ola Significante es un método sencillo que pronostica los principales parámetros, como la altura de ola H_s , y el periodo de oleaje significativo T_s . La forma unitaria del espectro teórico puede utilizarse para estimar el espectro del oleaje y la forma normal del espectro direccional en función de la frecuencia, puede utilizarse para estimar completamente el espectro direccional.

Espectro de Oleaje es lo contrario del método de ola significativa, el método de espectro de oleaje, predice el espectro direccional, a partir del cual el espectro unidimensional y las alturas de ola significativa, se determinan.

Ambos métodos contemplan las siguientes consideraciones:

1. Ambos métodos utilizan la distribución de Rayleigh, para determinar la máxima altura de ola probable y utilizan datos medidos en campo para su calibración. Si se utilizan los mismo registros de oleaje o similares, ambos métodos deben devolver esencialmente los mismos resultados en la estimación del espectro direccional, la altura de ola y el periodo significativo y el periodo (f_0^{-1}) de la máxima densidad de energía.
2. El método de la ola significativa es más sencillo de utilizar y definitivamente menos costoso en términos de equipo de cómputo, ya que el método de espectro de oleaje requiere un programa muy sofisticado y caro en términos de equipo de cómputo.
3. Ambos métodos son complemento del otro e incluso se pueden utilizar como técnicas para calibrarse mutuamente.
4. Los métodos mencionados se utilizan para conocer las condiciones extremas de oleaje asociadas criterios de diseño y no necesariamente para su utilización en el pronóstico de condiciones diarias de oleaje y viento.

5. Actualmente existen por lo menos siete métodos para la predicción de oleaje y no son necesariamente mejores unos que otros. El pronóstico tanto del viento como del oleaje es tanto un arte como una ciencia, por lo cual la precisión de cualquier método tanto de la práctica, como de la experiencia, de la verificación y la correlación.

2.5.3 Descripción de los modelos de predicción de presión, viento ciclostrófico y oleaje en aguas profundas

El primer paso para evaluar teóricamente el oleaje provocado por un ciclón, es determinar el perfil de presiones típico que se presenta en una zona, ya que las características de dicho perfil indican la magnitud y la distribución de los vientos ciclostróficos, los cuales a su vez generan el oleaje dentro o en las cercanías del ciclón. Existen varios modelos matemáticos que han sido contrastados con datos de campo que representan correctamente el perfil y gradiente de presiones, estos modelos tienen la ventaja de que dependen de muy pocos parámetros.

Los modelos de predicción del oleaje generado por ciclones están basados en los perfiles de presión. El campo de presiones es el mismo en todas las direcciones del cuadrante medido desde el centro del ciclón, esto permite que el modelo describa círculos concéntricos de presión constante conocidos como isobaras. La pendiente de los perfiles de presión es el gradiente, el cual se utiliza en la ecuación viento – gradiente ciclostrófico. Es así como se puede ser integrar a otros modelos, con el objeto de determinar fenómenos como la altura, período y dirección del oleaje.

Una de las consideraciones del modelo de viento ciclostrófico es que se considera inicialmente estacionario el fenómeno (razón por la cual se obtienen isobaras circulares concéntricas), posteriormente se aplica al modelo una corrección por velocidad de avance del ciclón.

Los modelos teóricos más utilizados para evaluar el perfil de presiones y predecir los vientos ciclónicos son los que se derivan de las ecuaciones generales de presión, siendo estas ecuaciones las que mejores resultados ofrecen.

Las expresiones matemáticas que describen el perfil de presiones son las siguientes:

$$\frac{P_r - P_c}{P_\infty - P_c} = A e^{-B(R_c/r)} \quad (1)$$

$$\frac{P_r - P_c}{P_\infty - P_c} = 1 - \left(1 + a \left(\frac{r}{R_c} \right)^2 \right)^{-b} \quad (2)$$

donde:

P_c , Presión en el centro del ciclón.

P_r , presión a una distancia radial r desde el centro.

P_{∞} , presión a una distancia considerada infinita.

R_C , radio del máximo viento ciclostrofico.

r , radio a cualquier distancia del centro

En las siguientes expresiones: $A = B^{-1}$ y $a = b^{-1}$, se debe de cumplir la igualdad para que se satisfagan las expresiones matemáticas con las cuales se calcula el viento ciclostrofico. En la primera de las dos ecuaciones propuestas por Holland, si se utiliza $A = B^{-1} = 1$, se obtiene la ecuación original del modelo *Rankin Vortex*. Donde A , B , a y b son parámetros de los modelos obtenidos al utilizar datos medidos en campo.

La segunda ecuación fue propuesta por *Bretschneider* para el análisis de perfiles de presiones. Cuando $a = b^{-1} = 1$, la segunda ecuación se convierte en el modelo *Bret Model-X* y para $a = b^{-1} = 2$, la segunda ecuación se transforma en el modelo de *Fujita* o *modelo-J*.

El número adimensional $N_c = fR_C / V_{CR} = (0.522R_C \text{sen}\phi) / K\Delta P_C^{1/2}$, que se conoce como número de *Rankin Vortex* es de gran utilidad para elegir al modelo que más se ajusta al fenómeno meteorológico.

Bretschneider (1990), luego de estudiar datos de varios ciclones, sugiere los siguientes valores para A , B , a y b . Dichos valores pueden ser validados o corregidos con mediciones de campo.

$0.00 < N_c < 0.05$	$A = B^{-1} = 1$
$0.03 < N_c < 0.08$	$A = B^{-1} = 5/4$
$0.03 < N_c < 0.08$	$a = b^{-1} = 0.5$
$0.06 < N_c < 0.15$	$a = b^{-1} = 1$

A continuación se presentan las bases y las expresiones matemáticas del modelo *Hydromet*, del cual se obtienen los resultados teóricos más aceptables, en comparación con otros modelos tales como el de *NOAA Model-I*, *Fujita Model-J* y el *Bret Model-X*,

2.3.4 Modelo de presión

El modelo *Hydromet* se basa en la ecuación del máximo viento ciclostrofico dado por la siguiente ecuación:

$$V_{CR} = k_0 \sqrt{\max(r dp / dr)} \quad (3)$$

donde:

$$k_o = \sqrt{\frac{1}{\rho_a}}$$

ρ_a , densidad del aire el cual es función de la temperatura y la presión del aire en el radio de máximo viento ciclostrofico.

Los parámetros utilizados son los siguientes:

V_{CR} , Velocidad máxima del viento ciclostrofico

$r \frac{dp}{dr}$, máximo gradiente de presiones.

Adicionalmente se requieren las siguientes variables y constantes:

- o K_0 constante interna del modelo.
- o C_1 constante teorica [1/e].
- o K_1 Constante teórica que depende de las unidades utilizadas para la presión y velocidad. Varía de: $K_1 = 66 - 68$ velocidad en *nudos* y presión en pulgadas de Hg y $K_1 = 11.34 - 11.68$ con velocidad en *nudos* y presión en milibares. El rango de variación se debe principalmente a los cambios en la densidad del aire.
- o $P_N - P_C$ gradiente de presiones entre el centro del huracán y una distancia suficientemente alejada (en [mb]).
- o dp/dr , gradiente de presiones.

Los valores de las constantes utilizadas son:

$$K_0 = 19.26 - 18.70 \tag{4}$$

$$K_1 = \frac{K_0}{\sqrt{C_1}} \tag{5}$$

Las ecuaciones para evaluar el gradiente de presión y presión central del huracán respectivamente, son:

$$V_{CR} = k_o \sqrt{\max(r dp / dr)} \tag{6}$$

$$P_N - P_C = \left(\frac{V_{CR}}{k_1} \right)^2 \tag{7}$$

$$P_C = P_R - C_2 (P_N - P_C) \tag{8}$$

A partir de las ecuaciones (5) a (7) se obtienen las expresiones (8) a (11) las cuales evalúan la presión en cualquier distancia r , el gradiente de presiones y el máximo viento ciclostrófico.

$$P_r = P_C + (P_N - P_C) * e^{-R_C/r} \tag{9}$$

$$R_C \frac{dp}{dr} = (P_N - P_C) \left(\frac{R_C}{r} \right)^2 e^{-R_C/r} \tag{10}$$

$$r \frac{dp}{dr} = (P_N - P_C) \left(\frac{R_C}{r} \right) e^{-R_C/r} \tag{11}$$

$$V_{CR} = \left(\frac{P_N - P_C}{\rho_a} \frac{R_C}{r} e^{-R_C/r} \right)^{1/2} \tag{12}$$

2.5.5 Evaluación del perfil de presiones

En las Figuras 2.4 a 2.6 se muestran los resultados obtenidos al aplicar los cuatro modelos antes mencionados (Silva et al. 1998). Se presentan los perfiles teóricos de presión generados; el gradiente de presiones, que es directamente proporcional al viento ciclostrófico y finalmente el máximo gradiente de presiones dp/dr , el cual es una combinación entre el viento y el fetch, lo que le da gran importancia a este parámetro en la generación de oleaje.

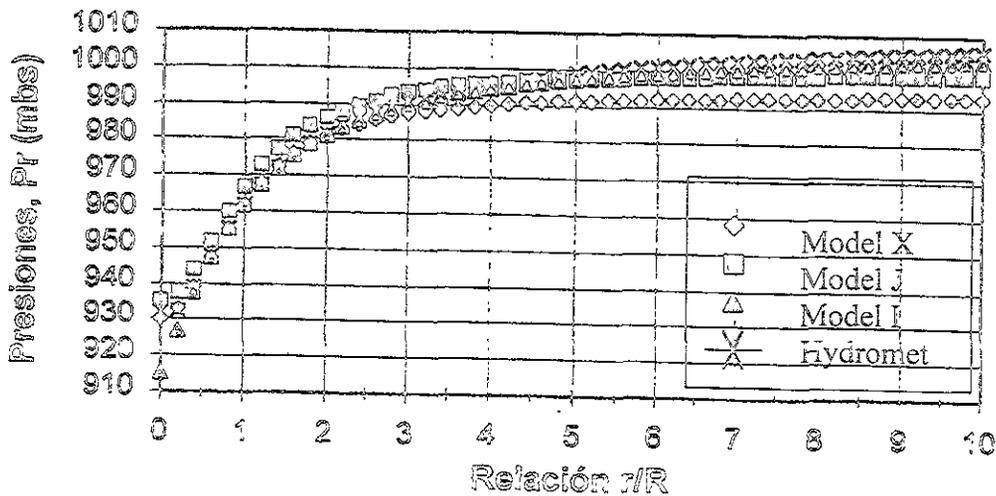


Figura 2.4. Resultados de P_r vs. r/R obtenidos para los 4 diferentes modelos considerados, utilizando $R = 10$ millas náuticas, $P_R = 962$ mbs y $\max(r dp/dr) = 30$ mbs.

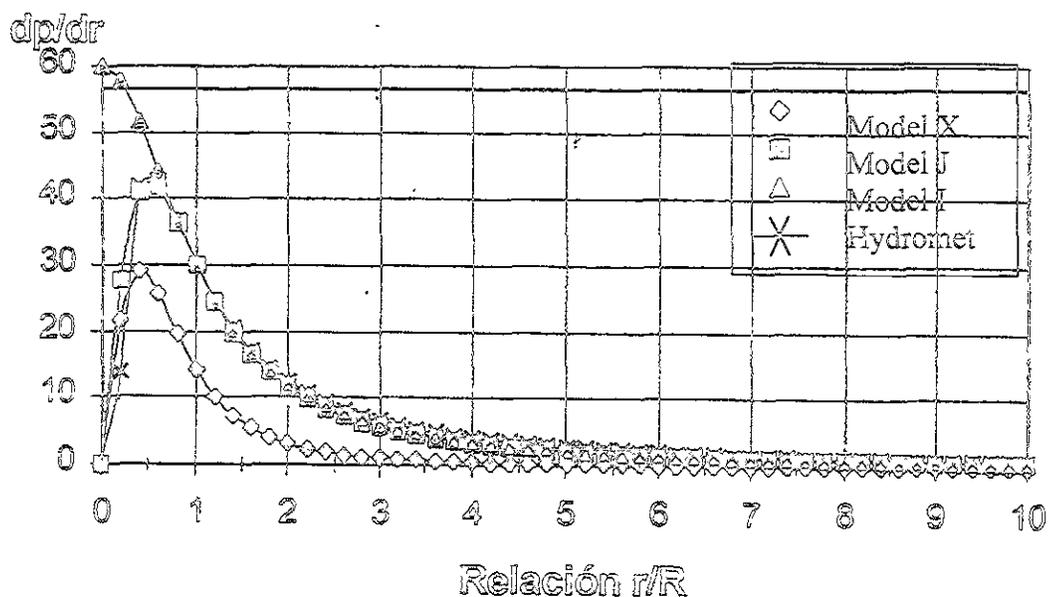


Figura 2.5. Resultados de dp/dr vs. r/R obtenidos para los diferentes modelos considerados, utilizando $R = 10$ millas náuticas, $P_R = 962$ mbs y $\max(r dp/dr) = 30$ mbs

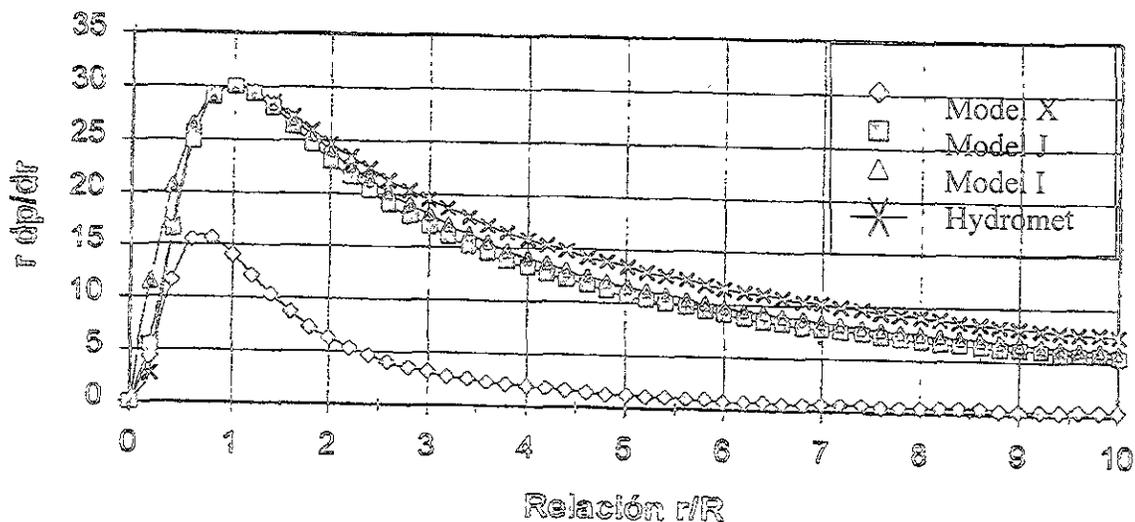


Figura 2.6. Resultados de $r dp/dr$ vs. r/R obtenidos para los diferentes modelos considerados, utilizando $R = 10$ millas náuticas, $P_R = 962$ mbs y $\max(r dp/dr) = 30$ mbs

2.5.6 Modelo simplificado de predicción de oleaje

El modelo simplificado de predicción de oleaje o modelo "Hydromet" fue desarrollado originalmente por Bretschneider (1987). Con dicho modelo se obtiene directamente la

altura de ola significativa y su correspondiente período, en función del campo de viento ciclostrófico. Según Bretschneider, es completamente válido hacer uso de este modelo independiente del modelo de predicción de campos de vientos que se empleando, por esta razón en este trabajo se utiliza esta metodología.

Para el desarrollo de esta metodología, se consideraron datos de 51 huracanes, cada uno con diferentes valores del parámetro fR/U_R (donde $U_R = K\Delta P_C^{1/2} - fR/2$, R = radio del viento máximo, ΔP_C = gradiente de presión desde el centro del huracán a la presión normal, $f = 2\omega \sin\phi$, donde ϕ = latitud del ciclón, ω = velocidad angular de la tierra y f es el coeficiente de Coriolis), cubriendo así un amplio espectro de los parámetros más importantes que definen a los ciclones estacionarios.

Los datos de entrada que requiere el modelo simplificado de Bretschneider para la predicción de oleaje debido a ciclones son los siguientes:

- Conocer el modelo de presiones que mejor se ajusta a la zona a estudiar.
- Determinar la presión en el centro del huracán P_C y la presión fuera de la zona de influencia del fenómeno P_N .
- Determinar el radio en el que se presenta el máximo gradiente del perfil de presiones, el cual se obtiene derivando el perfil de presiones.
- Conocer la posición del centro del ciclón, específicamente la latitud para tomar en cuenta los efectos de Coriolis.
- Tener una estimación de la velocidad y dirección de avance del ciclón.

2.5.7 Metodología de Cálculo

El primer paso es determinar el radio de máximo viento ciclostrófico R_C , en el cual se contrarrestan las fuerzas centrífugas y las fuerzas debidas al gradiente de presiones. El R_C es muy cercano al radio donde se presenta el máximo gradiente de presiones R_g siendo este último un poco más pequeño que el R_C .

Se supone inicialmente que los dos radios son iguales:

$$R_C = R_g \quad (13)$$

Se calcula luego la velocidad del viento ciclostrófico:

$$U_{Rg} = K\sqrt{\Delta P_C} \quad (14)$$

El valor de K (de Rankin) varía para el modelo Hydromet de 11.3 a 11.7 dependiendo de la densidad del aire.

El número de vorticidad de Rankin, N_C se calcula con la siguiente expresión:

$$N_C = \frac{fR_C}{U_{RC}} \quad (15)$$

donde:

$$f = 2\omega \text{sen}\phi = 0.525 \text{sen}\phi \quad (16)$$

Para el modelo Hydromet, existe una relación entre el N_C y R_g/R_C . Con esta relación se evalúa el R_C y se compara con el que se supuso inicialmente. Este procedimiento se repite hasta que el valor de R_C calculado sea igual al R_C supuesto.

En la figura 2.7 se muestra la relación entre $N_C = fR_C/U_C$ y R_g/R_C para tres de los modelos mencionados: Hydromet, Fujita y Bret-X. Estos valores también se presentan en la tabla 2.1.

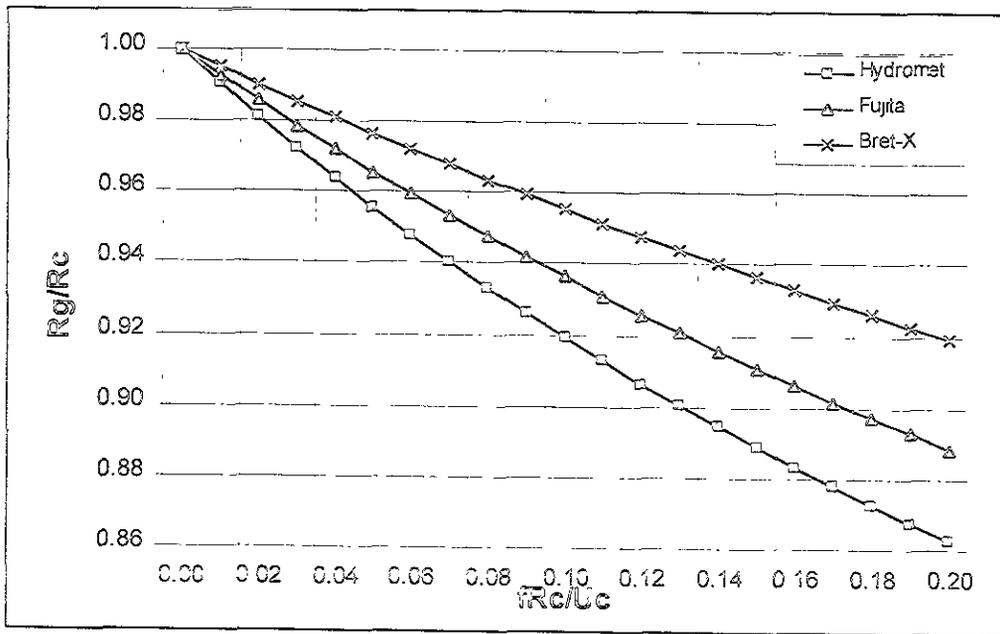


Figura 2.7. Relaciones entre el N_C y R_g/R_C para los modelos: Hydromet Rankin vortex, Fujita y Bret X.

FRUR	Rg/Rc		
	Hydromet	Fujita	Bret-X
0	1	1	1
0.01	0.9903	0.9926	0.9951
0.02	0.9809	0.9856	0.9902
0.03	0.9721	0.9787	0.9855
0.04	0.9636	0.972	0.9809
0.05	0.9554	0.9656	0.9765
0.06	0.9476	0.9594	0.9721
0.07	0.9401	0.9534	0.9678
0.08	0.9329	0.9476	0.9635
0.09	0.9259	0.9419	0.9594
0.1	0.9192	0.9363	0.9554
0.11	0.9127	0.931	0.9514
0.12	0.9064	0.9258	0.9476
0.13	0.9003	0.9207	0.9438
0.14	0.8945	0.9158	0.9401
0.15	0.8888	0.9109	0.9364
0.16	0.8832	0.9062	0.9328
0.17	0.8779	0.9016	0.9293
0.18	0.8727	0.8971	0.9259
0.19	0.8676	0.8928	0.9225
0.2	0.8625	0.8884	0.9191

Tabla 2.1. Radio del máximo gradiente de presiones contra radio del máximo viento ciclostrófico, relacionados para los modelos: Hydromet Rankin vortex, Fujita y Bret X.

Una vez conocida la relación entre R_g/R_c se calcula el U_{Rg} con la siguiente fórmula:

$$U_{Rg} = U_{RC} - \frac{1}{2} f R_C \quad (17)$$

Se calcula nuevamente el N_C como:

$$N_C = \frac{f R_C}{U_{Rg}} \quad (18)$$

Posteriormente se determina el valor de la constante K' , la cual depende de N_C , como del método que se utilice para evaluar el perfil de presiones. Conocida K' se determina la altura de ola significativa en el radio de máximo viento ciclostrófico para la condición de ciclón estacionario, mediante la siguiente fórmula:

$$H_{RSta} = K' \sqrt{R_C \Delta P_C} \quad (19)$$

En la figura 2.8 y en la tabla 2.2, se muestra la variación de la constante K' en función del valor de N_C , para el modelo Hydromet – Rankin – Vortex.

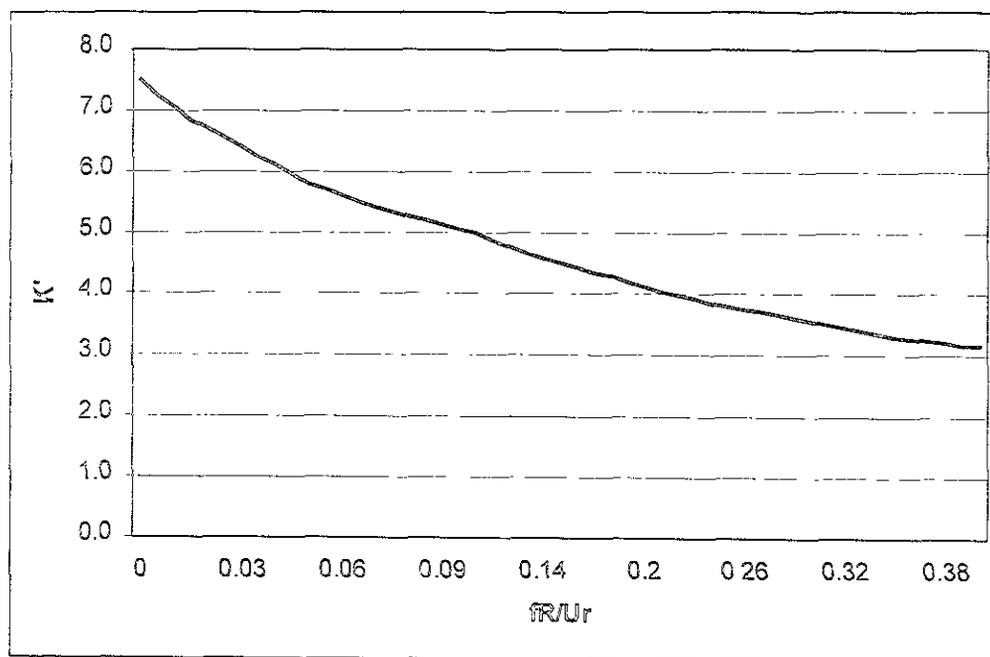


Figura 2.8. Variación de K' en función de fR/U_R ($K' = 29.329 \cdot (fR/U_R)$).

fR/U_R	K'	fR/U_R	K'
0.000	7.50	0.160	4.42
0.005	7.25	0.170	4.34
0.010	7.05	0.180	4.28
0.015	6.85	0.190	4.18
0.020	6.70	0.200	4.10
0.025	6.55	0.210	4.03
0.030	6.40	0.220	3.97
0.035	6.25	0.230	3.91
0.040	6.10	0.240	3.85
0.045	5.95	0.250	3.80
0.050	5.80	0.260	3.75
0.055	5.70	0.270	3.70
0.060	5.60	0.280	3.65
0.065	5.49	0.290	3.60
0.070	5.42	0.300	3.55
0.075	5.34	0.310	3.50
0.080	5.27	0.320	3.45
0.085	5.20	0.330	3.40
0.090	5.13	0.340	3.35
0.095	5.06	0.350	3.30
0.100	5.00	0.360	3.26
0.110	4.88	0.370	3.23
0.120	4.76	0.380	3.20
0.130	4.66	0.390	3.17
0.140	4.57	0.400	3.15
0.150	4.50		

Tabla 2.2. Modelo adimensional de oleaje para ciclones estacionarios, relación entre K' y N_C , Bretschneider 1972.

Hasta aquí solo se tiene evaluada la altura de ola significativa y la velocidad del viento ciclostrofico para el radio R . A partir de aquí, se procede a encontrar la altura de ola y la velocidad del viento para cualquier r .

Para evaluar el perfil de velocidades de viento, U_r / U_R , se utiliza la figura 2.8, la cual relaciona este valor con los de los números de vorticidad de Rankin, N_C y el radio relativo r/R .

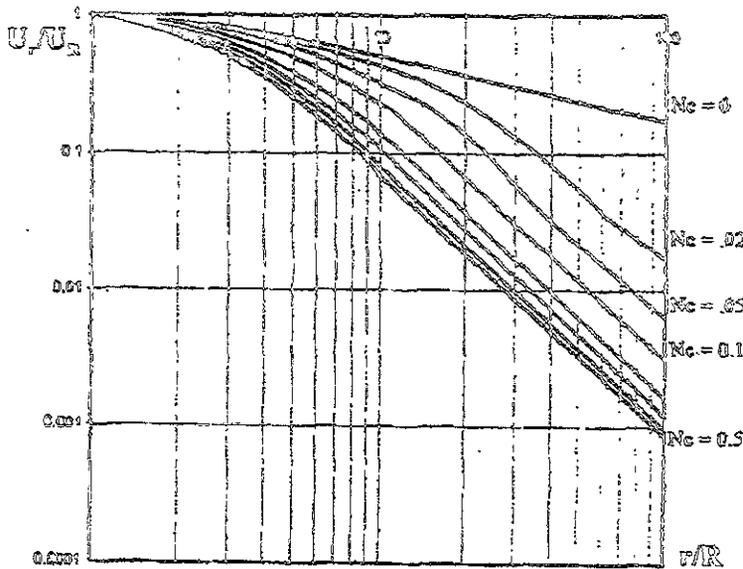


Figura 2.9. Velocidad relativa del viento, U_r/U_R , en función de N_C y r/R .

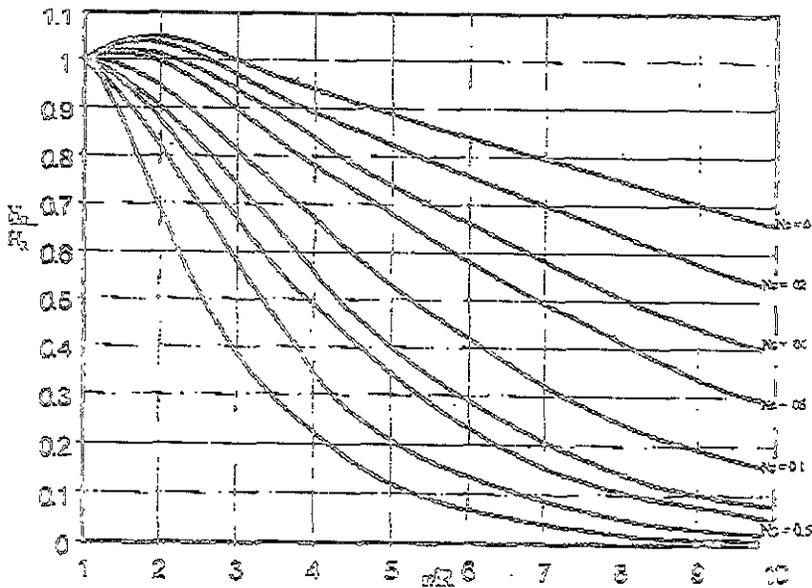


Figura 2.10. Relación de la altura de ola significativa H_r/H_R en función de la distancia radial, r/R , medida desde el ojo del ciclón.

Las ecuaciones que representan las curvas de velocidad de viento relativo y altura de ola significativa, figuras 2.8 y 2.9, respectivamente, se encuentran integradas a los programas de cómputo.

Con las ecuaciones presentadas hasta el momento se pueden generar los perfiles de velocidad del viento y altura de ola significativa para un ciclón estacionario. A partir de esta condición, se aplica un factor de corrección debido a velocidad de avance del ciclón, de esta manera es posible utilizar el modelo para velocidades de desplazamiento, dependiendo de las condiciones y el tamaño del ciclón. Para velocidades de desplazamiento superiores a 46 km/h, el método comienza a sobreestimar las alturas de ola.

El campo de oleaje para el ciclón en movimiento se obtiene con la siguiente fórmula:

$$H_{r,\theta} = H_r \left[1 + \frac{0.5V_F \cos(\beta)}{U_r} \right] \quad (20)$$

donde V_F es la velocidad de avance del ciclón y β es el ángulo entre la dirección de avance del ciclón y del viento U_r .

El campo de velocidades del viento a 10 metros sobre el nivel medio del mar (msnm) se evalúan con la siguiente expresión:

$$V_{10\theta} = 0.865(U_r + 0.5V_F \cos(\beta)) \quad (21)$$

El campo de períodos se calcula con las siguientes relaciones:

$$\frac{gF_e}{U_{10}^2} = \left[\frac{1}{0.0118} \arctan h \left(\frac{1}{0.3} g \frac{H_s}{U_{10}^2} \right) \right]^{\frac{12}{5}} \quad (22)$$

$$\frac{gT_p}{2\pi U_{10}} = \tanh \left[0.0236 \left(\frac{gF_e}{U_{10}^2} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (23)$$

donde el F_e es el fetch efectivo del oleaje.

Este modelo se calibró con datos de los satélites oceanográficos Topex Poseidon, así como con información de boyas y mareógrafos en el Golfo de México. La información incluye al ciclón Gilberto. Silva et al.(1998).

2.6 Resumen del Capítulo II

En el capítulo 2 inicia con una breve descripción de las fuerzas generadoras del viento a nivel global, incluyendo el viento-gradiente de presión, fuerzas centrífugas, efecto de Coriolis y fricciones.

A continuación se describen los principales tipos de viento global, concluyendo con una descripción de los vientos ciclostróficos, motivos de este estudio. Se presenta una breve reseña histórica de la modelación del fenómeno viento - oleaje, la cual concluye mencionando los actuales modelos de pronóstico viento-oleaje-periodo. Partiendo de la reseña anterior se describe a detalle el Modelo Hydromet.

3 NORMALIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA BASE DE DATOS

3.1 Descripción de la base de datos

La base de datos que se utilizó en este estudio, se basa en los archivos históricos de los ciclones registrados tanto en el Océano Atlántico como en el Pacífico, desde 1949 hasta junio del 2000. La información con que cuenta la base de datos inicial es la siguiente:

- Fecha y hora del aviso.
- Posición del centro del ciclón en longitud y latitud [°].
- Velocidad del viento en la periferia del centro del ciclón (vientos máximos).
- Presión en el centro del ciclón (no siempre se dispone esta información).
- Radio ciclostrofico (no siempre se dispone esta información).
- Dirección y velocidad de avance del ciclón (no siempre se dispone esta información).
- Nombre del ciclón.

Como se puede observar no siempre se dispone de todos los parámetros básicos para el modelado numérico del fenómeno, por lo que resulta necesario el inferir dicha información con los ajustes que más adelante se presentan, con los datos disponibles en los boletines. A continuación se describe la metodología desarrollada para la normalización de la base de datos.

Lo primero que se realizó fue el delimitar las regiones de estudio en cada una de las vertientes oceánicas, quedando como límites para el pacífico:

-120.0° longitud, 35.0° latitud

-89.0° longitud, 10.0° latitud

De una base de 714 eventos registrados hasta el 30 de junio del 2000, 603 (84.3%), tuvieron influencia en la zona seleccionada.

Para el Atlántico el área de estudio queda delimitada entre los siguientes puntos:

-99.0° longitud, 35.0° latitud

-75.0° longitud, 14.0° latitud

De una base de datos de 515 eventos registrados hasta el 30 de junio del 2000, 265 (51.45%), tuvieron influencia en la zona seleccionada.

A continuación la figura 1.3, presenta el mapa de la república Mexicana con las regiones de estudio de cada una de las vertientes.

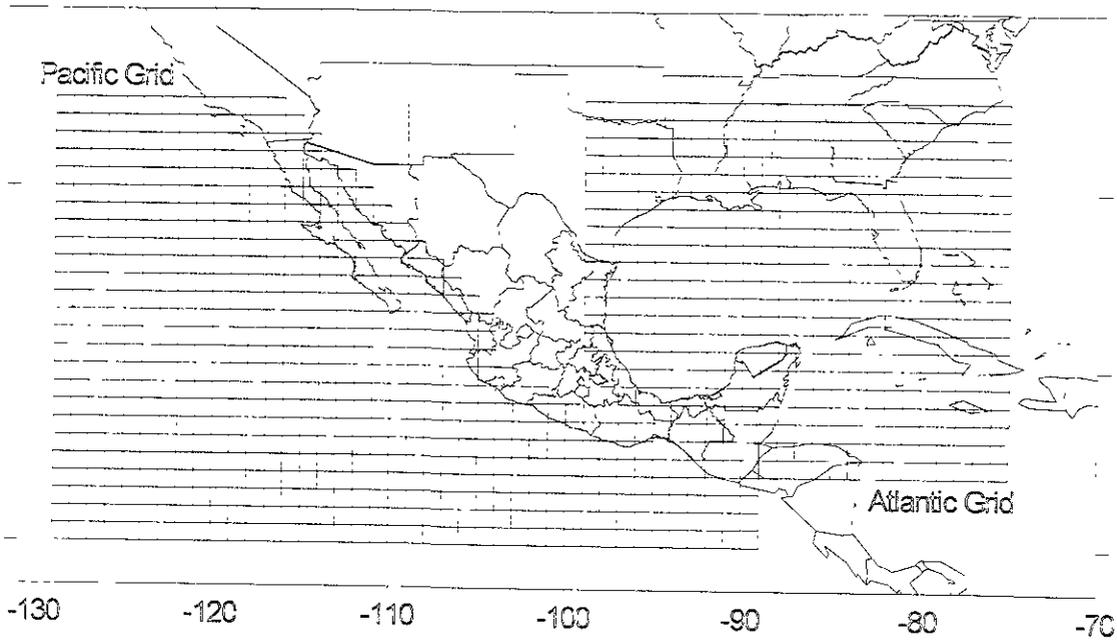


Figura 3.1. Regiones de estudio de las vertientes Atlántica y Pacífica. A continuación se muestran las trayectorias y la intensidad registrada en cada posición por los ciclones en la escala Saffir – Simpson. Considerando a 1 como la intensidad de una depresión tropical y 7 a un ciclón con intensidad de huracán clase 5.

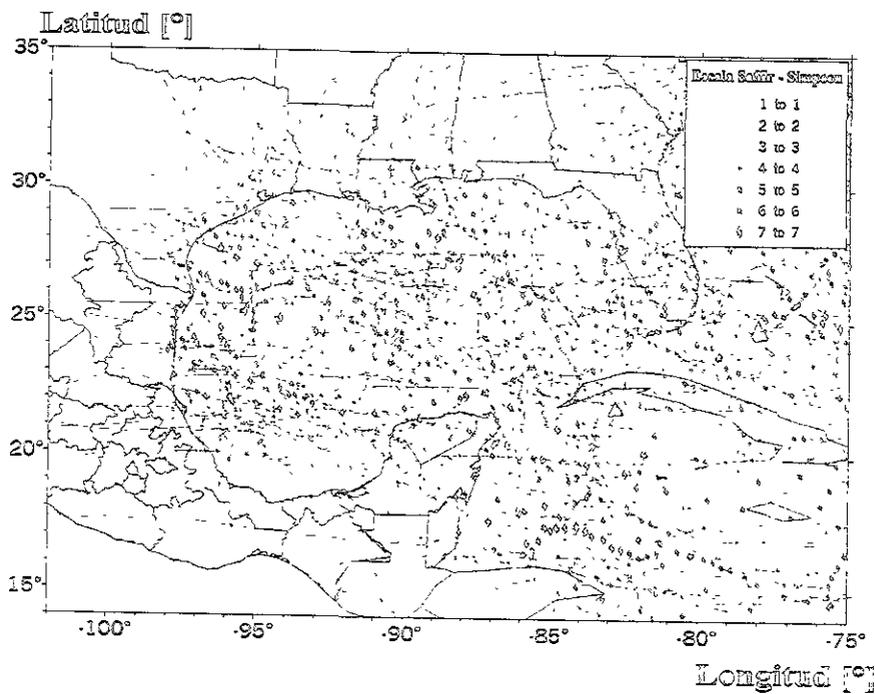


Figura 3.2. Trayectorias e intensidades registradas en vertiente Atlántica.

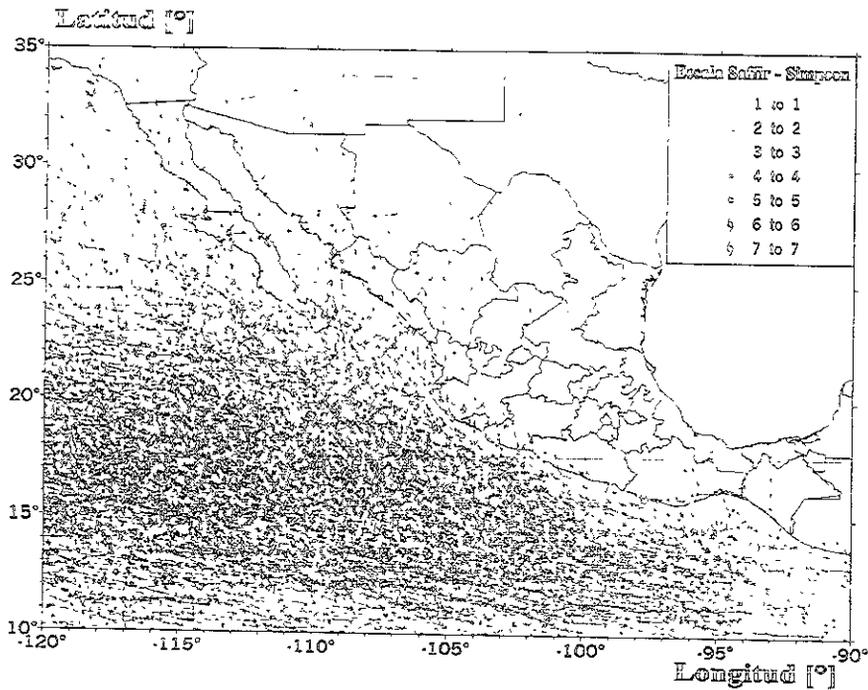


Figura 3.3. Trayectorias e intensidades registradas en la vertiente del Pacífico.

Debido a que prácticamente la base de datos de la Agencia Nacional de Administración Atmosférica y Oceanográfica (NOAA), carece de información sobre la dirección y la velocidad de desplazamiento, se desarrolló un sistema el cual utilizando posiciones sucesivas de un mismo ciclón, calcula la dirección y su velocidad de desplazamiento. La dirección de desplazamiento se calcula en Azimuths y la velocidad en km/h.

Para el cálculo de la velocidad de desplazamiento y dirección, el programa de cómputo, transforma las posiciones en Unidades de Transformación Mercator (UTM), en dicha transformación se considera la curvatura y el achatamiento terrestre.

Otro de los parámetros que fue necesario normalizar para efectos de cálculo, fue la presión en el centro del ciclón, para lo cual se planteó una relación entre la velocidad máxima del viento ciclostrófico (V_{CR}) y la presión central (P_C). Utilizando todos los registros históricos se plantean las siguientes relaciones para ambas vertientes.

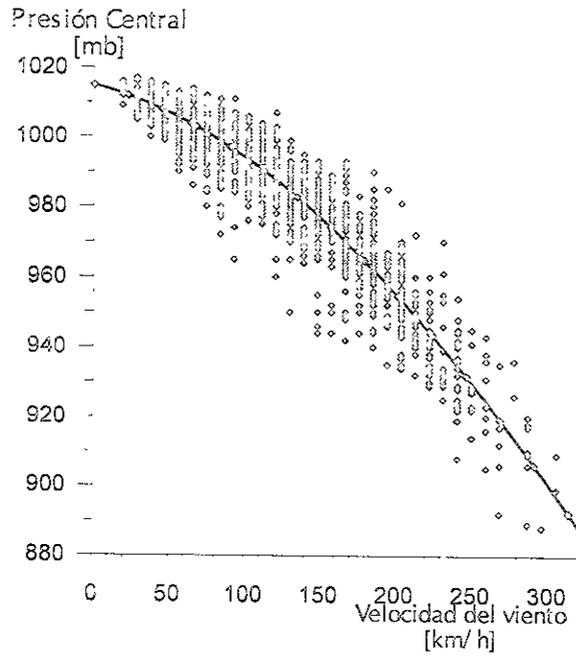


Figura 3.4. Distribución de los datos de presión vs. velocidad de viento, para la vertiente Atlántica, así como el la curva de ajuste propuesta.

La ecuación de la curva de ajuste de V_{CR} vs. P_C , para la vertiente Atlántica es:

$$P_C = 1015.46 - 0.128758V_{CR} - 0.000856224V_{CR}^2 \quad (24)$$

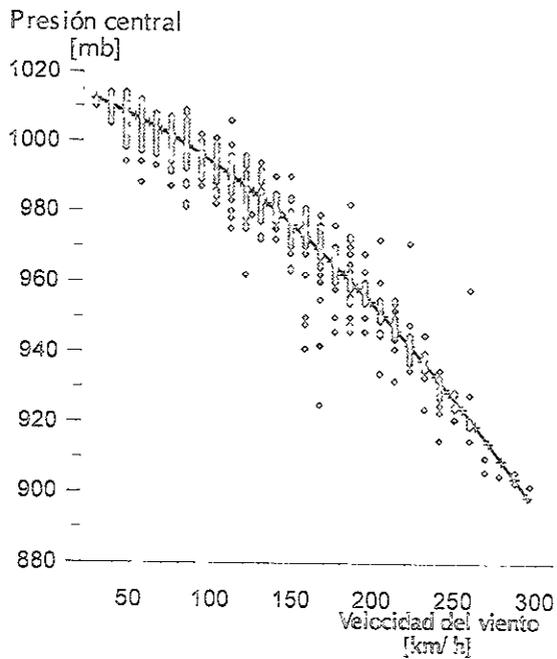


Figura 3.5. Distribución de los datos de presión vs. velocidad de viento, para la vertiente Pacífica, así como el la curva de ajuste propuesta.

La ecuación de la curva de ajuste de V_{CR} vs. P_C , para la vertiente Pacífica es:

$$P_C = 991.7 - 24.2363V_{CR} - 3.91299V_{CR}^2 \quad (25)$$

El último parámetro necesario para la modelación numérica es la dimensión del máximo radio ciclostrofico, el cual es aproximadamente mayor que el radio del "ojo" del ciclón, por lo cual, debido a los pocos datos medidos en campo, se realizó un ajuste entre la presión central P_C y el Radio ciclostrofico R_C .

Para el ajuste se contaba con 32 datos medidos en campo, 3 de los cuales fueron ciclones muy intensos como Gilberto, Andrew y Mitch. En el ajuste se aprecia el ajuste propuesto por el IMTA (1990), como se puede ver el ajuste propuesto se ajusta mejor a los valores de los ciclones más intensos medidos en los últimos 13 años, pero presenta una gran dispersión en ciclones de baja intensidad. No se disponen de muchos datos del diámetro del ojo de ciclones, debido principalmente a lo costoso que resulta utilizar aviones que midan dicho parámetro.

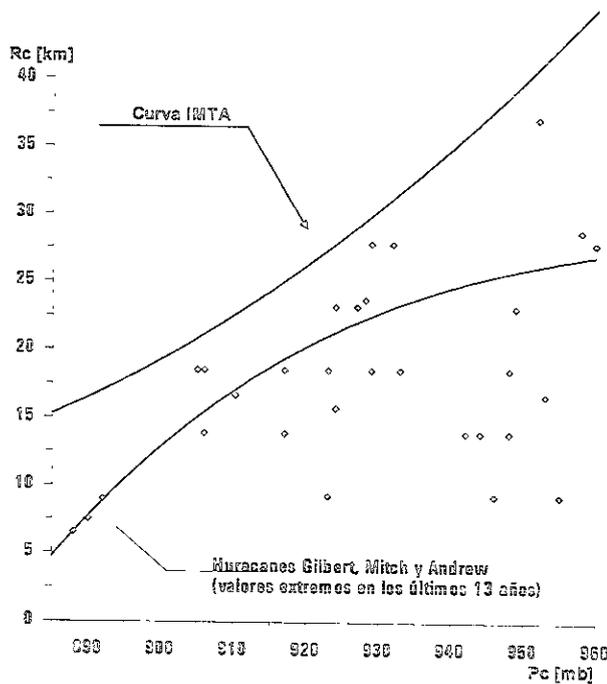


Figura 3.6. Ajuste entre los datos de P_C vs. R_C . Se presentan dos ajustes el propuesto por el IMTA y el de este estudio.

La ecuación del ajuste es la siguiente:

$$R_C = -21117.3 + 64.8695P_C - 0.066408P_C^2 + 2.2686e - 5P_C^3 \quad (26)$$

Para efectos del modelado numérico, resulto necesario contar con mayor información por lo que el sistema desarrollado contempla un módulo que interpola la información entre posiciones sucesivas a 0.1°

3.2 Estadística global de la base de datos

Con miras a poder conocer las tendencias estadísticas de los ciclones generados en ambos océanos, se inició con un estudio de todos los eventos registrados en los últimos 50 años. En este estudio se hace la suposición de que los ciclones son un fenómeno recursivo, es decir que hay un período de retorno asociado a su generación.

La primera línea de estudio se planteó como un análisis de los eventos registrados por año sin importar su intensidad, los resultados obtenidos a partir de esta hipótesis se muestran en la figura 3.7.

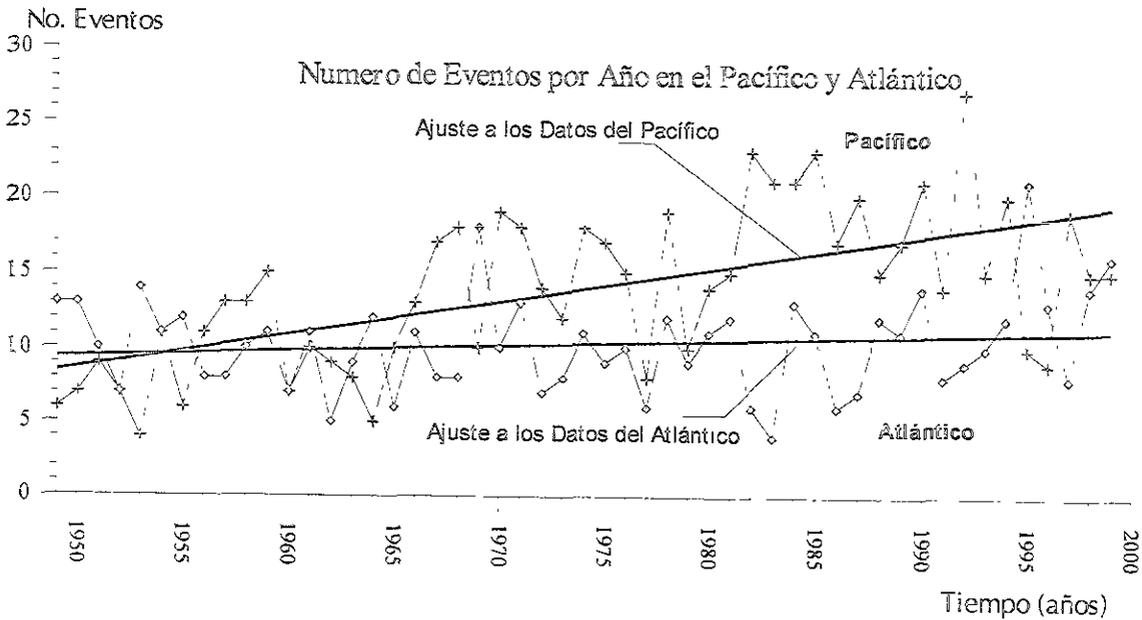


Figura 3.7. Número de eventos por año en ambas vertientes, Atlántica y Pacífica, así como sus ajustes de tendencia.

Como se aprecia, ambas vertientes presentan una tendencia a incrementar en promedio el número de eventos por año, el Atlántico presenta una tendencia promedio de 10 eventos por año y el Pacífico de 16. Dicha tendencia se puede deber al sobrecalentamiento global. En los últimos 20 años la temperatura promedio del mar se ha incrementado en 2°C , alteración que afecta una capa de más de 200 m (zona de mezclado), la alteración térmica modifica el sistema océano - atmósfera, lo cual incrementa la energía a disipar para alcanzar su equilibrio.

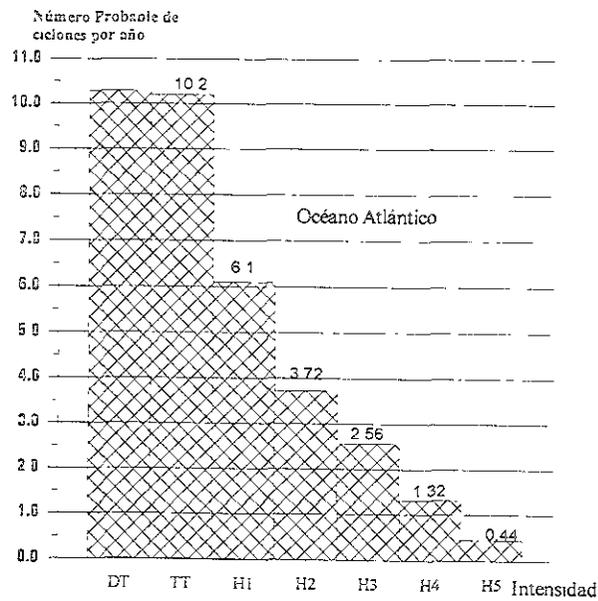


Figura 3.8. Número de eventos probables por intensidad en el Océano Atlántico.

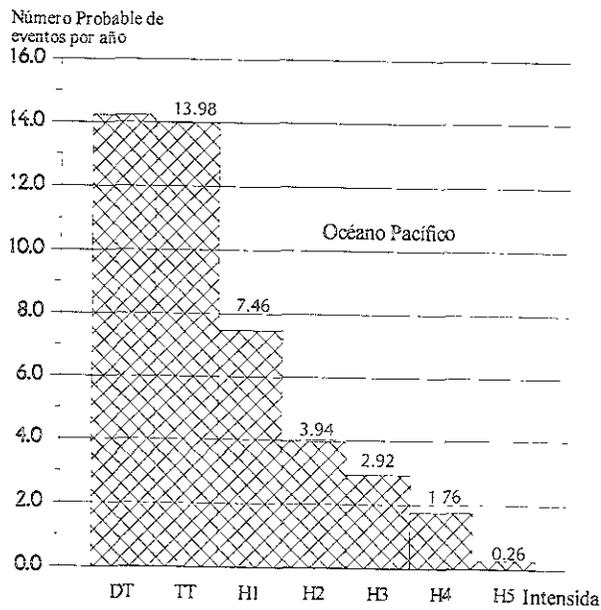


Figura 3.9. Número de eventos probables por intensidad en el Océano Pacífico.

De la observación de las figuras 3.8 y 3.9 se concluye que para el océano Atlántico existe una mayor probabilidad de ocurrencia para ciclones con intensidad de huracán clase 5, sin embargo, para las intensidades menores la probabilidad es mayor en la vertiente del océano Pacífico.

3.3 Climatología del Atlántico

Con miras a estudiar posibles tendencias entre el mes de generación del ciclón con su trayectoria e intensidad máxima alcanzada, se presentan los siguientes resultados en los que el período de estudio considera los meses de mayo a noviembre.

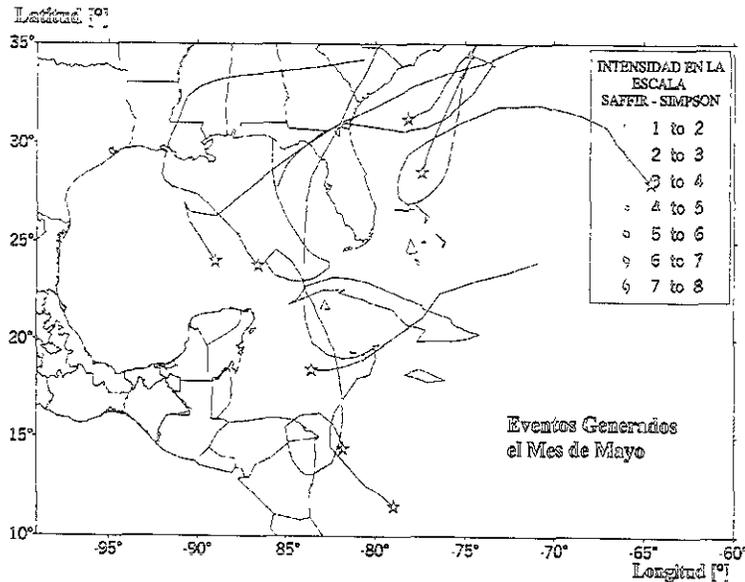


Figura 3.10. Ciclones generados en el mes de mayo en todo el período de registro, así como su intensidad máxima alcanzada, en función de la escala Saffir – Simpson.

De la figura 3.10 se puede observar la poca frecuencia de fenómenos en esta época del año, así como su baja intensidad, la cual no afecta demasiado a las costas del país.

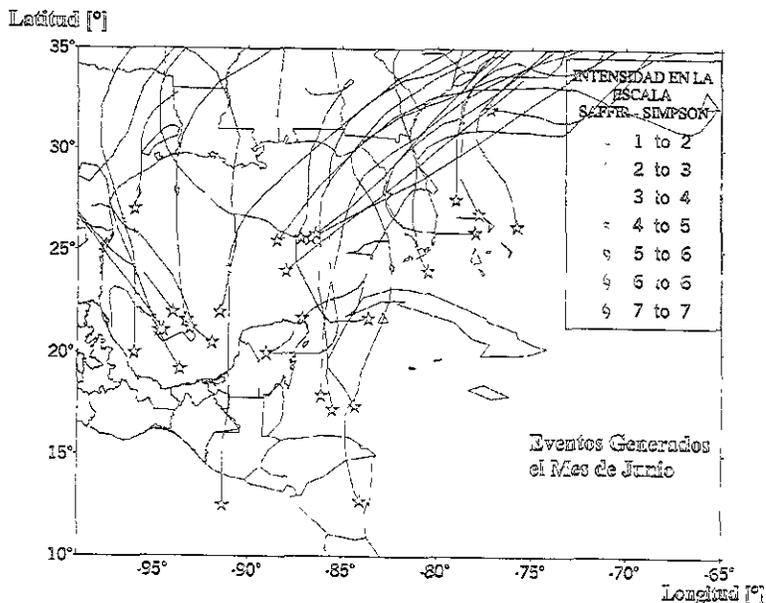


Figura 3.11. Ciclones generados en el mes de junio en todo el período de registro, así como su intensidad máxima alcanzada, en función de la escala Saffir – Simpson.

Así mismo de la figura 3.11 se observa un incremento en la frecuencia de esta clase de fenómenos, así como una fuerte tendencia a generarse en las zonas del Golfo de México, Mar Caribe y al norte de la península de Yucatán. También se puede apreciar el incremento en la intensidad, llegando a alcanzar estos fenómenos categoría de Huracán clase 1.

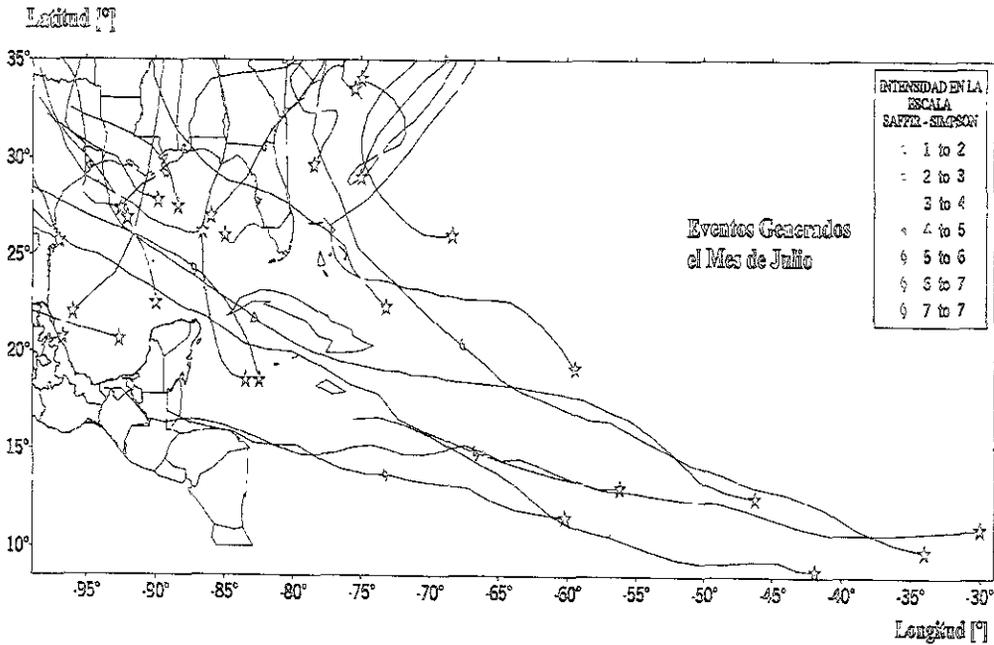


Figura 3.12. Ciclones generados en el mes de julio en todo el período de registro, así como su intensidad máxima alcanzada, en función de la escala Saffir – Simpson.

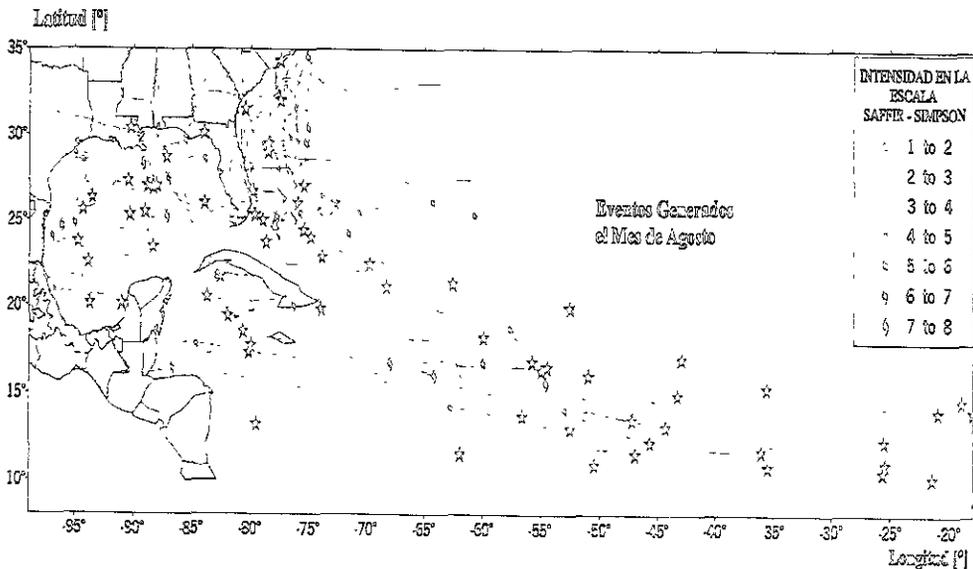


Figura 3.13. Ciclones generados en el mes de agosto en todo el período de registro, así como su intensidad máxima alcanzada, en función de la escala Saffir – Simpson.

Como se aprecia en la figura 3.12, los ciclones que tienen ocurrencia el mes de julio, presentan una baja tendencia a la generación de eventos en el Golfo de México y Mar Caribe, pero un notable incremento de ciclones intensos en la región del Atlántico Central

En los eventos generados en el mes de agosto (figura 3.13), se puede percibir un incremento notable tanto en cantidad como en intensidad, así como la zona de generación se recorre aún más hacia la costa del continente africano, sin embargo los litorales Mexicanos no muestran una gran cantidad de arribos.

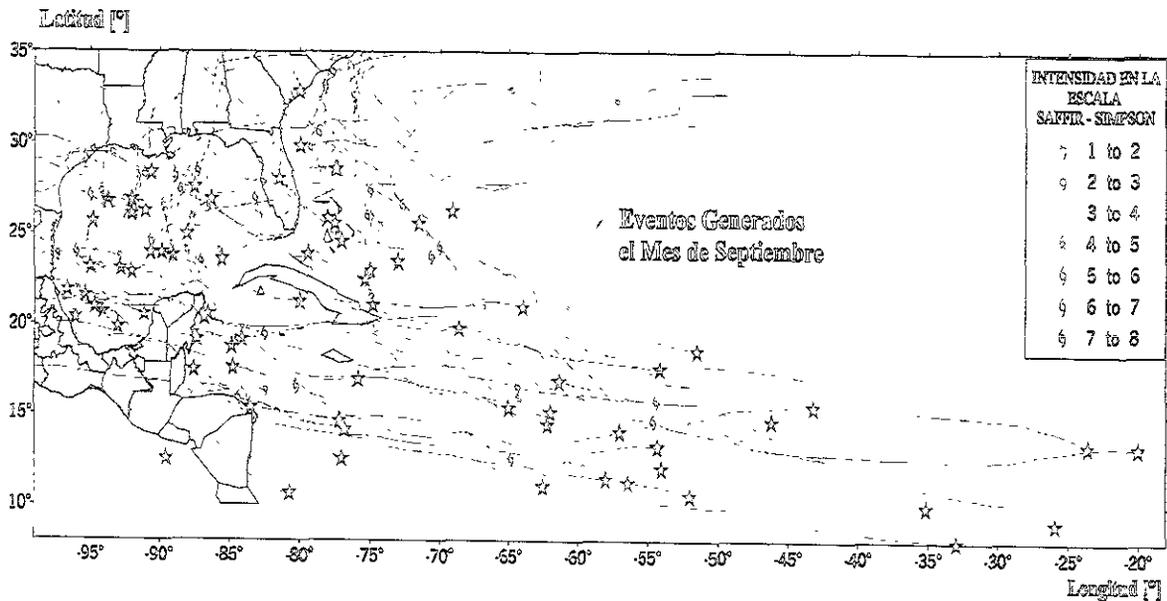


Figura 3.14. Ciclones generados en el mes de septiembre en todo el periodo de registro, así como su intensidad máxima alcanzada, en función de la escala Saffir – Simpson.

La figura 3.14, muestra una acusada tendencia en dos tipos de trayectorias, una de ellas hacia costas de la península de Florida y otra hacia la península de Yucatán, así como la marcada ocurrencia de fenómenos de gran intensidad con huracanes clase 4 o más.

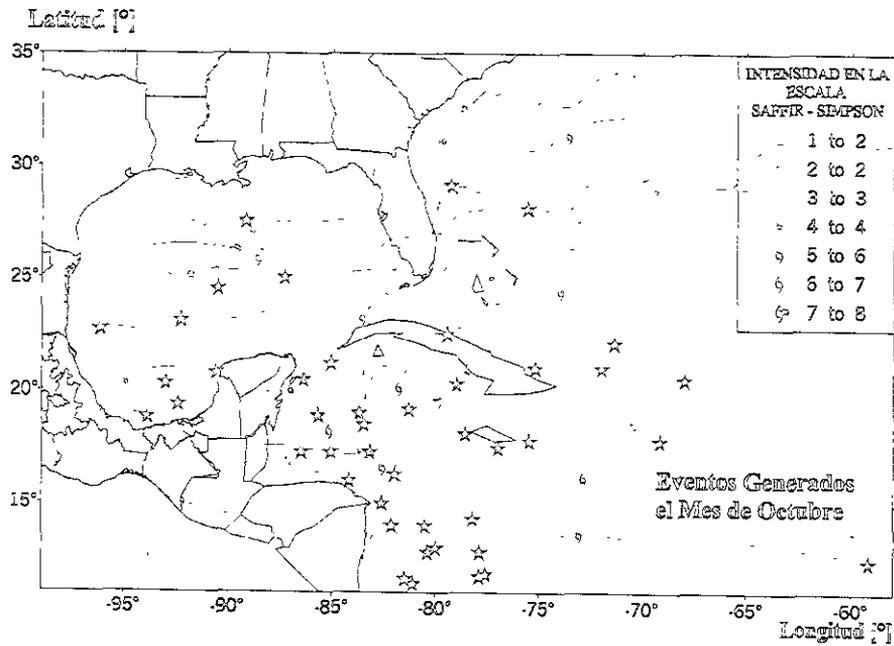


Figura 3.15. Ciclones generados en el mes de octubre en todo el período de registro, así como su intensidad máxima alcanzada, en función de la escala Saffir – Simpson.

El mes de octubre, muestra una fuerte tendencia de los eventos a generarse en las costas del Mar Caribe, pero también la existencia de eventos de gran intensidad como el ciclón Mitch. Nuevamente la región del País más afectada es la Península de Yucatán y la Sonda Campeche.

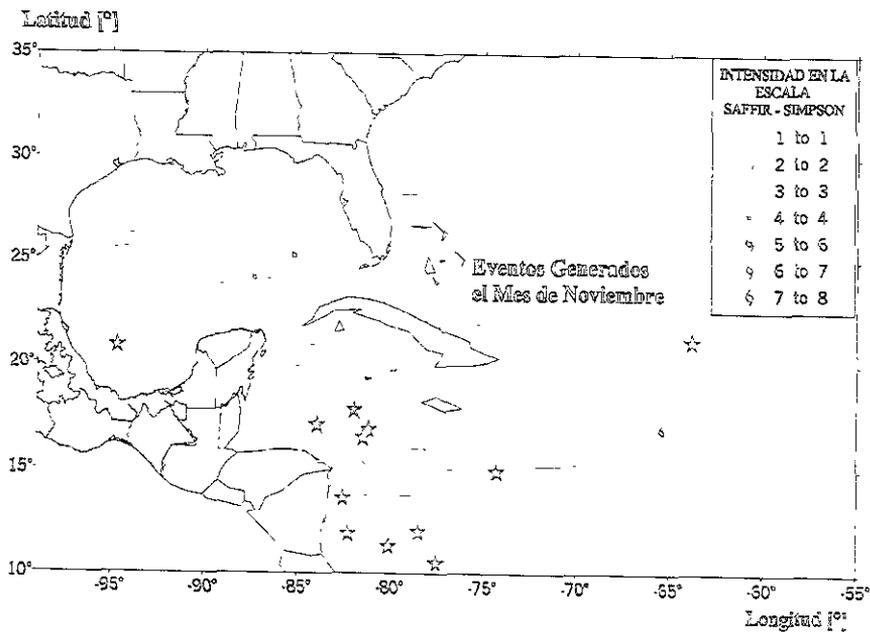


Figura 3.16. Ciclones generados en el mes de noviembre en todo el período de registro, así como su intensidad máxima alcanzada, en función de la escala Saffir – Simpson.

En la figura 3.16, se observa que el mes de noviembre muestra, básicamente una sola región de generación en aguas del Mar Caribe y en general eventos de baja intensidad, con trayectorias muy erráticas.

3.4 Conclusiones del Capítulo III

- Actualmente se cuenta con una base de datos normalizada, la cual permite una rápida actualización y portabilidad.
- Del análisis global de la base de datos se puede concluir como la vertiente Atlántica presenta una mayor probabilidad de afectación por eventos de alta intensidad, a pesar de eso la experiencia muestra que independientemente de ser eventos de intensidad media, los ciclones en la vertiente del Pacífico generan otro tipo de riesgos extremos como lluvias muy intensas en las montañas, principalmente por tratarse de fenómenos que desplazan una gran cantidad de humedad hacia la atmósfera y por efectos de convección con la abrupta topografía de la serranía esta se condensa, precipitándose en las cañadas.

Del análisis de los meses de generación, trayectoria e intensidad se presentan las siguientes conclusiones:

- Los meses con mayor vulnerabilidad para la República Mexicana en la vertiente Atlántica es en los meses de agosto, septiembre y octubre. Los dos primeros presentan trayectorias poco erráticas y zonas de generación muy marcadas; las zonas de generación son principalmente el Atlántico medio y oriental. El mes de octubre la región de generación se concentra en el Mar Caribe, pero sus trayectorias son marcadamente erráticas, principalmente por verse afectados por otros fenómenos como frentes fríos, etc.

4 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

4.1 Diagrama de flujo

Con el objeto de realizar el estudio de regionalización de zonas vulnerables a efectos adversos generados por ciclones, se realizó el modelado de todos los ciclones que han tenido ocurrencia en las regiones previamente delimitadas, para ello, fue necesario el desarrollar un sistema con la capacidad de “consultar” la base de datos histórica y calcular las diferentes “mailas” con los resultados de los diferentes modelos numéricos. A continuación se muestra el diagrama de flujo del sistema.

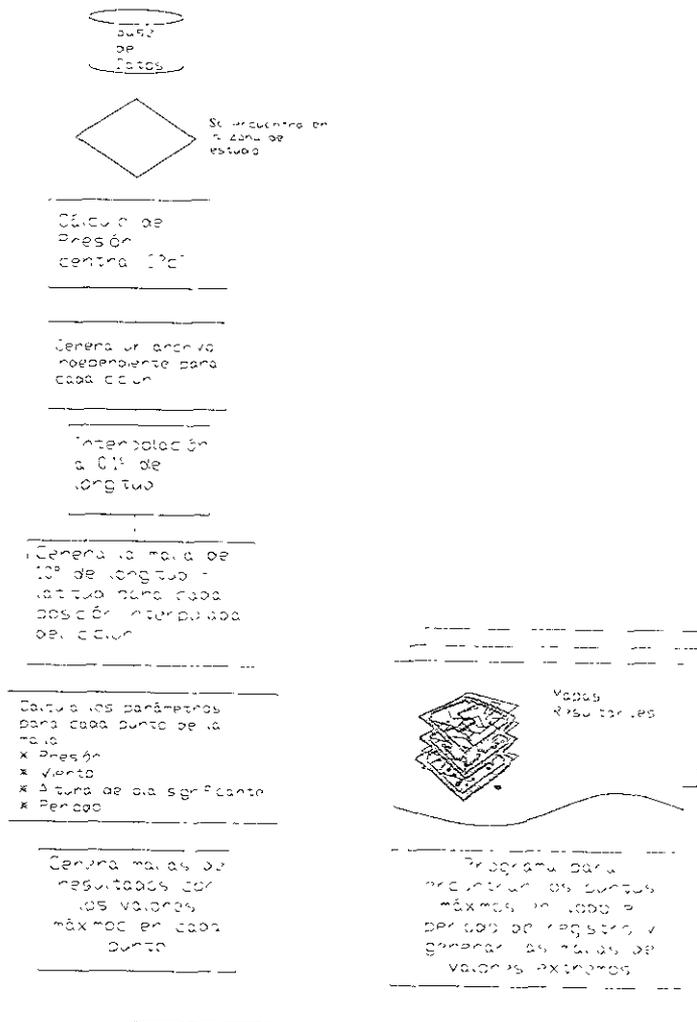


Figura 4.1. Diagrama de flujo del sistema para evaluar el riesgo oceánico – meteorológico

El sistema se conforma de un conjunto de subrutinas y modelos numéricos, en una estructura modular, la cual permite la incorporación de nuevos modelos, para considerar otros parámetros.

El sistema se diseñó para generar una malla con tamaño de celda de 0.1° longitud \times 0.1° latitud (aproximadamente 10 km^2). Para cada posición interpolada a 0.1° de grado, el sistema genera una malla de $10^\circ \times 10^\circ$ de longitud -latitud (aproximadamente 1000 km^2), calculando todos los parámetros océano - meteorológicos, al final de regenerar el fenómeno, se seleccionan los valores extremos generados en cada punto de la malla.

Los resultados se agrupan en 7 mallas georreferidas con los valores extremos de:

- o Velocidad de viento máximo ciclotrónico.
- o Altura de ola significativa máxima.
- o Período relativo a la altura de ola significativa máxima.
- o Intensidad en función de la escala Saffir - Simpson.
- o Velocidad de desplazamiento del ciclón.
- o Dirección de desplazamiento.
- o Presión atmosférica.

La clasificación de la intensidad se basa en la escala propuesta por la NOAA.

Color	Categoría	Velocidad del Viento [km/h]
DT	Depresión Tropical	< 64
TI	Tormenta Tropical	64 < > 118
HI	Huracán clase 1	118 < > 154
	Huracán clase 2	154 < > 178
	Huracán clase 3	178 < > 210
	Huracán clase 4	210 < > 250
	Huracán clase 5	250 <

Tabla 4.1. Escala de intensidades de ciclones tropicales Saffir- Simpson.

4.2 Mapas generados por ciclón por el sistema

El sistema genera las mallas con los máximos valores de los parámetros estudiados en la zona por la cual se desplazó el fenómeno, lo cual permite realizar análisis de cada ciclón en particular o el análisis de los valores extremos históricos, con fines de diseño y restricciones constructivas o preventivas. A continuación para ejemplificar se muestran los resultados del sistema para diferentes ciclones particularmente destructivos:

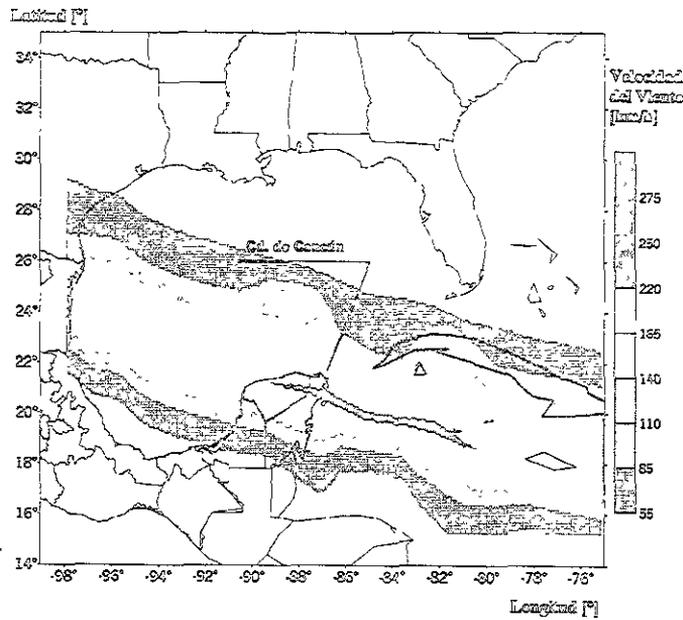


Figura 4.2. Malla con la velocidad del viento generada por el ciclón Gilberto, se puede apreciar la posición de la ciudad de Cancún, Quintana Roo.

La figura 4.2 muestra los resultados del campo de vientos máximos generados a su paso por el ciclón Gilberto, como se puede observar sobre los estados de Yucatán y Quintana Roo, como se aprecia frente a las costas de Isla Cozumel, el modelo presenta velocidades de viento mayores a los 270 km/h.

La figura 4.3 presenta el campo de oleaje generado en aguas profundas por el ciclón Gilberto en 1988, como se aprecia en el modelo de viento y altura de ola máxima significativa, al intensificarse el fenómeno el área de influencia se contrae, lo anterior se debe a que al disminuir el diámetro del ciclón, el gradiente se acentúa, el fenómeno anterior se representa correctamente en el modelo numérico.

El campo de oleaje se considera únicamente hasta la cota -80.m, a partir de la que el oleaje comienza a verse afectado por efectos de fondo.

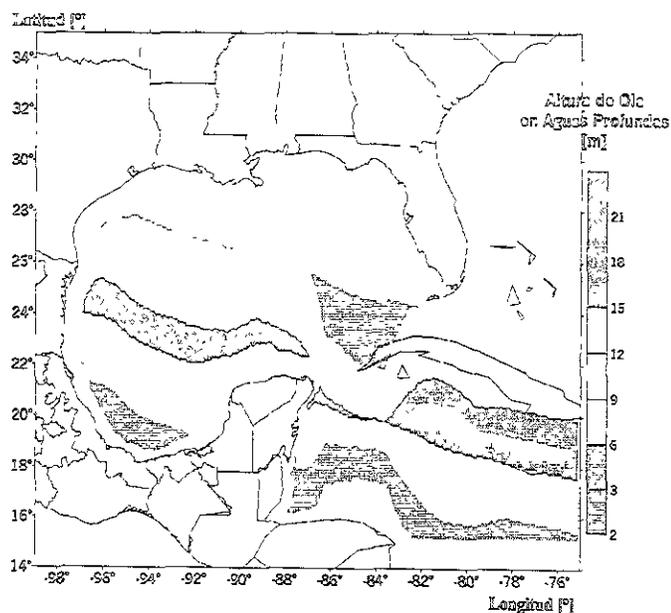


Figura 4.3. Altura de ola significativa generada por el ciclón Gilberto en 1988.

El mapa de isobaras (curvas de igual presión) de la figura 4.4, se puede utilizar como indicador, como el de isotacas, para conocer que tan intenso es un ciclón, además que resulta de gran utilidad en la predicción de marea de tormenta. A continuación se muestra el campo de isobaras generado por el ciclón Mitch frente a las costas de Honduras en 1998.

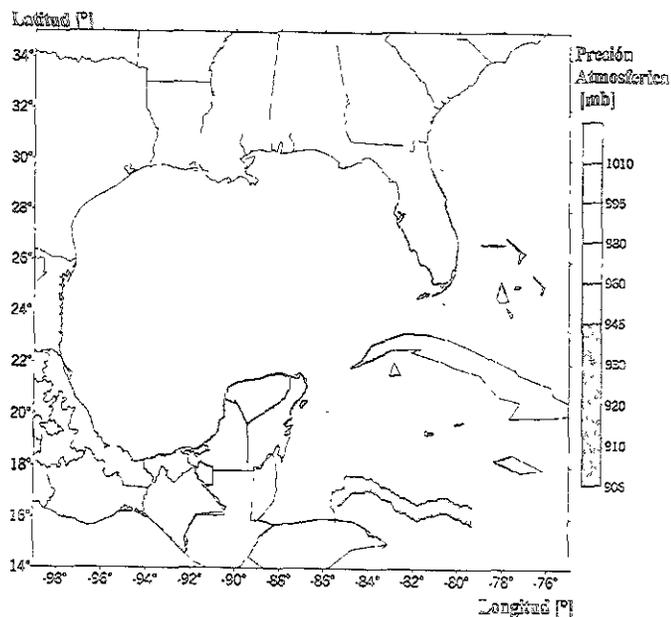


Figura 4.4. Mapa de isobaras generadas por el ciclón Mitch en 1998.

El campo de isobaras se utiliza en el modelado de marea de tormentas, junto con otros parámetros como velocidad de desplazamiento, ángulo de incidencia del ciclón con respecto a la playa, velocidad del viento máximo, la altura del oleaje y su período en aguas someras. Entre más acusado sea el gradiente de presiones la marea de tormenta puede ser más significativa.

Con información del campo de presiones, viento, dirección y velocidad de desplazamiento es posible, pronosticar la magnitud y zonas susceptibles a la marea de tormenta utilizando otro modelo numérico, para efecto del lo anterior se generan mallas tanto de velocidad de desplazamiento como de su dirección.

La figura 4.5 ilustra como el ciclón Paulina, al pasar sobre la ciudad de Acapulco, Guerrero, lo hizo con una velocidad de 24 km/h, lo cual puede resultar para estudios de tipo hidrológico y de predicción de lluviosidad.

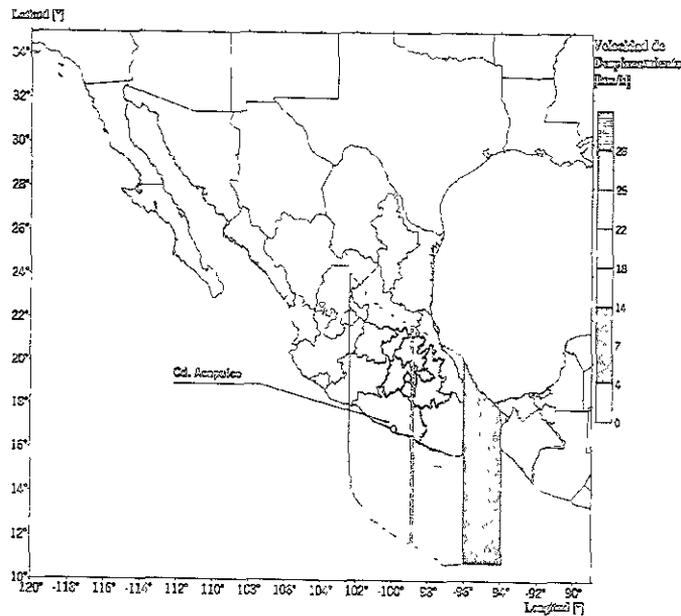


Figura 4.5. Velocidad de desplazamiento del ciclón Paulina en 1977.

Otro parámetro de gran importancia para el diseño de estructuras tanto costeras como mar adentro, es el período relativo al oleaje significativo. La figura 4.6 presenta el período relativo al oleaje significativo máximo generado por el ciclón Nora, frente a las costas de Pie de la Cuesta, Guerrero, el oleaje generado por este ciclón provocó una fuerte erosión costera en esa zona, lo cual provocó el colapso de varias estructuras.

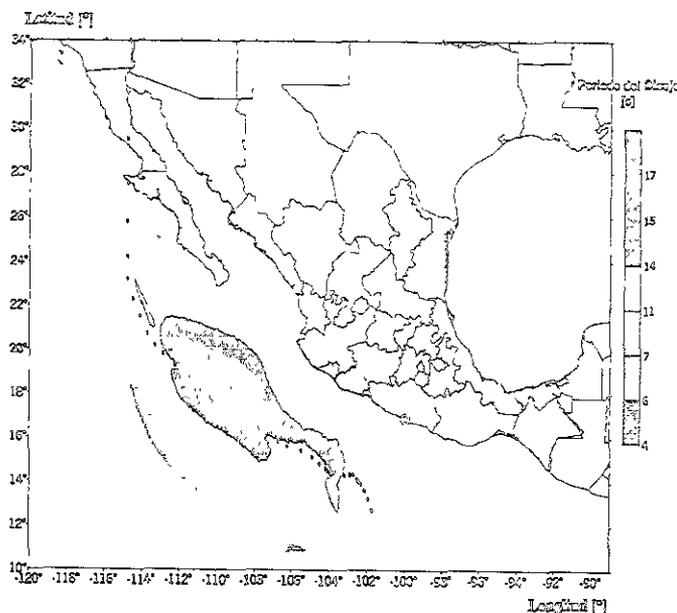


Figura 4.6. Período del oleaje significativo generado por el ciclón Nora en 1997.

4.3 Descripción del Sistema de Información Geográfica (SIG).

Un sistema de información geográfica, consiste en la integración de una base de datos georreferida con una de cartografía digital, la cual puede estar conformada por diferentes “capas”, con información de diferentes tipos, como carreteras, curvas topográficas, hidromorfología, batimetría, etc.

La base de datos contiene información general como número de habitantes por municipio, número de casas por tipo de construcción, número de hospitales en la zona, índices socio-económicos, etc. Con la capacidad por ejemplo de almacenar información particular como número telefónico de la presidencia municipal, o datos estratégicos como los de como plataformas petroleras, plantas termoeléctricas, etc.

La flexibilidad de un SIG, al permitir la introducción de nuevas capas, le proporciona un enorme potencial como herramienta para evaluar extensas zonas susceptibles a daños ocasionados por fenómenos naturales como los ciclones tropicales. Al disponer de la información de esta forma, resulta posible crear mapas de con objetos de riesgo, planear rutas de evacuación así mismo con el análisis de eventos históricos se pueden emitir criterios de diseño en zonas de riesgo.

El sistema que en este trabajo se presenta, tiene la capacidad de interactuar con un sistema de información geográfica, el cual se basa en información de todos los estados costeros y cuenta con información del nombre y número de habitantes por población en cada municipio, además de topográfica y batimétrica a escala 1:50,000.

El modelo permite realizar análisis para una o varias posiciones. A continuación para ejemplificar lo anterior se muestran los resultados de la simulación de las condiciones generadas por el ciclón Gilberto en 1988, frente a las costas de Cancún así como su interacción con el Sistema de Información Geográfica.

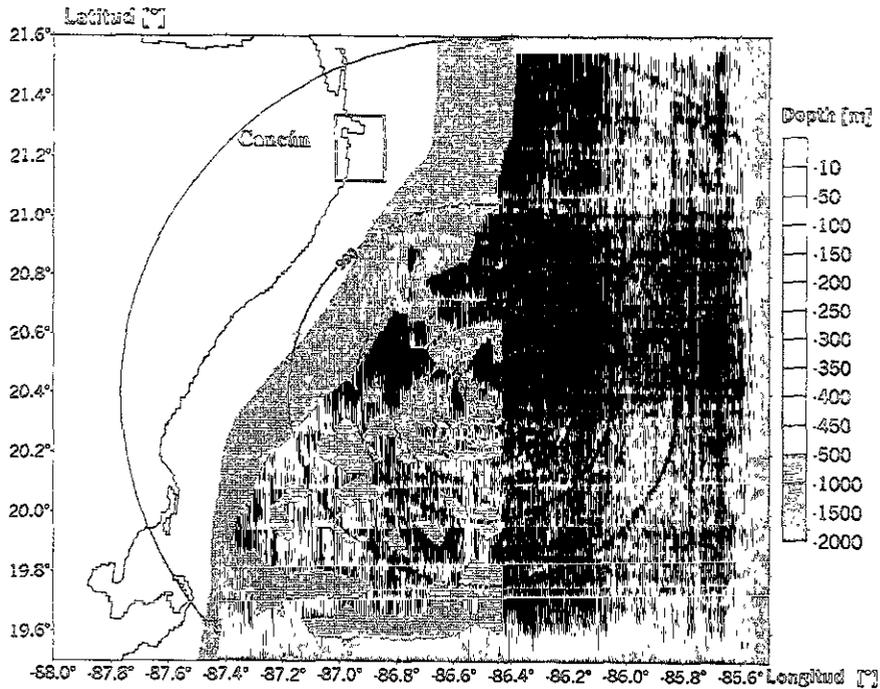


Figura 4.7. Campo de presiones generadas por el ciclón Gilberto frente a las costas de Quintana Roo.

Como se puede apreciar en la figura 4.7, el modelo no considera deformación por efecto de la dirección y velocidad de desplazamiento en el campo de presiones. Este efecto sí se considera en el campo de viento ciclostrofico y consecuentemente en el de oleaje y período en aguas profundas.

En la figura 4.8 se aprecia el campo de vientos sobre la ciudad de Cancún, donde se observa la isotaca de 180 km/h. Esta información es útil para restricciones en el diseño, así como para planes de contingencia, evacuación y alertamiento.

En la figura 4.9 se muestra el campo de altura de ola significativa máxima, generado por el ciclón Gilberto frente a las costas del Estado de Quintana Roo. Como se puede observar, el oleaje frente a las costas de Cancún, alcanza los 19.0 m, con este dato se puede alimentar un modelo de propagación de oleaje que calcule las características de éste en aguas someras.

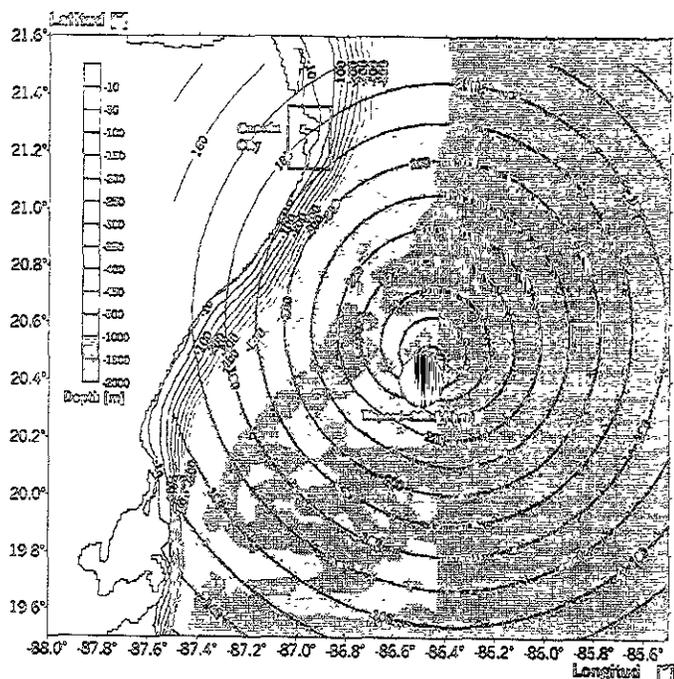


Figura 4.8. Campo de vientos ciclónicos generados por el ciclón Gilberto frente a las costas de Quintana Roo.

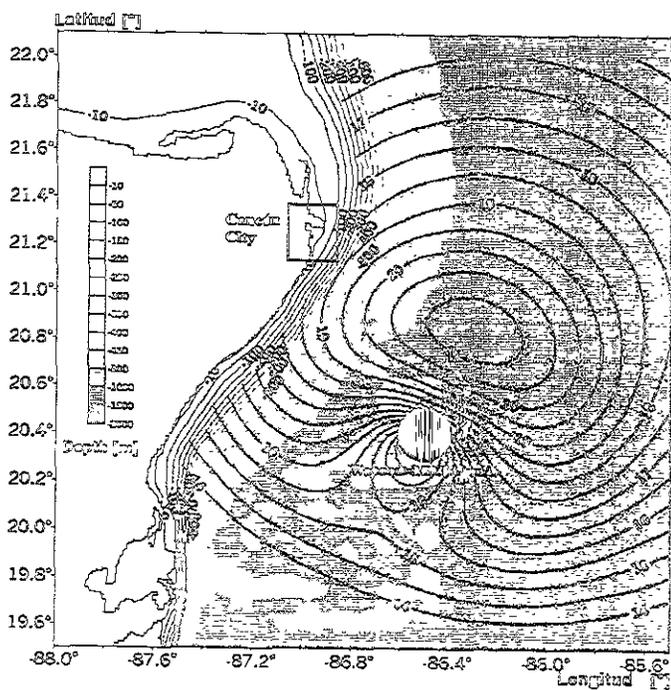


Figura 4.9. Campo de oleaje en aguas profundas generado por el ciclón Gilberto frente a las costas del Estado de Quintana Roo.

La figura 4.10 presenta los resultados de la consulta a la base de datos con el nombre de las poblaciones afectables, el nivel y tipo de riesgo al cual se puede ver sometido.

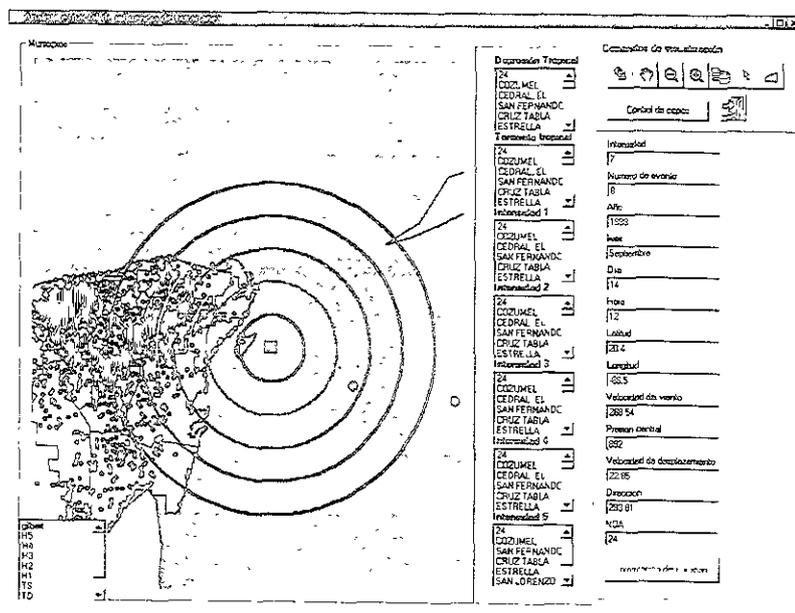


Figura 4.10. Resultado de la consulta al SIG, donde se presenta el nombre de la población y el nivel del riesgo al que son vulnerables.

4.4 Conclusiones del Capítulo IV

- El modelo numérico resulta una herramienta muy útil en la evaluación de riesgos océano-meteorológicos, como para obtener parámetros de diseño.
- La estructura modular del sistema permite agregar nuevos modelos para evaluar nuevos parámetros como marea de tormenta, inundación en planicies, etc.
- En combinación con el Sistema de Información Geográfica, el modelo numérico resulta una herramienta muy útil en el análisis de objetos de riesgo, la prevención y planeación de escenarios, generados por ciclones tropicales.

5 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

Una vez generadas las mallas de todos los ciclones que han tenido influencia en la región seleccionada, el sistema compara los valores para obtener mapas con: los valores extremos, total de eventos registrados en cada celda, promedios, etc.

A continuación se presentarán una serie de 23 imágenes, resultado del análisis histórico de la base de datos en ambos océanos.

5.1 Vertiente del Atlántico

Los mapas que a continuación se presentan consideran básicamente dos condiciones, los valores extremos registrados en cada celda de la malla para cada uno de los parámetros analizados y su promedio. Los mapas con valores extremos resultan útiles en la delimitación de zonas vulnerables a los diferentes parámetros.

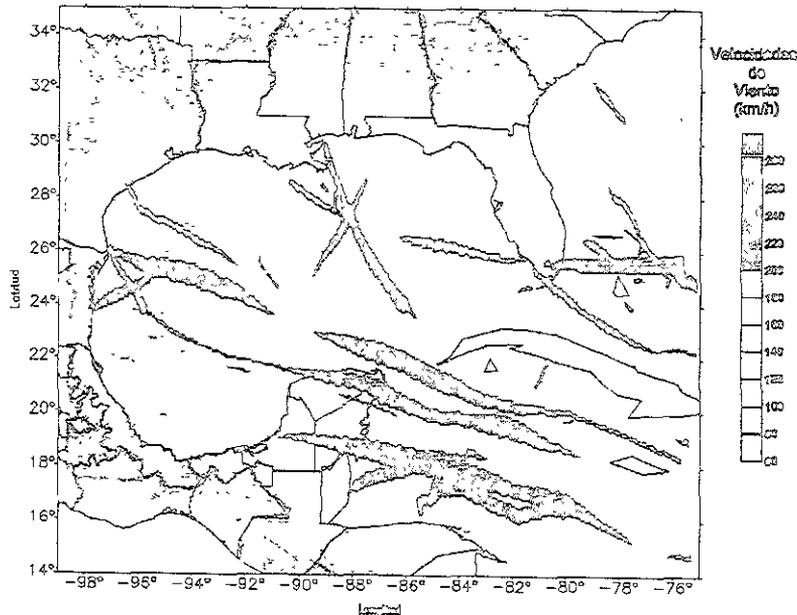


Figura 5.1. Mapa de velocidades de viento máximo generado por ciclones tropicales en la vertiente del Atlántico.

De la figura 5.1, se puede concluir que las regiones en la vertiente Atlántica más vulnerables a daños por viento ciclónico son los estados de Yucatán, Quintana Roo, Campeche y Tamaulipas, con velocidades mayores de 220 km/h, además en el interior del Golfo de México se presentan regiones de viento muy intenso (180 km/h), como se puede observar en la sonda de Campeche.

Estos datos son útiles para la orientación de las plataformas y complejos petroleros considerando la dirección más adversa de los vientos. Como se puede deducir, la condición más adversa en esta región es generada por ciclones que se desplazan en dirección oeste -

noroeste y que cruzan la península de Yucatán (generados principalmente entre agosto y octubre como se observo en el capítulo 3).

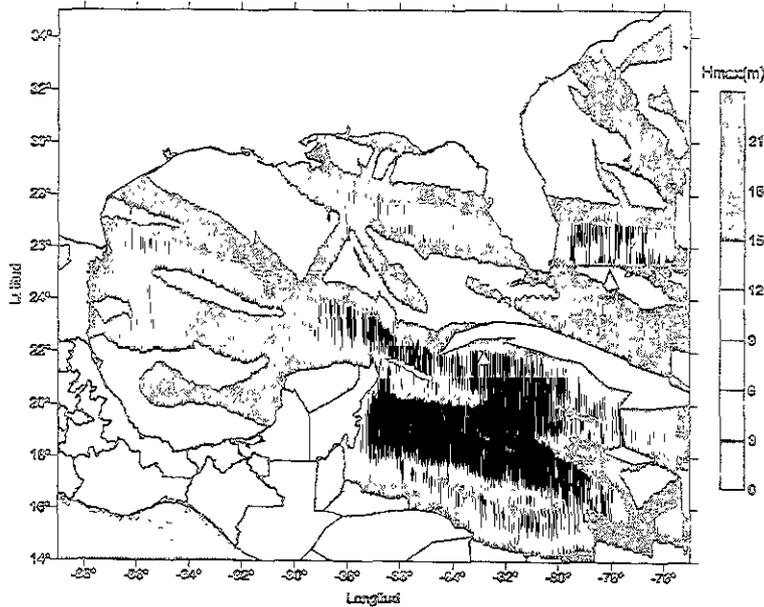


Figura 5.2. Mapa de alturas de ola máximas generadas por ciclones tropicales en la vertiente del Atlántico.

En la figura 5.2, se puede apreciar que la zona con las alturas de ola máximas históricas se registran frente a las costas de Quintana Roo y Yucatán. En el estudio se puede notar que a pesar de la alta incidencia de fenómenos en la Península de Florida, no es la región con la altura de ola máxima histórica.

Es importante mencionar que el mapa de oleaje máximo representa las zonas donde estas alturas de ola significativa se pudieron generar, pero debido a que el oleaje se desplaza, en zonas cercanas y de la misma profundidad se registran amplitudes similares. Con los datos de dirección, período y altura de ola significativa es posible conocer las condiciones del oleaje en aguas someras, si se conoce la batimetría y utilizando un programa que considere la refracción – difracción (uno de los módulos que es posible adaptarle al sistema).

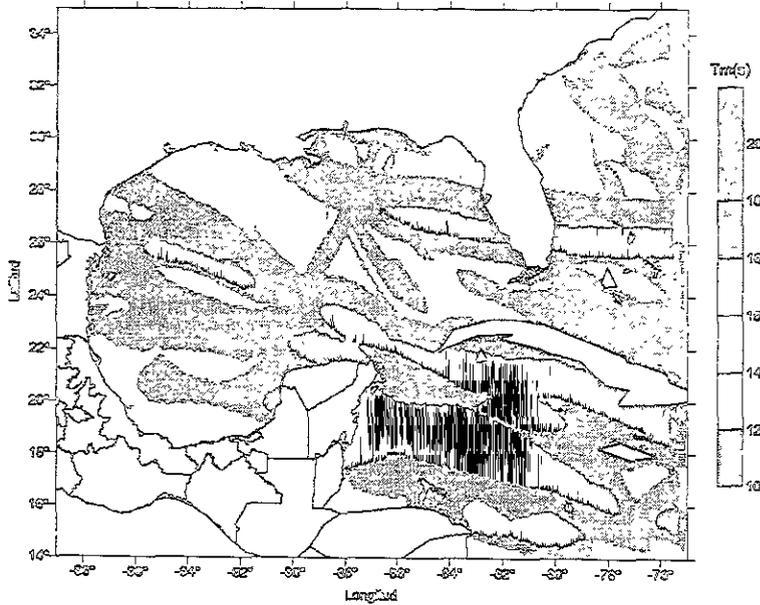


Figura 5.3. Mapa de períodos de ola máximos generados por ciclones tropicales en la vertiente del Atlántico.

La figura 5.3 muestra el período de oleaje significativo, frente a las costas de Quintana Roo con un rango que oscila entre los 20 y los 18 segundos, frente a las costas de Yucatán de 16 segundos, Campeche con un rango que oscila entre los 18 segundos en el norte y 12 segundos en el sur. Los estados de Tabasco y Veracruz presentan un período entre los 12 y los 15 segundos, finalmente el estado de Tamaulipas presenta un rango de los 16 a los 18 segundos.

El período es un parámetro importante en el diseño de obras marítima y de ingeniería de costas en general. Por ejemplo una onda de período mayor es más destructiva que una de igual altura pero de período menor.

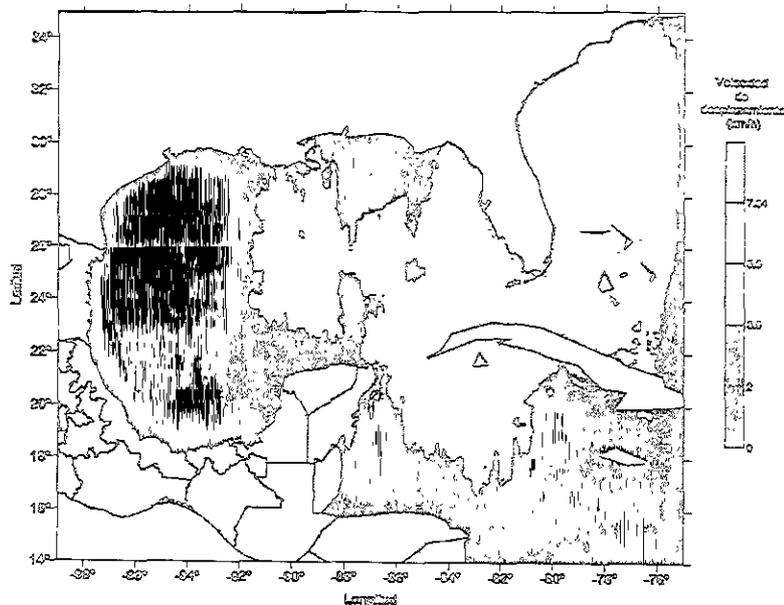


Figura 5.4. Mapa de velocidades de desplazamiento promedio para ciclones tropicales en la vertiente del Atlántico.

En la figura 5.4, se puede apreciar que en promedio los ciclones tienden a desplazarse con mayor velocidad en la zona frente a Florida, y más despacio en las costas de los estados de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco y Campeche, lo cual debe considerarse en estas zonas para análisis de vulnerabilidad por marea de tormenta, considerando que a menor velocidad de desplazamiento la marea de tormenta se incrementa.

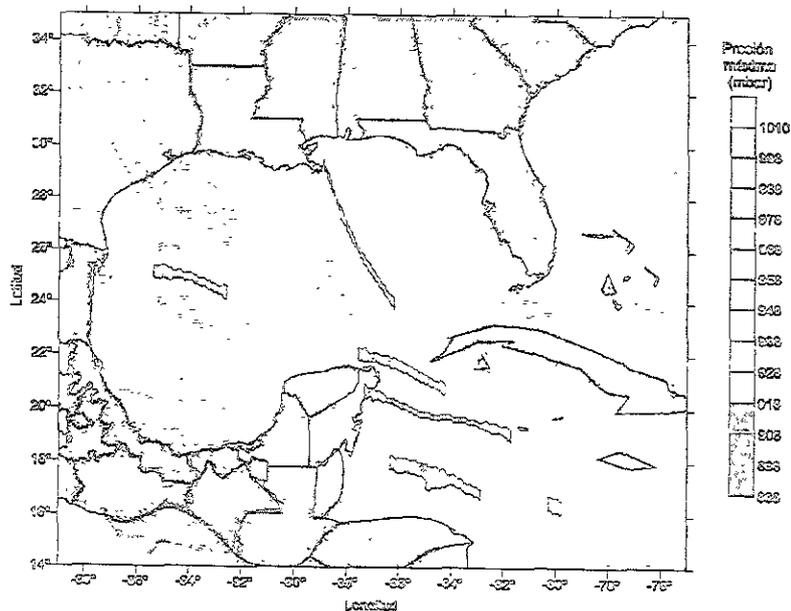


Figura 5.5. Mapa de presiones mínimas generadas por ciclones tropicales en la vertiente del Atlántico.

La figura 5.5, muestra el mapa de presiones mínimas históricas, muestra 4 zonas con una mayor persistencia a ciclones con grandes disminuciones de presión, estas regiones son el Mar Caribe, la región frente a las costas de Tamaulipas y al sur del estado de Louisiana.

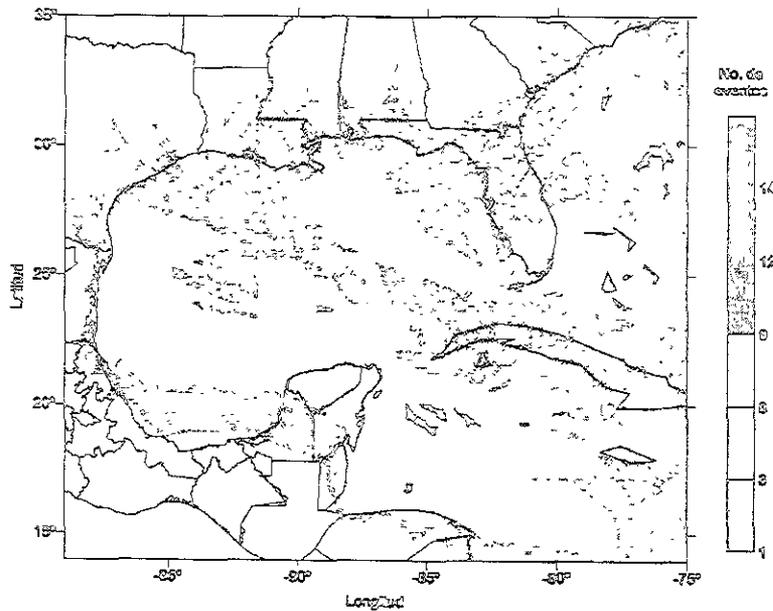


Figura 5.6. Mapa con el número de eventos por celda con intensidad mayor o igual que huracanes clase 1.

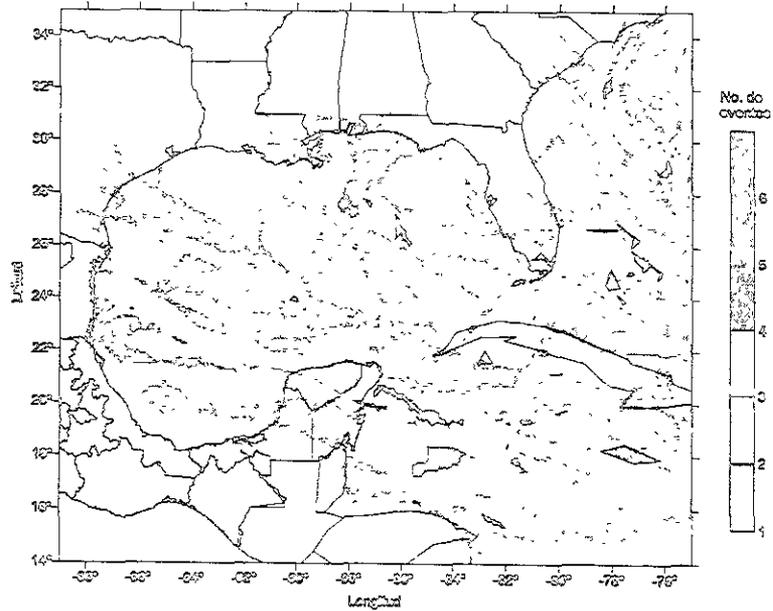


Figura 5.7. Mapa con el número de eventos por celda con intensidad mayor o igual que huracanes clase 2.

La figura 5.6, muestra los sitios con mayor incidencia de ciclones con intensidad igual o mayor a huracanes clase 1, mostrando 3 principales zonas de alta persistencia, frente a las costas de florida, al norte del Honduras y frente a las costas de Quintana Roo, donde han tenido ocurrencia hasta 14 eventos de esta intensidad en los últimos 50 años.

De la figura 5.7, es posible deducir que la probabilidad de ocurrencia de un ciclón con intensidad mayor o igual a huracán clase 2 es de 12.0%, de igual modo frente a las costas de Veracruz y Campeche la probabilidad es un moderado 2.0%, pero en las costas de Tamaulipas la probabilidad se incrementa nuevamente hasta un 12.0%.

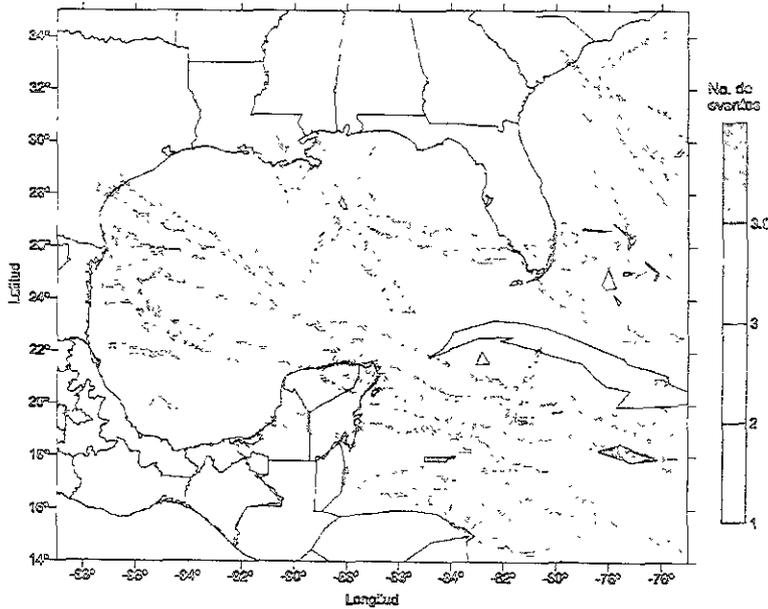


Figura 5.8. Mapa con el número de eventos por celda con intensidad mayor o igual que huracanes clase 3.

En la figura 5.8 se aprecia que frente a las costas de Quintana Roo, se tiene una probabilidad de ocurrencia de fenómenos con intensidad igual o mayor a huracanes clase 3 de 8.0 % anual, frente a las costas de Tamaulipas una probabilidad del 4.0% y en los demás estados la probabilidad es realmente muy baja (2.0%)

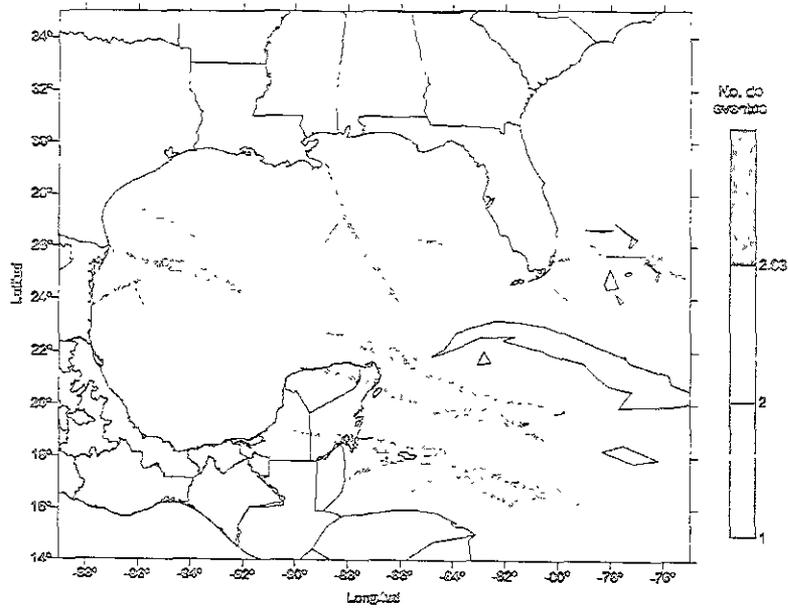


Figura 5.9. Mapa con el número de eventos por celda con intensidad mayor o igual que huracanes clase 4.

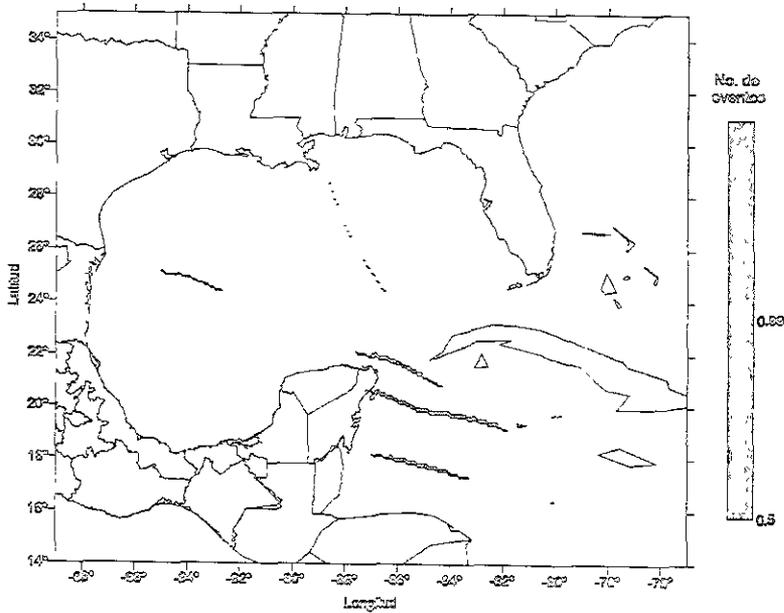


Figura 5.10. Mapa con el número de eventos por celda con intensidad mayor o igual que huracanes clase 5.

Las figuras 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10 muestran la persistencia de los fenómenos en función de su intensidad, siendo evidente la alta incidencia de fenómenos extremos (clase 4 o más), frente a las costas de Quintana Roo y Tamaulipas, de ahí la importancia de considerar esta clase de fenómenos en el diseño de puertos, marinas y estructuras cerca de la costa en estas regiones.

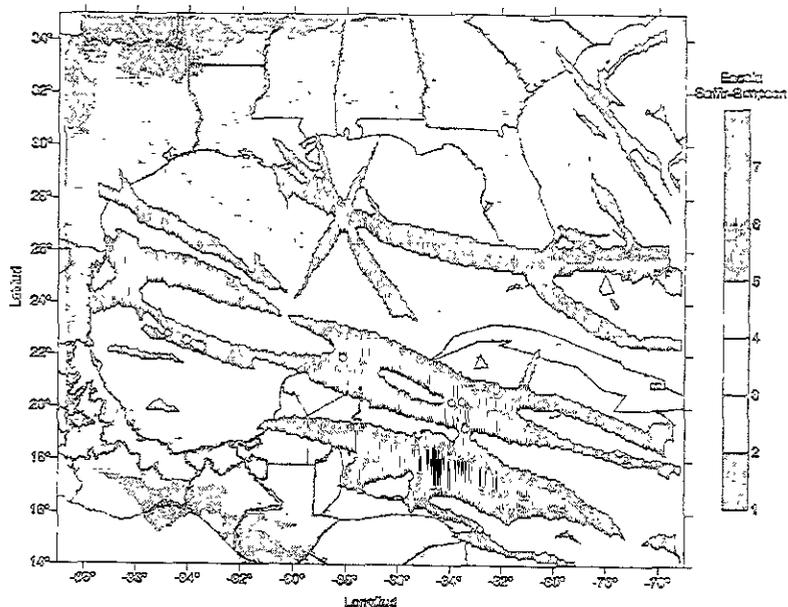


Figura 5.11. Mapa con intensidades máximas registradas en todo el período de registro.

La utilidad de mapas como el de la figura 4.11, es para el caso de no disponer de modelos o datos, utilizando la escala de posibles daños de Saffir – Simpson, emitir un criterio de la magnitud de los posibles daños debidos a ciclones tropicales en una región.

5.2 Vertiente del Pacífico

Lo primero que se representa es la velocidad del viento máxima registrada en todo el período de registro, con la intención de detectar zonas de mayor vulnerabilidad histórica, a efectos de vientos intensos.

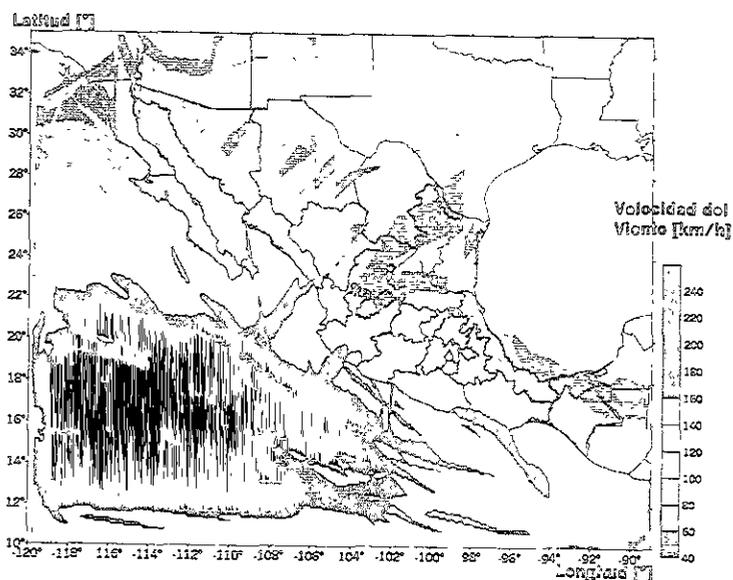


Figura 5.12. Mapa de velocidades de viento máximo generado por ciclones tropicales en la vertiente del Pacífico.

Utilizando mapas como el de la figura 5.12 es posible determinar rápidamente los estados donde históricamente han tenido ocurrencia fenómenos de gran intensidad, como el Paulina en los Estado de Oaxaca y Guerrero, donde el modelo muestra una velocidad del viento de hasta 220 km/h. Otros estados donde se deben considerar grandes velocidades de viento son Michoacan, Colima, al sur de la Península de California y el Estado de Sinaloa.

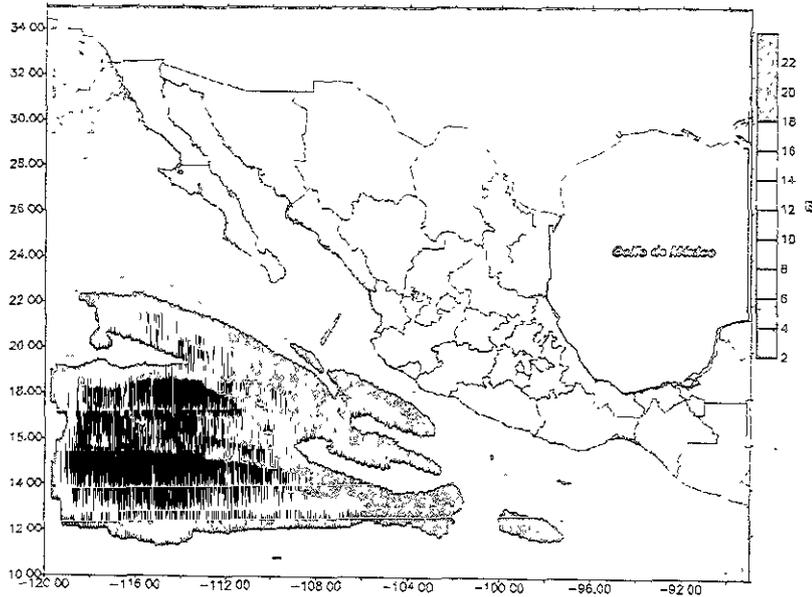


Figura 5.13. Mapa de alturas de ola máximas generadas por ciclones tropicales en la vertiente del Pacífico.

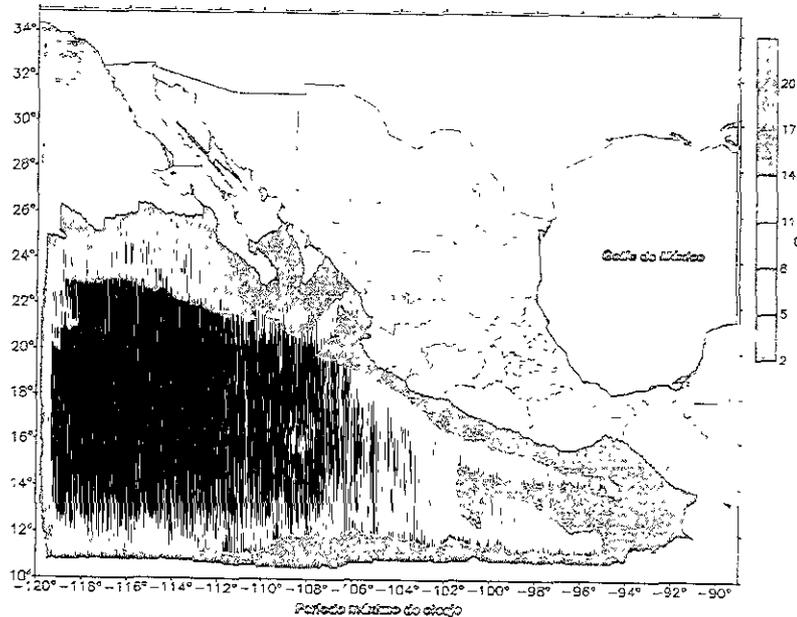


Figura 5.14. Mapa de períodos de ola máximos generados por ciclones tropicales en la vertiente del Pacífico.

De la figura 5.13 se deduce que los estados con mayor altura de ola generada frente a sus costas por un ciclón cercano, son Colima, Sur de Jalisco, Michoacán y norte de Guerrero con alturas de ola generada en mar profundo de hasta 20 m. También el estado de Oaxaca presenta zonas frente a sus costas con alturas de ola extrema, generadas por ciclones tropicales.

La figura 5.14 reafirma lo visto en la de alturas de ola máxima, en promedio en aguas profundas el Pacífico presentan condiciones de oleaje generado por ciclones, más adversas que en el Atlántico, con un máximo de 20 segundos y un promedio de 14.

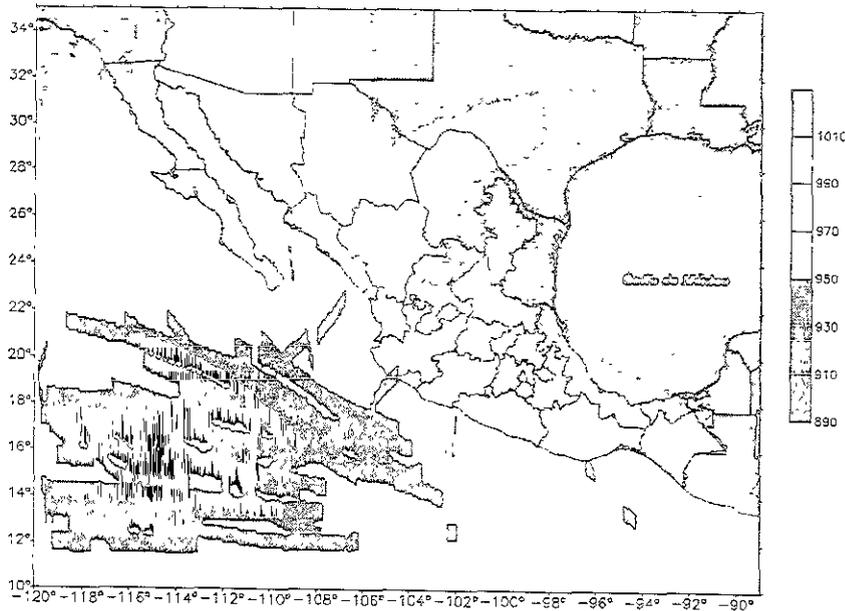


Figura 5.15. Mapa de presiones mínimas generadas por ciclones tropicales en la vertiente del Pacífico.

El mapa de la figura 5.15, muestra como en el lado del Pacífico a pesar de que en número, se generan más eventos que en el Atlántico, estos rara vez registran intensidades de huracán clase 5 y la incidencia de estos sobre territorio nacional es igualmente muy baja como se puede observar en la figura 5.16.

Otro punto que se observa de la figura 5.15, es que la zona donde ocurren las mayores depresiones es en una región mar adentro frente a las costas, esto debe considerarse para la navegación.

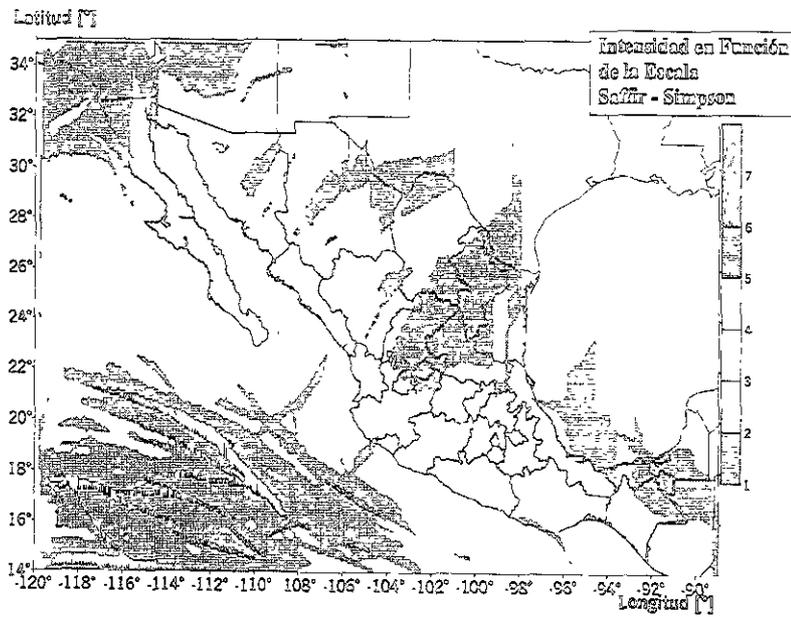


Figura 5.16. Mapa de Intensidades máximas generadas por ciclones tropicales en la vertiente del Pacífico.

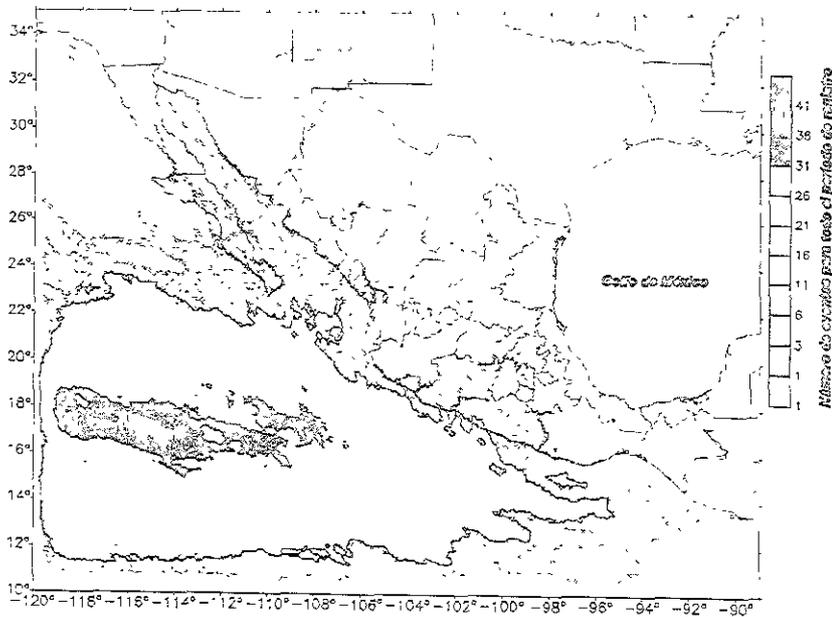


Figura 5.17. Mapa con el número de eventos por célula con intensidad mayor o igual que huracanes clase 1 en el Océano Pacífico.

De la figura 5.17 se observa como frente a las costas del estado de Guerrero, Michoacán y Colima, han tenido ocurrencia hasta 6 eventos con intensidad mayor o igual a huracanes clase 1.

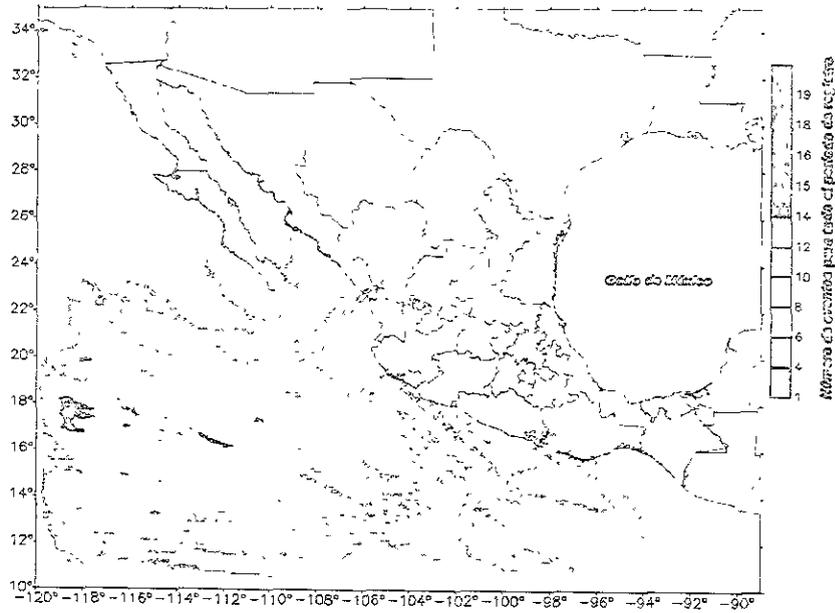


Figura 5.18. Mapa con el número de eventos por celda con intensidad mayor o igual que huracanes clase 2 en el Océano Pacífico.

La figura 5.18 muestra los sitios donde se han registrado eventos con intensidad igual o mayor a huracanes clase 2. Como se puede observar, las zonas afectadas con esta persistencia son Oaxaca, Guerrero, Colima, Michoacán y Baja California Sur.

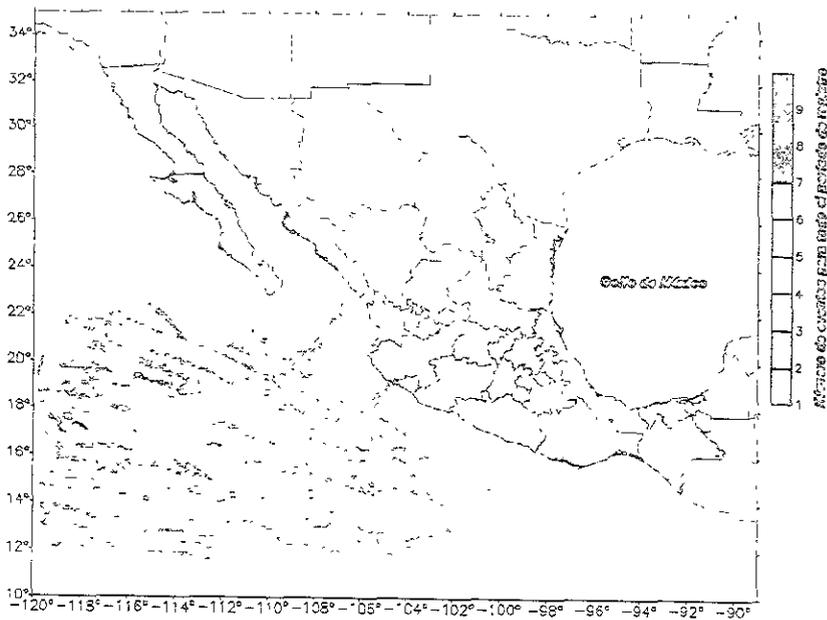


Figura 5.19. Mapa con el número de eventos por celda con intensidad mayor o igual que huracanes clase 3 en el Océano Pacífico.



INSTITUTO MEXICANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS

Figura 5.20. Mapa con el número de eventos por celda con intensidad mayor o igual que huracanes clase 4 en el Océano Pacífico.



Figura 5.21. Mapa con el número de eventos por celda con intensidad de huracanes clase 5 en el Océano Pacífico.

Las figuras 5.19, 5.20 y 5.21 presentan la baja ocurrencia de fenómenos muy intensos en la vertiente del Pacífico.

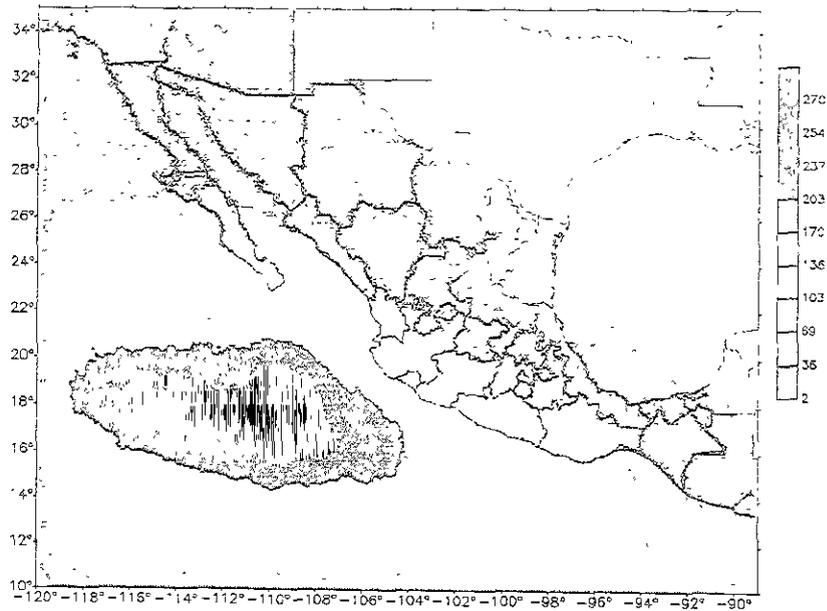


Figura 5.22. Mapa con el número de eventos registrados en cada celda, sin importar la intensidad del evento.

Este mapa de la figura 5.22, muestra la alta persistencia de eventos en las costas del Pacífico, como se puede observar de las figuras anteriores, en general son eventos de baja intensidad. La región comprendida por los estados de Oaxaca, Guerrero, Michoacán, Colima y Jalisco, presentan 103 eventos y un máximo de 136, por lo cual se tiene una probabilidad de verse afectados por un mínimo de 2 eventos y 2.7 respectivamente por año.

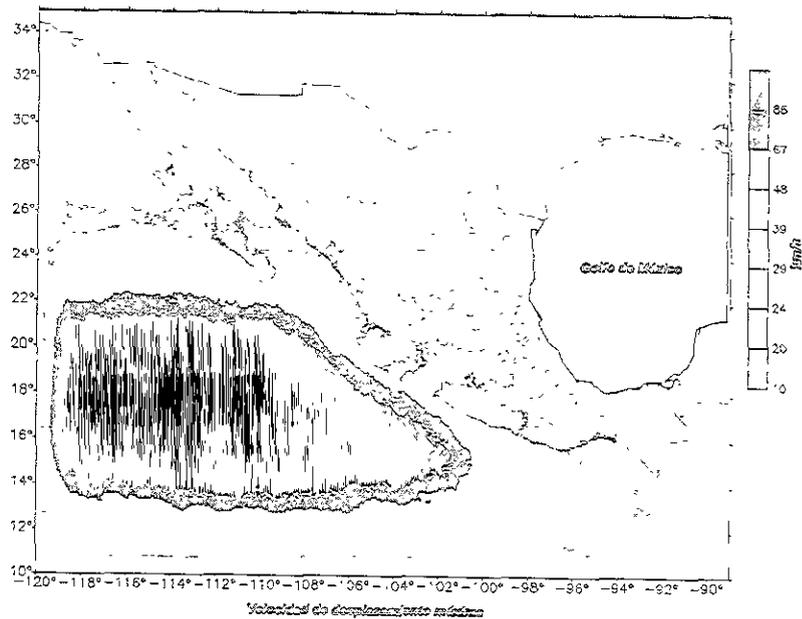


Figura 5.23. Mapa de velocidades de desplazamiento máximas registradas en la vertiente del Océano Pacífico.

La figura 5.23 presenta la tendencia de los ciclones tropicales de mantener una velocidad de desplazamiento del orden de los 10 km/h al desplazarse por las costas del Pacífico Mexicano. Este fenómeno se debe probablemente a la pronunciada topografía de la región.

Conclusiones del Capítulo V

- Analizando las figuras 5.2 y 5.13 las cuales representan alturas de olas significativas máximas históricas en ambos océanos, puede concluirse que frente a la costa sur y central del Pacífico, son mayores que en la vertiente Atlántica.
- La vulnerabilidad por velocidades de vientos máximos son mayores definitivamente en los estados costeros del Atlántico, máxime si consideramos la baja pendiente topográfica que en general se presenta en esa región.
- Como resultado del análisis por persistencia (número de eventos registrados en un punto) y la intensidad máxima registrada, es posible emitir criterios y restricciones en toda la franja costera del país, de una manera rápida y confiable.

6 CONCLUSIONES

- El sistema presenta grandes ventajas, especialmente en el manejo de las diferentes situaciones de vulnerabilidad.
- El sistema permite realizar análisis de riesgo más confiables que los existentes actualmente.
- Los parámetros de diseño resultado del análisis histórico, representan una herramienta confiable especialmente en sitios donde se carece de información de campo, como en la sonda de campeche.
- El sistema puede ser utilizado para realizar análisis de lluvias generadas por ciclones tropicales, e inundaciones en zonas de planicie

7 FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

- ✓ La información generada por el análisis histórico puede ser utilizada para el pronóstico de las trayectorias de los ciclones.
- ✓ Toda la información anterior se puede introducir en un SIG, para generar consultas específicas de vulnerabilidad y parámetros de diseño, para cualquier población en los estados costeros de la República Mexicana.
- ✓ Una de las consideraciones a futuro es agregar un módulo de pronóstico y evaluación de zonas dañadas por marea de tormenta, así como la refracción y difracción del oleaje para conocer sus características en aguas someras en sitios de batimetría conocida (puertos, ciudades costeras, etc.)

BIBLIOGRAFÍA

1. Bretschneider, C. 1990. Tropical cyclones. Gulf Publishing. Handbook on Ocean Engineering, Chapter 6.
2. Lorente, J.M. 1966. Meteorology. Edit Labor S.A. de C.V., México, pp. 325
3. Massel, S.R., 1996. Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction. Advanced Series on Coastal Engineering- Vol. 11. World Scientific Publishing Co., N.J. 07661 USA, pp. 222-252.
4. Shore Protection Manual (SPM), 1984. Coastal Engineering Research Center.
5. Young, I.R. 1988. Parametric hurricane wave prediction model. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, V. 114 n 5.
6. Wiegel, R.L., 1964. Oceanographical Engineering. Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J. Fluid Mechanics Series, Richard Skalak Editor., pp. 238-249.
7. William, L.D. 1978. Meteorology. Edit Limusa S.A. de C.V., México, pp. 412
8. Liu C. and Chouinard L.E. 1997. Model for recurrence rate of hurricanes in Gulf of Mexico. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, V. 123 n 3.
9. Liu C. et al. 1997. Model for severity of hurricanes in Gulf of Mexico. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, V. 123 n 3.
10. Silva R. et al. 1998. Comparison of 4 wave prediction models. 5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting. Melbourne Fl. Pp. 134-145.
11. Silva R. et al. 2000. Development of an M.I.S. for the prevention of hurricane damage on the Mexican Coast. Management Information Systems 2000. GIS and Remote Sensing. WIT press. UK. Pp. 471-480.
12. Van Gelder, P.H.A.J.M. 1999. Statistical Methods for the Risk-Based Design of Civil Structures. T.U. Delft. Ne.
13. Bautista G.G., 2000, Análisis de mareas de tormenta con viento y presión variable. DEPTI, UNAM. México.