



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Facultad de Ingeniería

01162
6

**ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD POR PRESENCIA DE
HURACANES EN EL LITORAL DE LA
PENINSULA DE YUCATAN**

PRESENTA

GABRIEL DÍAZ HERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. RODOLFO SILVA CASARÍN

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)

9511

CIUDAD UNIVERSITARIA



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.

RESUMEN

En este trabajo de investigación se ha desarrollado un modelo integral que permite determinar la vulnerabilidad de zonas costeras bajo la influencia de ciclones tropicales y como caso particular se ha aplicado a la península de Yucatán. Basados en un análisis histórico – estadístico de los eventos presentados en esta región, entre 1949-2000, se han obtenido los parámetros físicos más relevantes que se generan por la acción de los huracanes, como son: altura de ola local y máxima alcanzada durante cierto evento y su periodo de ola asociado, velocidad local del viento y, campo de presiones entre las latitudes 17° y 25° Norte y longitudes 85° y 92° Oeste, y su posible repercusión a las poblaciones ubicadas en la península de Yucatán.

Para el estudio integral de vulnerabilidad asociada a la probabilidad de presentación de huracanes se ha hecho necesaria la utilización de cuatro modelos deterministas:

- Modelo de Presión, Bretchneider (1990).
- Modelo de Viento, Holland (1980).
- Modelo de altura de ola y periodo asociado, Bretschneider (1990).
- Modelo de análisis espacial de posibles daños y zonas de influencia por medio del cruce de capas geográficas de información.

Con base en una serie de mediciones en el Golfo de México, estos modelos han sido ligeramente modificados y se han obtenido nuevas relaciones para evaluar el radio ciclotrónico y las funciones de decaimiento del oleaje y viento. Los resultados obtenidos muestran un mejor acuerdo con las mediciones que los que se obtienen con la metodología de Silva et al (2000), Contreras (2000), Holland (1990) y Bretchneider (1990).

Finalmente, se establecen los criterios para evaluar la vulnerabilidad de zonas costeras bajo la influencia de huracanes y como ejemplo se presentan los resultados obtenidos de esta metodología aplicado a la zona de estudio.

ÍNDICE

<i>Resumen</i>	3
<i>Índice</i>	4
<i>Lista de símbolos</i>	6
<i>Lista de tablas</i>	7
<i>Lista de figuras</i>	8
<i>Objetivos y metodología</i>	11
<i>Capítulo 1. Introducción</i>	13
I INTRODUCCIÓN	14
I.1 Definición de huracán como fenómeno meteorológico	14
I.1.1 Desarrollo del huracán.....	15
I.1.2 Depresión tropical.....	15
I.1.3 Tormenta tropical y huracán.....	15
I.1.4 Decaimiento o disipación del huracán.....	16
I.2 La presencia de huracanes en México	16
<i>Capítulo 2. Descripción de los modelos numéricos y calibración</i>	22
II Descripción de los modelos numéricos y calibración	23
II.1 Introducción	23
II.2 Descripción de los modelos de presión	23
II.3 Descripción del modelo de viento	25
II.4 Descripción del modelo de oleaje	29
II.5 Calibración del modelo de presión	33
II.5.1 Características de las Boyas oceanográficas	33
II.5.2 Determinación del radio ciclostrofico	36
II.5.3 Verificación de los modelos de presión.....	39
<i>Capítulo 3. Análisis de Vulnerabilidad por Presencia de huracanes</i>	44
III Análisis de Vulnerabilidad por La presencia de huracanes	45
III.1 Introducción	45
III.2 Panorama general del fenómeno	45
III.3 Antecedentes de vulnerabilidad por presencia de huracanes	46
III.4 Factores físicos de riesgo de los huracanes	47
III.4.1 Vientos ciclónicos	47

III.4.2	Lluvias e inundaciones	48
III.4.3	Marea de tormenta	48
III.4.4	Ocurrencia histórica e impacto de los huracanes en México.....	49
III.5	Manejo vulnerabilidad por presencia de huracanes	50
III.5.1	Análisis histórico de huracanes	51
III.5.2	Cruce de información cartográfica con las zonas de vulnerabilidad	58
Capítulo 4. Análisis de vulnerabilidad aplicado a la península de Yucatán.....		59
IV	Análisis de vulnerabilidad aplicado a la península de Yucatán.....	60
IV.1	Introducción	60
IV.2	Estudio histórico de presencia de huracanes en la península.....	61
IV.3	Análisis estadístico de ocurrencia de eventos históricos	64
IV.4	Análisis geográfico para la determinación de zonas de vulnerabilidad	69
IV.5	Análisis extremal de presión oleaje y viento.	78
IV.6	Sistema para la alerta temprana por presencia de huracanes	80
V	Conclusiones.....	83
VI	Futuras líneas de trabajo	85
VII	Referencias bibliográficas.....	86
Anexo I	88

LISTA DE SÍMBOLOS

P_0	Presión en el centro del huracán [mb]
P_r	Presión a una distancia radial r desde el centro [mb]
P_∞	Presión a primera isobara cerrada [mb]
R_C	Radio del máximo viento ciclostrófico [km]
r	Radio a cualquier distancia del centro [km]
N_C	Número de Rankin-Vortex
V_{cR}	Velocidad máxima del viento ciclostrófico [km/h]
A	Constante de Holland
B	Constante de Holland
a	Constante de Holland
b	Constante de Holland
ρ_a	Densidad del aire
$r \frac{dp}{dr}$	Máximo gradiente de presiones.
f	Coefficiente de Coriolis
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 la primera isobara cerrada [mb]
dp/dr	Gradiente de presiones.
$\Delta\Pi_X$	Gradiente de presión desde el centro del huracán a la presión normal [mb]
V_F	Velocidad de avance del ciclón [km/h]
β	Angulo entre la dirección de avance del ciclón y del viento U_r .
U_{RC}	Velocidad del viento máxima ciclostrófica [km/h]
U_{Rg}	Viento gradiente máximo [km/h]
U_R	Velocidad del viento en cualquier punto a distancia R del centro, [km/h]
$\Delta\Pi_X$	Gradiente de presión desde el centro del huracán a la presión normal [km/h]
$Hrsta$	altura de ola significativa sin considerar la velocidad de desplazamiento, [m]
H_r	Altura de ola significativa considerando la velocidad de desplazamiento, [m]
V_{10}	Campo de velocidades del viento a 10 metros sobre el nivel medio del mar [km/h]

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1.1 Escala Saffir-Simpson</i>	<i>Página</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 2.1 Valores de las constantes del número de Rankin-Vortex</i>	<i>Página</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 2.2 Valores de las constantes B_1, B_2</i>	<i>Página</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 2.3 Valores de las constantes Y_1, Y_2 para el modelo de viento</i>	<i>Página</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 2.4 Valores de las constantes B_1, B_2</i>	<i>Página</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 2.5 Valores de las constantes Y_1, Y_2 para el modelo de oleaje.</i>	<i>Página</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 2.6 Constantes teóricas C1 y C2</i>	<i>Página</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 2.7 Boyas utilizadas para la calibración</i>	<i>Página</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 2.8 Rangos de presión central contra radio ciclostrofico</i>	<i>Página</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 3.1 Daños sociales y económicos de la presencia de los huracanes en costas Mexicanas.</i>	<i>Página</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 4.1 Nombre y año de los huracanes que se han acercado a la península de Yucatán</i>	<i>Página</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 4.2 Número y probabilidad de ocurrencia de los eventos para el primer cuadrante.</i>	<i>Página</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 4.3 Número y probabilidad de ocurrencia de los eventos para el segundo cuadrante.</i>	<i>Página</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 4.4 Número y probabilidad de ocurrencia de los eventos para el tercer cuadrante.</i>	<i>Página</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 4.5 Número y probabilidad de ocurrencia de los eventos para el cuarto cuadrante.</i>	<i>Página</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 4.6 Resultados del análisis de vulnerabilidad para la zona 1.</i>	<i>Página</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 4.7 Resultados del análisis de vulnerabilidad para la zona 2.</i>	<i>Página</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 4.8 Resultados del análisis de vulnerabilidad para la zona 3.</i>	<i>Página</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 4.9 Relación de intensidades con radios de afectación</i>	<i>Página</i>	<i>78</i>

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 Trayectorias históricas de ocurrencia de huracanes en las costas mexicanas</i>	Página 13
<i>Figura 1.2 Número de eventos que se aproximaron a las costas del Pacífico Mexicano, 1949-1999</i>	Página 16
<i>Figura 1.3 Número de avisos que tocaron tierra en el Pacífico y su tiempo de duración</i>	Página 16
<i>Figura 1.4 Número de eventos que se aproximaron a las costas del Atlántico Mexicano, 1949-1999</i>	Página 17
<i>Figura 1.5 Número de avisos que tocaron tierra en el Atlántico y su tiempo de duración.</i>	Página 17
<i>Figura 1.6 Resumen de eventos presentados en el Océano Atlántico por década</i>	Página 18
<i>Figura 1.7 Resumen de eventos presentados en el Océano Pacífico por década</i>	Página 19
<i>Figura 2.1 Relación de los factores para el cálculo del viento ciclónico.</i>	Página 21
<i>Figura 2.2 Relación de los factores para el cálculo del oleaje.</i>	Página 30
<i>Figura 2.3 Boya de disco de 12 metros de diámetro</i>	Página 31
<i>Figura 2.4 Boya tipo NOMAD de 6 metros de longitud</i>	Página 32
<i>Figura 2.5 Localización de las boyas utilizadas para la calibración</i>	Página 33
<i>Figura 2.6 Dispersión de datos de Presión central contra radio ciclostrofico.</i>	Página 34
<i>Figura 2.7 Relación de P_o vs. R_c para todo el rango de aplicación del huracán en la vertiente del Atlántico.</i>	Página 35
<i>Figura 2.8 Relación de P_o vs. R_c para un rango menor de aplicación del huracán en la vertiente del Atlántico</i>	Página 35
<i>Figura 2.9 Relación de P_o vs. R_c del huracán en la vertiente del Océano Pacífico.</i>	Página 36
<i>Figura 2.10 Trayectorias de los seis huracanes de calibración del modelo de presiones.</i>	Página 37
<i>Figura 2.11 Perfil de presiones con respecto al tiempo para el huracán Gilbert (1988)</i>	Página 38
<i>Figura 2.12 Perfil de presiones con respecto al tiempo para el huracán Opal (1995).</i>	Página 38
<i>Figura 2.13 Perfil de presiones con respecto al tiempo para el huracán Bertha (1996).</i>	Página 39
<i>Figura 2.14 Perfil de presiones con respecto al tiempo para el huracán Georges (1998).</i>	Página 39
<i>Figura 2.15 Perfil de presiones con respecto al tiempo para el huracán Bret (1999)</i>	Página 40
<i>Figura 2.16 Perfil de presiones con respecto al tiempo para el huracán Floyd (1999)</i>	Página 40
<i>Figura 3.1 Limite de zonas de alta vulnerabilidad por presencia de vientos ciclónicos</i>	Página 44
<i>Figura 3.2 Foto de satélite del huracán Gilberto..</i>	Página 46
<i>Figura 3.3 Mapa de presiones del huracán Pauline (1997).</i>	Página 48
<i>Figura 3.4 Mapa de presiones del huracán Gilbert (1988).</i>	Página 49
<i>Figura 3.5 Mapa de presiones del huracán Bertha (1996).</i>	Página 49
<i>Figura 3.6 Mapa de presiones del huracán Opal (1995)</i>	Página 50
<i>Figura 3.7 Mapa de alturas de oleaje generadas por el huracán Bertha (1996).</i>	Página 51
<i>Figura 3.8 Mapa de alturas de oleaje generadas por el huracán Bret (1999)</i>	Página 51
<i>Figura 3.9 Mapa de alturas de oleaje generadas por el huracán Georges (1998)</i>	Página 52
<i>Figura 3.10 Mapa de alturas de oleaje generadas por el huracán Floyd (1999).</i>	Página 52
<i>Figura 3.11 Mapa de velocidades del viento generadas por el huracán Bertha (1996).</i>	Página 53
<i>Figura 3.12 Mapa de velocidades del viento generadas por el huracán Bret (1999).</i>	Página 53
<i>Figura 3.13 Mapa de velocidades del viento generadas por el huracán Georges (1998).</i>	Página 54
<i>Figura 3.14 Mapa de velocidades del viento generadas por el huracán Opal (1995).</i>	Página 54
<i>Figura 4.1 Presión mínima histórica sobre la península de Yucatán.</i>	Página 59
<i>Figura 4.2 Altura de ola máxima histórica sobre la península de Yucatán.</i>	Página 60
<i>Figura 4.3 Intensidad de viento ciclónico máximo histórica sobre la península de Yucatán.</i>	Página 61
<i>Figura 4.4 División en cuadrantes del área de estudio.</i>	Página 62

<i>Figura 4.5 Probabilidad de ocurrencia de huracanes sobre el primer cuadrante.</i>	<i>Página</i>	63
<i>Figura 4.6 Probabilidad de ocurrencia de huracanes sobre el segundo cuadrante.</i>	<i>Página</i>	64
<i>Figura 4.7 Probabilidad de ocurrencia de huracanes sobre el tercer cuadrante</i>	<i>Página</i>	65
<i>Figura 4.8 Probabilidad de ocurrencia de huracanes sobre el cuarto cuadrante</i>	<i>Página</i>	66
<i>Figura 4.9 Concentración de eventos por intensidad y áreas de vulnerabilidad generadas para el primer cuadrante.</i>	<i>Página</i>	67
<i>Figura 4.10 Concentración de eventos por intensidad y áreas de vulnerabilidad generadas para el segundo cuadrante</i>	<i>Página</i>	68
<i>Figura 4.10 Concentración de eventos por intensidad y áreas de vulnerabilidad generadas para el tercer cuadrante.</i>	<i>Página</i>	68
<i>Figura 4.11 Concentración de eventos por intensidad y áreas de vulnerabilidad generadas para el cuarto cuadrante</i>	<i>Página</i>	69
<i>Figura 4.12 Cruce del mapa de áreas de vulnerabilidad contra el mapa de localidades y municipios</i>	<i>Página</i>	70
<i>Figura 4.13 Número de localidades en posible afectación en la zona 1</i>	<i>Página</i>	71
<i>Figura 4.14 Población en posible afectación en la zona 1</i>	<i>Página</i>	72
<i>Figura 4.15 Viviendas particulares en posible afectación en la zona 1.</i>	<i>Página</i>	72
<i>Figura 4.16 Número de localidades en posible afectación en la zona 2.</i>	<i>Página</i>	73
<i>Figura 4.17 Población en posible afectación en la zona 2.</i>	<i>Página</i>	73
<i>Figura 4.18 Viviendas particulares en posible afectación en la zona 2</i>	<i>Página</i>	73
<i>Figura 4.19 Número de localidades en posible afectación en la zona 3</i>	<i>Página</i>	74
<i>Figura 4.20 Población en posible afectación en la zona 3</i>	<i>Página</i>	74
<i>Figura 4.21 Viviendas particulares en posible afectación en la zona 3</i>	<i>Página</i>	75
<i>Figura 4.22 Ajuste para los valores de presión mínima obtenidos</i>	<i>Página</i>	76
<i>Figura 4.23 Ajuste para los valores de altura de ola máximo obtenidos</i>	<i>Página</i>	76
<i>Figura 4.24 Ajuste para los valores de velocidad de viento máximo obtenidos</i>	<i>Página</i>	77
<i>Figura 4.25 Análisis de alerta temprana para el huracán Gilberto (1988)</i>	<i>Página</i>	78
<i>Figura 4.26 Análisis de alerta temprana para el huracán Roxane (1995)</i>	<i>Página</i>	79
<i>Figura 4.27 Análisis de alerta temprana para el huracán Pauline (1997).</i>	<i>Página</i>	79
<i>Figura A.1 Número de eventos registrados para el Atlántico por intensidad para la década de los 50's</i>	<i>Página</i>	85
<i>Figura A.2 Número de eventos registrados para el Atlántico por intensidad para la década de los 60's</i>	<i>Página</i>	85
<i>Figura A.3 número de eventos registrados para el Atlántico por intensidad para la década de los 70's</i>	<i>Página</i>	86
<i>Figura A.4 Número de eventos registrados para el Atlántico por intensidad para la década de los 80's</i>	<i>Página</i>	86
<i>Figura A.5 Número de eventos registrados para el Atlántico por intensidad para la década de los 90's</i>	<i>Página</i>	87
<i>Figura A.6 Número de días de ocurrencia de huracanes por intensidad en el Atlántico para los 50's</i>	<i>Página</i>	88
<i>Figura A.7 Número de días de ocurrencia de huracanes por intensidad en el Atlántico para los 60's</i>	<i>Página</i>	88
<i>Figura A.8 Número de días de ocurrencia de huracanes por intensidad en el Atlántico para los 70's</i>	<i>Página</i>	89
<i>Figura A.9 Número de días de ocurrencia de huracanes por intensidad en el Atlántico para los 80's</i>	<i>Página</i>	89
<i>Figura A.10 Número de días de ocurrencia de huracanes por intensidad en el Atlántico para los 90's</i>	<i>Página</i>	90
<i>Figura A.11 Número de eventos registrados para el pacífico por intensidad para la década de los 50's</i>	<i>Página</i>	91
<i>Figura A.12 Número de eventos registrados para el pacífico por intensidad para la década de los 60's</i>	<i>Página</i>	91
<i>Figura A.13 Número de eventos registrados para el pacífico por intensidad para la década</i>	<i>Página</i>	92

de los 70's

<i>Figura A.14 Número de eventos registrados para el pacífico por intensidad para la década de los 80's</i>	<i>Página</i>	<i>92</i>
<i>Figura A.15 Número de eventos registrados para el pacífico por intensidad para la década de los 90's</i>	<i>Página</i>	<i>93</i>
<i>Figura A.16 Número de días de ocurrencia de huracanes por intensidad en el Pacífico para los 50's</i>	<i>Página</i>	<i>94</i>
<i>Figura A.17 Número de días de ocurrencia de huracanes por intensidad en el Pacífico para los 60's</i>	<i>Página</i>	<i>94</i>
<i>Figura A.18 Número de días de ocurrencia de huracanes por intensidad en el Pacífico para los 70's</i>	<i>Página</i>	<i>95</i>
<i>Figura A.19 Número de días de ocurrencia de huracanes por intensidad en el Pacífico para los 80's</i>	<i>Página</i>	<i>95</i>
<i>Figura A.20 Número de días de ocurrencia de huracanes por intensidad en el Pacífico para los 90's</i>	<i>Página</i>	<i>96</i>

OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

El litoral mexicano ha tenido un desarrollo significativo durante los últimos años, como se puede observar en la construcción de infraestructura turística, auge de zonas industriales, aprovechamiento de recursos pesqueros y explotación de zonas petrolíferas. Es por esto que realizar un estudio de vulnerabilidad por la presencia de huracanes en los mares y costas mexicanas es de gran importancia.

México es un país geográficamente delimitado por dos grandes océanos que crean una línea de costa de aproximadamente 11,000 km de longitud, que comprenden zonas naturales de gran importancia tales como: desiertos, selvas, bosques, playas y montañas; además de un importante número de localidades aledañas a la costa, con poblaciones que en su conjunto suman más de 12,000,000 habitantes.

El objetivo del estudio es el cuantificar el riesgo y su efecto potencial en la sociedad y en el gobierno, con el fin de proveer un herramienta que permita prevenir a las autoridades y auxiliar a entender a otros analistas los efectos de este tipo de fenómenos.

Las zonas costeras mexicanas son más afectadas cuando un huracán se presenta y se desplaza en las proximidades del litoral, ocasionando grandes zonas de inundación, alturas de ola extraordinarias, lluvias y vientos ciclónicos, provocando como resultado: daño directo a infraestructuras costeras, ciudades aledañas, cierre de puertos, restricciones en las actividades comerciales, pesqueras e industriales y el eventual desalojo o evacuación de los habitantes de las zonas afectadas.

La metodología del estudio parte de una descripción teórica del fenómeno, se desarrollan los modelos que se integraron al estudio, explicando los efectos de un estudio de vulnerabilidad sobre las costas mexicanas y finalmente se presente como ejemplo la aplicación de la metodología desarrollada al caso de la península de Yucatán, es decir:

- a) Como primer punto se aborda al los huracanes como fenómeno meteorológico, su génesis, crecimiento y disipación para poder realizar un análisis estadístico de ocurrencia de eventos y obtener relaciones de la duración de cada evento por año e intensidad.
- b) Como segundo punto a seguir, se realiza una descripción de los modelos deterministas de presión, viento y oleaje. Se aborda la calibración del modelo de presiones trabajando con datos de boyas oceanográficas. Se obtienen las fórmulas que relacionan al radio ciclostrófico con la presión central del huracán para dos diferentes rangos de aplicación para el Océano Atlántico. Se obtienen los resultados de la calibración de forma gráfica comparando los datos de presiones obtenidos de forma analítica con los medidos a través de las boyas.

- c) En el tercer punto se describe y estudia el concepto de vulnerabilidad por presencia de huracanes en forma general y se particulariza en la ocurrencia histórica y destructiva de huracanes sobre las costas mexicanas. Se generan algunos ejemplos para obtener mapas de presiones, alturas de ola y vientos para diversos huracanes que han azotado las costas mexicanas.

- d) El cuarto y último punto, se aplica las herramientas desarrolladas en los dos puntos anteriores para establecer el nivel de vulnerabilidad sobre la zona de la península de Yucatán. Se parte de un análisis histórico de información generada para la zona de la península a través de la obtención de mapas de presiones mínimas, alturas de ola máximas y velocidades del viento máximas históricas. Se realiza un análisis de probabilidad de ocurrencia de eventos de igual intensidad para generar mapas de vulnerabilidad de iso-intensidades. Se realiza un análisis extremal con los datos obtenidos de presión mínima, altura de ola máxima y viento ciclónico máximo, utilizando el papel probabilístico de Gumbel y se obtienen las gráficas de distribución de probabilidad, finalmente se procede a un análisis espacial con los mapas de vulnerabilidad y la información de localidades y municipios que forman la península de Yucatán.

I INTRODUCCIÓN

I.1 Definición de huracán como fenómeno meteorológico

Un ciclón tropical es el término científico que se utiliza para definir una circulación meteorológica cerrada que se propaga sobre aguas tropicales. Este sistema de gran escala de baja presión ocurre en todo el mundo y su nombre varía según la región geográfica en el cual se desarrolla: en el Atlántico y en el Nordeste del Pacífico son llamados como huracanes, en el Noroeste del Pacífico como tifones y en el Pacífico Sur, como en el océano Indico, son conocidos simplemente como ciclones. El 75 % de los ciclones tropicales se desarrollan en el hemisferio Norte, donde los huracanes viajan de Este a Oeste, caso contrario en el hemisferio Sur, donde viajan de Oeste a Este.

La vertiente del Océano Atlántico mexicano incluye al Mar Caribe y al Golfo de México. Las áreas que se han visto más afectadas son la isla de Trinidad y Tobago, en promedio casi

uno por año en el último siglo, en segundo lugar está México y la parte Sureste de los Estados Unidos. También los huracanes se generan en la parte noreste del Océano Pacífico y particularmente afectan las costas mexicanas.

En la figura 1.1 se puede observar el mapa que muestra las posiciones de los 711 huracanes presentados en la vertiente del Océano Pacífico Norte, así como las trayectorias correspondientes a los 514 para la vertiente del Atlántico Norte para los últimos cincuenta años.

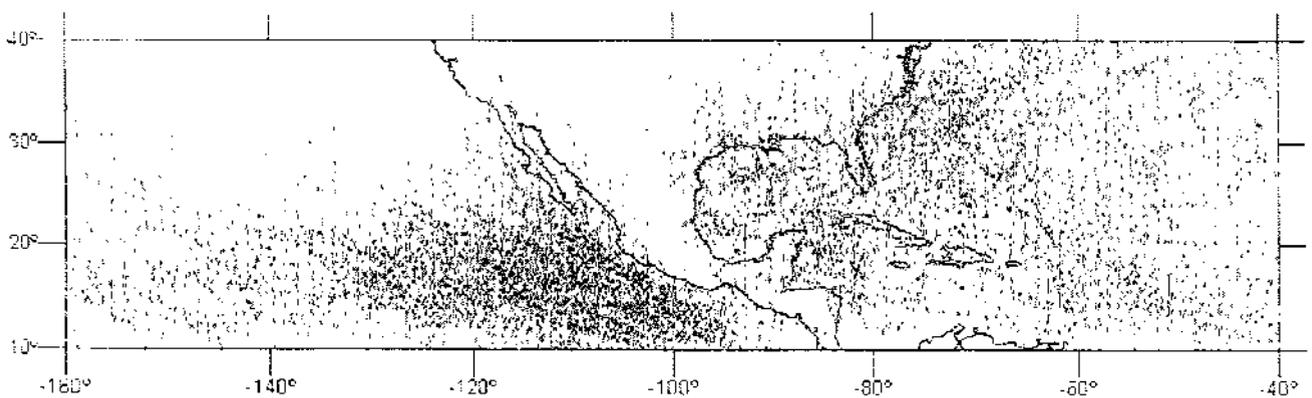


Figura 1.1 Trayectorias históricas de ocurrencia de huracanes en la vertientes pacífica y atlántica.

1.1.1 Desarrollo del huracán

Todas las depresiones tropicales que crecen y derivan en huracanes, se originan prácticamente bajo las mismas condiciones y conservan las mismas características meteorológicas a lo largo de su vida. Las diferencias físicas que se pueden presentar de un evento a otro radican en las velocidades que cada evento puede alcanzar y el tiempo que éstas se pueden mantener.

En los primeros momentos de la formación de los huracanes, la circulación de la isobara cerrada se denomina depresión tropical. Si la velocidad sustentada del viento excede lo 63 km/h el fenómeno se convierte en tormenta tropical, así mismo, cuando la velocidad del viento excede los 119 km/h el sistema toma el nombre de huracán que se puede considerar la forma más severa de una tormenta tropical. La pérdida de energía del fenómeno ocurre normalmente cuando el huracán se mueve dentro de zonas costeras y se adentra al continente.

1.1.2 Depresión tropical

Los huracanes tienen su origen en latitudes que van desde los 8° hasta los 15° hacia el norte y el sur del ecuador, se originan como resultado de un proceso de liberación de calor y humedad de los mares en las zonas tropicales. Este proceso ayuda a equilibrar la temperatura atmosférica y el balance de humedad entre las zonas tropicales y no tropicales.

Para la generación o nacimiento de un huracán se requiere al menos 27° C de temperatura ambiente. En los meses de verano, la temperatura ambiente sobre el Mar Caribe y Golfo de México puede alcanzar hasta 29° C creando zonas ideales para la generación de huracanes. La superficie del mar calienta al aire que se eleva hasta que se ve bloqueado por aire más caliente proveniente de vientos del este, el encuentro de éstas dos masas de aire genera una inversión atmosférica lo cual genera tormentas eléctricas que eventualmente rompen esta inversión disminuyendo así la presión atmosférica.

1.1.3 Tormenta tropical y huracán

El crecimiento del sistema ocurre cuando la presión en el centro de la tormenta disminuye por debajo de 1000 milibares (mb), mientras que la presión circundante se mantiene relativamente normal (1013mb). Cuando ocurre ésta baja de presión, los vientos comienzan a definir un patrón de espiral debido a la rotación de la tierra. Las fuerzas de torque generadas por éste gradiente de presión producen cambios en la velocidad del viento relativo a éste gradiente. Mientras que el nivel de energía del fenómeno aumenta, el patrón de circulación del aire tiende a moverse hacia el centro y hacia fuera del huracán, en sentido contrario a las manecillas del reloj en el hemisferio Norte y en sentido horario en el

hemisferio Sur. El ciclo se mantiene y así el fenómeno comienza a tener un movimiento de traslación con velocidades de alrededor 32 km/h en su formación hasta mayores de 200 km/h una vez en pleno desarrollo.

La zona de mayor precipitación, con vientos más violentos y máximos niveles de sobrelevaciones del nivel del mar, es la que se encuentra en el límite de acción del centro del huracán, aproximadamente a una distancia radial de 50 kilómetros desde el centro del huracán, dependiendo del evento y su intensidad. La estructura nubosa de la circunferencia definida por dicha distancia radial puede presentar una longitud de aproximadamente 450 kilómetros. En el ojo del huracán, a diferencia del resto de la tormenta, se caracteriza por ser un área de calma relativa y poca nubosidad.

La clasificación de los huracanes se realiza con base en la intensidad de la tormenta, la cual representa un potencial de daño. La escala más utilizada es la desarrollada por H. Saffir y R.H. Simpson, mostrada en la tabla 1.1, en la cual la determinación de cada categoría depende básicamente en la presión barométrica y en los vientos ciclónicos. Los niveles de marea de tormenta fluctúan de gran forma debido a condiciones barométricas y atmosféricas.

Color	Categoría	Velocidad del viento (km/h)	Marea de tormenta (m)
DT (1)	Depresión Tropical	hasta 64	menor a 0.86
TT (2)	Tormenta Tropical	64 a 118	0.86 a 1.0
H1 (3)	Huracán clase 1	118 a 154	1.0 a 1.8
H2 (4)	Huracán clase 2	154 a 178	1.8 a 2.7
H3 (5)	Huracán clase 3	178 a 210	2.7 a 3.9
H4 (6)	Huracán clase 4	210 a 250	3.9 a 5.6
H5 (7)	Huracán clase 5	mas de 250	mas de 5.6

Tabla 1.1 Clasificación de los huracanes según la escala Saffir-Simpson.

1.1.4 Decaimiento o disipación del huracán

Normalmente, un huracán se disipa sobre aguas frías o cuando alcanza la plataforma continental, aproximadamente diez días de haber iniciado el evento. En el primer caso el huracán tiende a seguir el patrón climatológico dominante y pierde energía, mientras que en el segundo caso, cuando toca tierra, el huracán pierde gran parte de su energía por la fricción generada entre el cuerpo nuboso y el terreno.

1.2 La presencia de huracanes en México

Al analizar la base de datos histórica (1949-1999) para el Océano Pacífico y el Océano Atlántico, se encontró que del total de huracanes que se aproximan a menos de 2° a las costas mexicanas, cada año es mucho mayor en la vertiente del Pacífico que en la del

Atlántico. El número de huracanes que se aproximaron a las costas del Pacífico Mexicano alcanzó el valor de 15 eventos por año como máximo y 3 eventos por año como mínimo, como se puede observar en la figura 1.2.

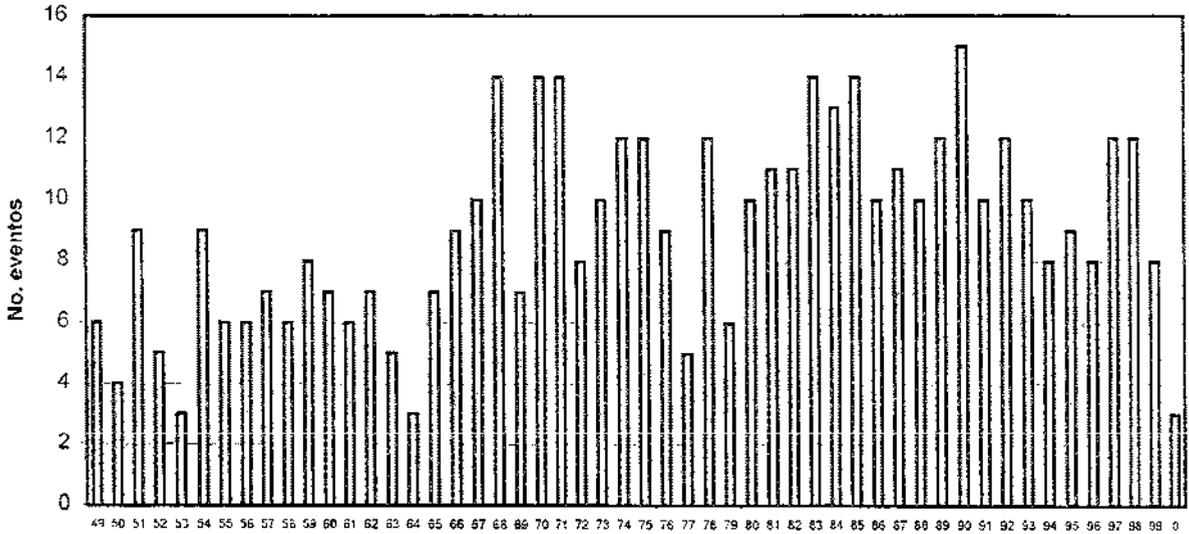


Figura 1.2 Número de eventos que se aproximaron a las costas del Pacífico Mexicano, 1949-1999

En el periodo analizado, las costas del pacífico mexicano se vieron afectadas por eventos tipo tormenta tropical con una duración aproximada de 659 días mientras que solamente se presentó poco más de 1 día de afectación directa por un huracán clase 5, lo cual demuestra que la vertiente del Pacífico mexicano es azotada por un gran número de eventos poco intensos de gran duración, mientras que los eventos de mayor intensidad tienen una duración mucho menor como se observa en la figura 1.3

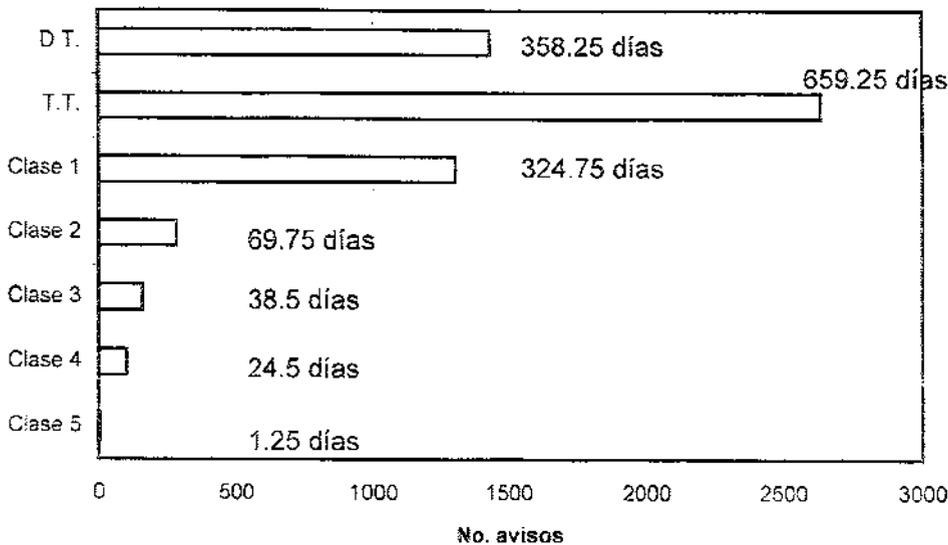


Figura 1.3 Número de avisos que tocaron tierra en el Pacífico y su tiempo de duración

Para el mismo periodo de estudio, la ocurrencia de eventos que se aproximan a menos de 2° a las costas mexicanas en la vertiente del Atlántico mexicano es mucho menor comparada con la del Pacífico, como se muestra en la figura 1.4, presentando 5 eventos que se aproximan a las costas del Golfo de México cada año como máximo y solamente 1 evento como mínimo.

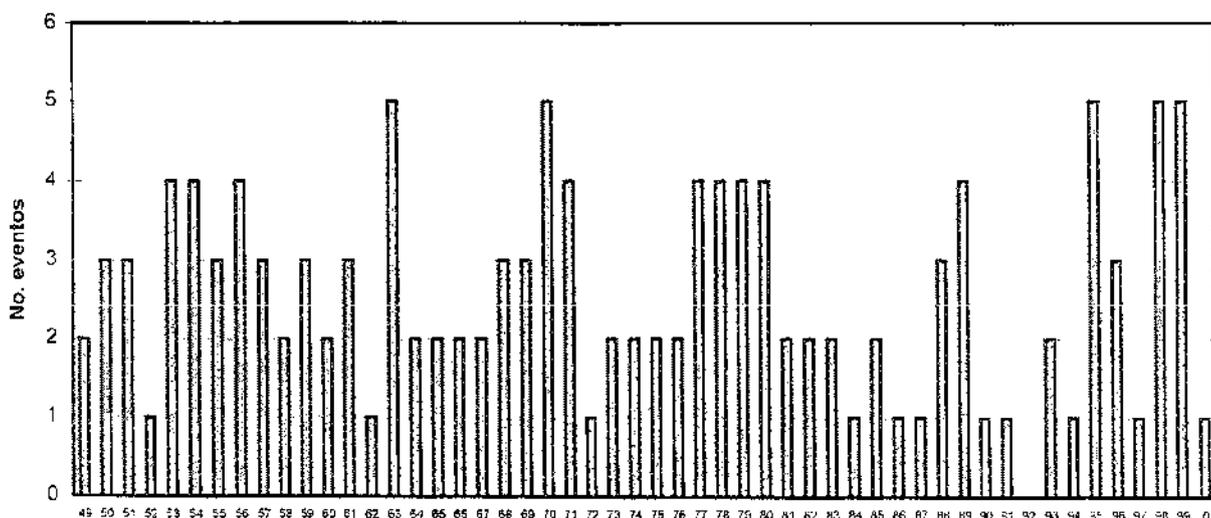


Figura 1.4 Número de eventos que se aproximaron a las costas del Atlántico Mexicano. 1949-1999

A pesar de tener una menor ocurrencia la vertiente del Atlántico mexicano, las intensidades y duraciones de los eventos son mayores que en las del Pacífico. Se tiene un total de 129 días de duración para eventos tipo tormenta tropical mientras que para eventos intensos se observa que suman 17 días en total de afectación directa de eventos clase 4 y clase 5, como se muestra en la figura 1.5.

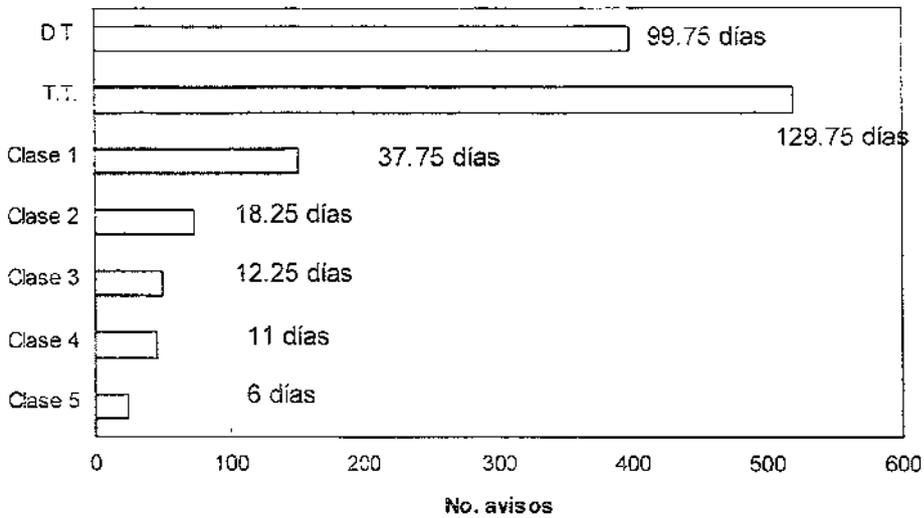


Figura 1.5 Número de avisos que tocaron tierra en el Atlántico y su tiempo de duración

Si se obtiene la relación entre la duración en días de los avisos con el número total de avisos por intensidad, se observa que el Pacífico tiene una relación del 0.25 para intensidades tipo tormenta tropical y una relación de 0.24 para huracanes clase 4 y 5 mientras que el atlántico presenta una relación de 0.26 para tormentas tropicales (similar a la del Pacífico) y una relación de 0.6 para huracanes clase 4 y 5, lo cual se traduce en que los eventos sobre la vertiente del Atlántico son mucho más intensos que en el Pacífico a pesar de ser menos frecuentes.

Se realizó un análisis histórico que relaciona el número de eventos por año e intensidad que se han presentado en los últimos 50 años para el Océano Pacífico y el Atlántico, así como un análisis adicional que relaciona la duración en días de los eventos suscitados a cada año por intensidad para las dos vertientes. Los resultados de éstos estudios estadísticos se muestran en el Anexo 1.

Se presentan las figuras que resumen el número de eventos de forma histórica y su intensidad relacionada, para la vertiente del Atlántico en la figura 1.6 y para el Pacífico en la figura 1.7.

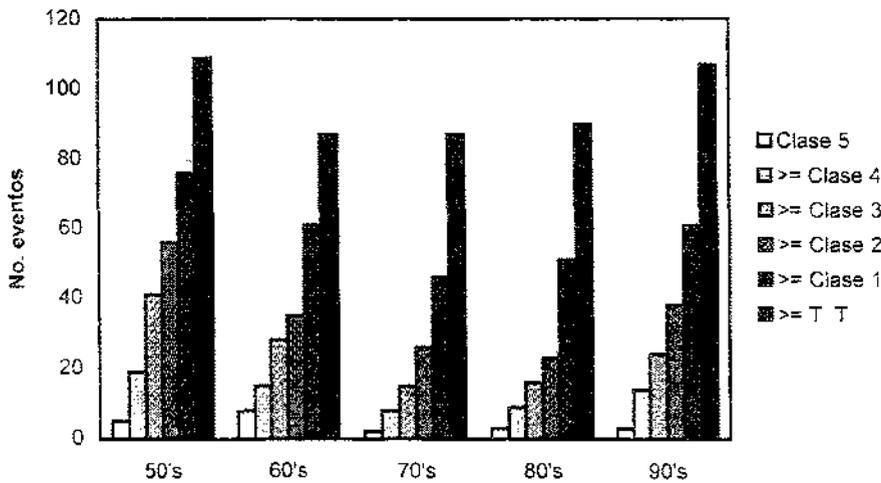


Figura 1.6 Resumen de eventos presentados en el Océano Atlántico por década

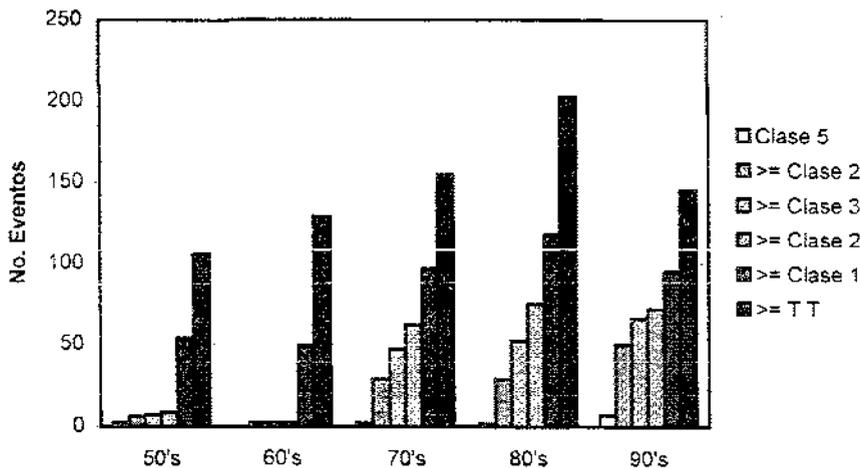


Figura 1.7 Resumen de eventos presentados en el Océano Pacífico por década

Esencialmente, debido a que no se cuenta con un programa de instrumentación y medición nacional, la información histórica recabada sobre la presencia y acción de huracanes en México ha sido muy poca. Para subsanar esta deficiencia se ha recurrido a bases de datos como la del NDBC (*National Data Bouy Center*) de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), en particular para tener datos meteorológicos y oceanográficos asociados a huracanes.

Los daños debidos a la acción de los huracanes sobre las costas del Océano Pacífico y del Golfo de México se traducen en graves pérdidas humanas y enormes sumas de dinero que anualmente afectan el desarrollo del país. Gran parte del daño ocasionado en las poblaciones y municipios de México es debido a la acción del viento generado por huracanes, así como al oleaje actuante sobre las costas y a las inundaciones que se presentan debido a la marea de tormenta.

**CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS Y
CALIBRACIÓN**

II DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS Y CALIBRACIÓN

II.1 Introducción

A través del tiempo y para varias regiones del mundo se han invertido muchos esfuerzos por encontrar algún modelo numérico para determinar la configuración de la presión debida a la presencia de huracanes, siendo los de tipo paramétrico los más exitosos. Sin embargo, son realmente pocos los estudios que se enfocan específicamente a las costas mexicanas y sus alrededores, en buena medida a causa de la falta alarmante de información y datos de campo medidos y la consiguiente dificultad de calibrarlos.

El sistema integral de riesgo oceanográfico por presencia de huracanes en las costas mexicanas contiene tres modelos paramétricos para evaluar los campos de: presión, viento y oleaje significativo con su periodo asociado en aguas profundas y, dos modelos determinista para realizar la propagación y transformación del oleaje desde aguas profundas hasta aguas someras, Díaz (2000), y de marea de tormenta, Bautista (2001).

Los modelos paramétricos de presión, viento y oleaje que se reportan en la literatura dependen de la siguiente información: posición del centro del huracán, presión central, valor de presión de la última isobara cerrada y del radio ciclostrofico, conocido también como radio de máximo gradiente. Todos los parámetros pueden ser encontrados en muchos boletines climatológicos, a excepción del radio ciclostrofico que propiamente nunca se reporta en dichos boletines.

En este capítulo, se obvia la presentación de los modelos de propagación de oleaje y de marea de tormenta, ya que solo se utilizaron para las ejecuciones sin hacerles ninguna modificación.

II.2 Descripción de los modelos de presión

Los modelos paramétricos de presión ciclostrofica que se presentan a continuación se caracterizan por generar círculos concéntricos de igual valor de presión, conocidos como isobaras. La pendiente del perfil de presiones depende del radio ciclostrofico, posición geográfica y distancia desde el ojo del huracán hasta el punto de interés.

Existen dos tipos generales de modelos de perfiles de presión: el modelo modificado por Holland (1980), ecuación (1), y el modelo Hydromet, ecuación (2), presentado originalmente por Bretchneider (1990). La forma matemática de los perfiles de presiones son:

$$\frac{P_r - P_c}{P_\infty - P_c} = Ae^{-B(Rc/r)} \quad (1)$$

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

donde:

- P_c Presión en el centro del huracán (mb)
- P_r Presión a una distancia radial r (mb)
- P_∞ Presión a una distancia infinita (primera isobara cerrada) (mb)
- Rc Radio de máximos vientos ciclostrofos (km)
- r Distancia del centro de huracán a un punto dado (km)

Para que las expresiones matemáticas (1) y (2) se puedan mantener, se deben de satisfacer las expresiones siguientes:

$$A = B^{-1}$$

$$a = b^{-1}$$

En la primera ecuación presentada por Holland, donde $A = B^{-1} = 1$ correspondiente al modelo Bret-X. Para $a = b^{-1} = 2$ el modelo se transforma en el modelo Fujita. Existe un número adimensional muy importante para determinar qué tipo de modelo se asemeja más al fenómeno meteorológico, denominado el número de Rankin Vortex.

$$Nc = \frac{fRc}{Vcr} = \frac{0.5822Rc(\text{sen}\phi)}{K\Delta P_0^{1/2}} \quad (3)$$

donde

- f Coeficiente de Coriolis
- ϕ Latitud
- ΔP_0 Gradiente de presiones ($P_\infty - P_0$)
- K Constante que depende de la densidad del aire y varía entre 11.3 a 11.7.
- Vcr Velocidad ciclostrofica

Se sugieren una serie de valores para los parámetros A y B y para a y b de los modelos los cuales se pueden validar a través de una apropiada calibración (Silva et. al., 1988).

$0.00 < N_{CR} < 0.05$	Modelo Hydromet	$A=B^{-1}=1$
$0.03 < N_{CR} < 0.08$		$A=B^{-1}=5/4$
$0.00 < N_{CR} < 0.08$		$a=b^{-1}=1/2$
$0.06 < N_{CR} < 0.15$	Modelo Bret X	$a=b^{-1}=1$

Tabla 2.1 Valores de las constantes del número de Rankin-Vortex

Las ecuaciones que definen a los cuatro modelos de presión utilizados se enlistan a continuación, los cuatro modelos se basan en la relación entre el radio ciclostrofico, una distancia radial medida desde el centro del huracán hasta un punto dado y del gradiente de presiones.

Modelo Hydromet HM $Pr = Po + (P_N - Po)e^{-Rc/r}$ (4)

Modelo NOAA I $Pr = Po + (P_N - Po)\left(\frac{2}{\pi}\right)\tan^{-1}\left(\frac{r}{Rc}\right)$ (5)

Modelo Fujita J $Pr = Po + \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 2(r/Rc)^2}}\right)(P_N - Po)$ (6)

Modelo Bret X $Pr = Po + \left(\frac{(r/Rc)^2}{1 + (r/Rc)^2}\right)(P_N - Po)$ (7)

II.3 Descripción del modelo de viento

El campo de viento debido a la presencia de ciclones tropicales o huracanes presenta, en la mayor parte de los casos, una asimetría con respecto a un eje imaginario que cruza el centro del huracán. Dicha asimetría se debe a una serie de procesos como son: el movimiento del ciclón, la localización y la estructura de los cuerpos nubosos alrededor del huracán, incluyendo las bandas nubosas en espiral, y de las influencias externas de los sistemas meteorológicos colindantes.

Los efectos de un movimiento de ciclón se pueden incluir en la modelación con el simple hecho de añadir el vector de traslación a todo el campo de viento. Esto produce un flujo de masa a través del ciclón, una salida por delante y máximos hacia el hemisferio norte y hacia el hemisferio sur. Por lo que la asimetría a través del ciclón es cercana al doble del movimiento del ciclón. Sin embargo, se sabe que la interacción de un ciclón en movimiento con la superficie en donde éste se mueve produce un cambio en la asimetría del fenómeno, siendo esta la razón por la cual los vientos máximos no se localizan directamente en la dirección principal de movimiento del huracán.

La metodología para estimar el viento local, en cualquier punto de análisis alrededor del centro del huracán, inicia con el cálculo y obtención de la máxima velocidad del viento ciclostrófico a partir de la siguiente ecuación, la cual necesita la información sobre el gradiente de presiones obtenido con los modelos presentados en la sección anterior.

$$U_{Rr} = K \sqrt{\Delta P} \tag{8}$$

Obtenida la máxima velocidad del viento ciclostrófico, se procede al cálculo del máximo gradiente del viento ciclostrófico en función del radio ciclostrófico y del coeficiente de Coriolis.

$$U_{Rg} = U_{Rc} - 0.5 fR_c \tag{9}$$

Para evaluar la velocidad del viento en cualquier punto existen dos posibles alternativas: el uso del nomograma presentado en la figura 2.1 (Bretschneider, 1990)

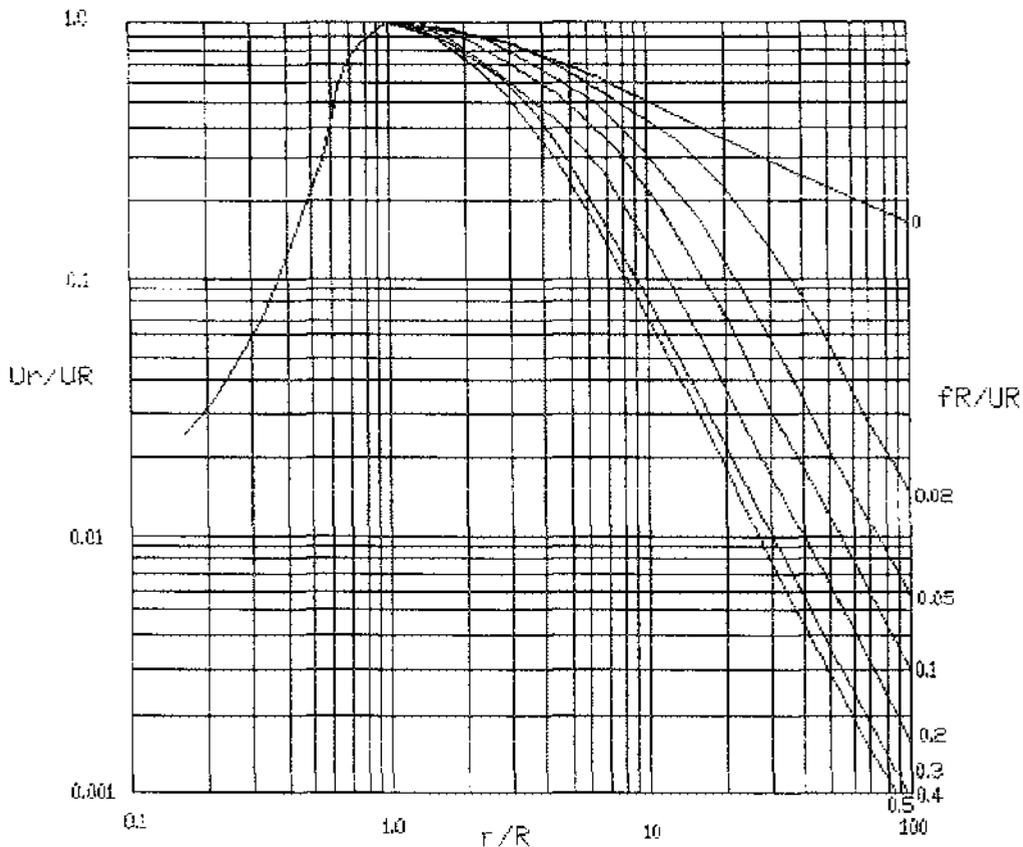


Figura 2.1 Relación de los factores para el cálculo del viento ciclónico.

Otra alternativa es el uso de las siguientes relaciones:

$$U_p = F_v U_{Rg} \tag{10}$$

donde el factor de amortiguamiento se evalúa por medio de la siguiente expresión:

$$F_v = Y_1 + \frac{(N - B_1)(Y_2 - Y_1)}{B_2 - B_1} \tag{11}$$

Siendo N el parámetro que relaciona el coeficiente de Coriolis con el radio ciclostrófico y el gradiente de velocidades máximas ciclostróficas, definido como:

$$N = \frac{fR_c}{U_{Rg}} \tag{12}$$

Los parámetros B_1 y Y_1 , de la ecuación (10), representan la forma del perfil del viento en función del radio ciclostrófico, Tablas 2.2 y 2.3.

	B_1	B_2
$N > 0.5$	0.5	0.4
$0.4 > N > 0.3$	0.4	0.3
$0.3 > N > 0.2$	0.3	0.2
$0.2 > N > 0.1$	0.2	0.1
$0.1 > N > 0.05$	0.1	0.05
$0.05 > N > 0.02$	0.05	0.02
$0.0 > N > 0.02$	0.02	0.0

Tabla 2.2 Valores de las constantes B_1, B_2

$B_i (i=1 \text{ o } 2)$	$S=r/Rc$	$Y_i (i=1 \text{ o } 2)$
0.5	$S < 10$	$1.40624-0.467536S+0.0679624S^2-0.00489525S^3+0.000162444S^4-1.89081 \times 10^{-6}S^5$
	$S \geq 10$	$e^{-1.90224 \ln(S)+1.70573}$
0.4	$S < 9$	$1.4404-0.551326S+0.128293S^2-0.017985S^3+0.000418602S^4+0.000251397S^5-0.0000315701S^6+0.0000011555S^7$
	$S \geq 9$	$e^{-1.92224 \ln(S)+1.91528}$
0.3	$S < 10$	$1.30333-0.327681S+0.0319639S^2-0.00111305S^3$
	$S \geq 10$	$e^{-1.94958 \ln(S)+2.2656}$
0.2	$S < 10$	$1.24-0.253145S+0.016017S^2+0.000324392S^3-0.0000495336S^4$
	$S \geq 10$	$e^{-1.95237 \ln(S)+2.568}$
0.1	$S > 8$	$0.479999+1.26702S-1.07434S^2+0.400194S^3-0.0814654S^4+0.0093162S^5-0.000560949S^6+0.0000138306S^7$
	$8 \leq S < 12$	$0.98001-0.125S+0.00500002S^2$
	$S > 12$	$e^{-1.91282 \ln(S)+3.03059}$
0.05	$S < 10$	$1.14957-0.142764S+0.0060497S^2$
	$10 \leq S < 40$	$1.50502E-13S^7-5.70754 \times 10^{-11}S^6+8.32006 \times 10^{-9}S^5-5.43854 \times 10^{-7}S^4-9.57531 \times 10^{-6}S^3+6.968 \times 10^{-4}S^2-0.0397033S+0.64246$
	$S \geq 40$	$e^{-1.86601 \ln(S)+3.23966}$
0.2	$S < 10$	$1.10833-0.119742S+0.00522728S^2$
	$10 \leq S < 60$	$-3.94872E-10S^9+1.34085E-7S^8-1.819031 \times 10^{-3}S^7+0.00126011S^6-0.0463994S+0.7838$
	$S \geq 60$	$e^{-1.53434 \ln(S)+2.99031}$
0	$S < 10$	$1.08617-0.10072S+0.00428031S^2$
	$S \geq 10$	$e^{-0.470739 \ln(S)+0.403052}$

Tabla 2.3 Valores de las constantes Y_1, Y_2 para el modelo de viento

Como se mencionó anteriormente, el efecto del desplazamiento del huracán afecta de forma significativa a la asimetría del campo de viento, para incorporar este efecto es suficiente realizar la siguiente corrección:

$$W = 1.613225(U_p + 0.5V_p \cos(\beta)) \tag{13}$$

donde

V_F - Velocidad de desplazamiento del huracán

β - Angulo total entre V_F y U_p .

Es conveniente señalar que las velocidades están dadas en km/h, mientras que las distancias, Rc o r , en km.

II.4 Descripción del modelo de oleaje

La superficie del mar se ve afectado por diversos factores naturales y meteorológicos como las mareas, los vientos, los cambios en la presión atmosférica, la temperatura y la salinidad, así como los movimientos tectónicos los cuales generan grandes oscilaciones en el cuerpo acuoso. Esta superficie del océano puede cambiar dramáticamente al verse expuesta a condiciones meteorológicas extremas como es el caso de un huracán. Los huracanes producen vientos extraordinarios alrededor de su centro con formas asimétricas y esfuerzos cortantes que levantan literalmente al océano en la zona de influencia, generando ondas de gran amplitud y periodo que se mueven rápidamente hacia las zonas costeras ganando altura y fuerza conforme el fondo va disminuyendo, para finalmente al tocar tierra inundando grandes extensiones de terreno costero.

Aunque existen muchos de factores y parámetros físicos que influyen en la formación del oleaje extraordinario debido a la presencia de algún huracán, el motor más importante, particularmente en aguas profundas, es el viento. Sánchez et al (1997) comprobaron que la siguiente relación es la más adecuada para estimar la magnitud del oleaje bajo la influencia de un huracán estacionario, obteniendo la altura significativa para un huracán estacionario como sigue.

$$H_{RSTA} = K' \left(\frac{K}{K1} \right) \sqrt{Rc(\Delta P)} + 0.3048 \quad (14)$$

donde K' se conoce como el factor del oleaje definido por.

$$K' = 7.47984 - 43.7101Nc + 240.9152 \quad \text{para } Nc < 0.1 \quad (15)$$

$$K' = -1.36313 \ln(Nc) + 1.89406 \quad \text{para } Nc > 0.1 \quad (16)$$

Con el valor de la altura significativa para un huracán estacionario se obtienen los siguientes parámetros de altura de ola puntual y velocidad del viento puntual descritos en las ecuaciones (17) y (18) respectivamente.

$$Hp = H_{RSTA} (factH) \quad (17)$$

$$Up = U_{Rg} (factV) \quad (18)$$

donde U_{Rg} es el máximo gradiente de viento ciclostrófico obtenido en la ecuación (9), y los factores de agrupamiento horizontales y verticales $factH$ y $factV$, que dependen de los parámetros $A1$, $A2$, $B1$ y $B2$, se definen como sigue.

$$factH = Y1 + (N - A1) \frac{(Y2 - Y1)}{A2 - A1} \quad (19)$$

$$factV = Y1 + (N - B1) \frac{(Y2 - Y1)}{B2 - B1} \tag{20}$$

Haciendo notar que el factor N es el mismo que en la ecuación (11) y el *factH* y *factV* se puede obtener con la ecuación (19) y (20) respectivamente o bien con los nomogramas de las figuras 2.1 y 2.2 respectivamente.

La tabla 2.4 muestra los valores de las constantes *A1* y *A2* relacionadas con el parámetro *N*, mientras que en la Tabla 2.5 se presentan el criterio para seleccionar los parámetros *Yi* de la ecuación (20). La figura 2.2 muestra el nomograma de calculo original presentado por Bretschneider (1990).

	<i>A₁</i>	<i>A₂</i>
<i>N</i> > 0.02	0.0	0.02
0.04 > <i>N</i> > 0.02	0.02	0.04
0.06 > <i>N</i> > 0.04	0.04	0.06
0.10 > <i>N</i> > 0.06	0.06	0.1
0.16 > <i>N</i> > 0.10	0.10	0.16
0.20 > <i>N</i> > 0.16	0.16	0.20
0.30 > <i>N</i> > 0.20	0.20	0.30
<i>N</i> > 0.30	0.3	0.5

Tabla 2.4 Valores de las constantes *A₁* y *A₂*

$A_i (i=1 \text{ o } 2)$	$S=r/Rc$	$Y_i (i=1 \text{ o } 2)$
0	$S < 4$	$0.752208 + 0.369595S - 0.140263S^2 + 0.014864S^3$
	$4 < S < 10$	$0.438525 + 0.580726S - 0.217082S^2 + 0.0356998S^3$ $- 0.00281136S^4 + 0.0000853685S^5$
	$S > 10$	$0.66e^{-(10-S)/20}$
0.02	$S < 4$	$0.78149 + 0.338697S - 0.134139S^2 + 0.0140779S^3$
	$4 < S < 10$	$0.38963 + 0.6076655S - 0.228982S^2 + 0.0374788S^3$ $- 0.00295735S^4 + 0.00009056S^5$
	$S > 10$	$0.53e^{-(10-S)/10}$
0.04	$S < 4$	$0.857539 + 0.231298S - 0.0957542S^2 + 0.00921747S^3$
	$4 < S < 10$	$3.65372 + 1.90942S - 0.521238S^2 + 0.072649S^3$ $- 0.004946175S^4 + 0.000131038S^5$
	$S > 10$	$0.39e^{-(10-S)/10}$
0.06	$S < 4$	$0.840571 + 0.26648S - 0.118446S^2 + 0.0119774S^3$
	$4 < S < 10$	$-0.856199 + 1.58213S - 0.539198S^2 + 0.083803S^3$ $- 0.00632956S^4 + 0.000187371S^5$
	$S > 10$	$0.335e^{-(9-S)/5}$
0.1	$S < 1$	1.0
	$1 < S < 4$	$0.91428 + 0.183412S - 0.107001S^2 + 0.0115053S^3$
	$4 < S < 10$	$3.47215 - 1.82804S + 0.495642S^2 - 0.0718574S^3 + 0.0052004S^4$ $- 0.00014753S^5$
	$S > 10$	$0.15e^{-(10-S)/5}$
0.16	$S < 1$	1.0
	$1 < S < 4$	$1.01023 + 0.0508318S - 0.06446501S^2 + 0.00596344S^3$
	$4 < S < 10$	$3.46533 - 1.72201S + 0.409149S^2 - 0.05217715S^3 + 0.003367561S^4$ $- 0.0000857915S^5$
	$S > 10$	$0.08e^{-(10-S)/5}$
0.2	$S < 1$	0.93
	$1 < S < 4$	$0.938633 + 0.189515S - 0.146029S^2 + 0.0176179S^3$
	$4 < S < 10$	$1.7357 - 0.56494S + 0.10471S^2 - 0.0145245S^3 + 0.001021718S^4$ $- 0.00004155035S^5$
	$S > 10$	$0.077e^{-(9-S)/5}$
0.3	$S < 1$	0.97
	$1 < S < 4$	$1.05398 + 0.0342529S - 0.0991788S^2 + 0.017817S^3$
	$4 < S < 10$	$4.58186 - 2.7854S + 0.69382S^2 - 0.0901346S^3 + 0.00585502S^4$ $- 0.000150752S^5$
	$10 < S < 15$	0.02
0.5	$S < 1$	0.6
	$1 < S < 5$	$0.484684 + 1.475035S - 1.34874S^2 + 0.453674S^3 + 0.0692772S^4$ $- 0.00402163S^5$
	$5 < S < 10$	$3.88164 - 2.35218S + 0.594698S^2 - 0.0762818S^3 + 0.00488697S^4$ $- 0.000124076S^5$
	$10 < S < 15$	0.01

Tabla 2.5 Valores de las constantes Y_1, Y_2 para el modelo de oleaje.

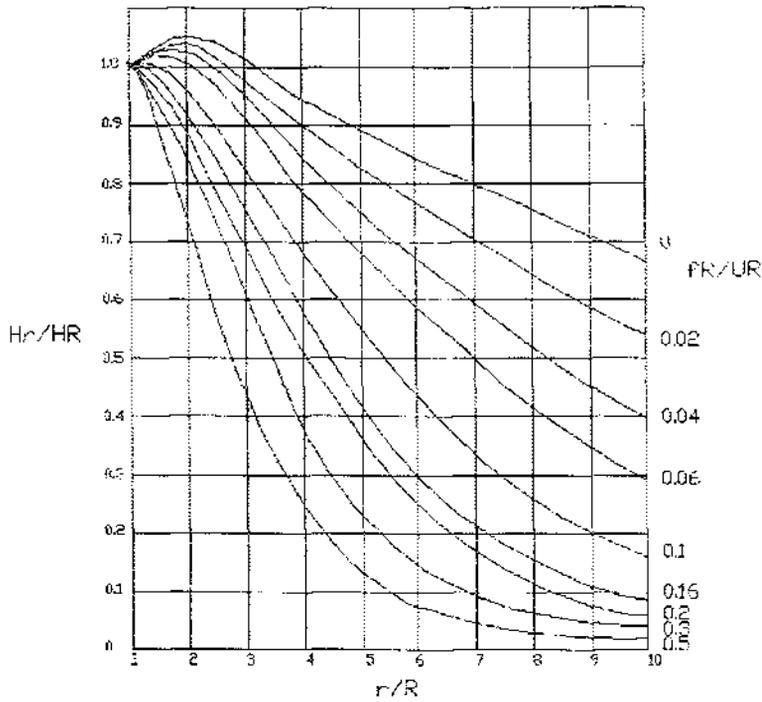


Figura 2.2 Relación de los factores para el cálculo del oleaje.

Finalmente, los mismos autores, Sánchez et al. (1990), corroboran con datos experimentales que la corrección propuesta por Bretschneider (1990) es correcta para caracterizar la influencia de un huracán en desplazamiento:

$$HH = Hp \left(\frac{1 + 0.5V_F}{U_p \cos(\beta)} \right)^2 \tag{21}$$

donde

- HH Configuración de la altura del oleaje en todo el dominio en movimiento
- V_F Velocidad de desplazamiento del huracán
- β Ángulo total entre V_F y U_p .

Las variables necesarias para una predicción del oleaje en aguas profundas, que los cuatro modelos de presiones descritos, son las siguientes:

- K_0 Constante interna del modelo (válido para todos los métodos).
- $C2$ Constante interna del modelo (varía de acuerdo al modelo)
- $K1$ Constante teórica que depende del modelo y de las unidades utilizadas para valores de presiones y velocidades, varía desde $K1 = 66$ hasta $K1 = 68$ para velocidades en

nudos y presiones en pulgadas de Hg y de $K1=11.34$ a $K1 = 11.68$ con la velocidad en nudos y presión en milibares. La variación se debe al cambio en la densidad del viento.

$C1$ Constante teórica que depende del modelo utilizado

V_{cr} Velocidad máximo del viento ciclostrófico

dp/dr Gradientes de presiones

ρ_a Densidad del aire

La tabla 2.6 muestra la relación entre los coeficientes $C1$ y $C2$ para cada modelo.

Modelo	C1	C2
Hydromet HM	$1/c$	---
NOAA I	$1/\pi$	0.5
Fujita J	$2/3 \sqrt{3}$	0.4226
Bret X	2	0.5

Tabla 2.6 Constantes teóricas $C1$ y $C2$

II.5 Calibración del modelo de presión

Los cuatro modelos de presión descritos con anterioridad en éste capítulo dependen principalmente en un parámetro físico muy importante; el radio ciclostrófico definido como el radio correspondiente al máximo viento ciclónico. El radio ciclostrófico parece no tener ningún patrón o relación directa con la presión en el centro del huracán o con el viento generado por el fenómeno, las relaciones encontradas en la literatura muestran una pobre correlación de datos medidos y observados de radios ciclostróficos para diferentes eventos de huracán contra presiones centrales obtenidas, lo cual genera una gran incertidumbre del posible comportamiento real de dicho parámetro en la naturaleza.

II.5.1 Características de las Boyas oceanográficas

Las boyas oceanográficas tienen como misión el almacenamiento de una serie de información meteorológica y oceánica en determinados lapsos de tiempo. Las boyas se posicionan sobre las costas o se anclan en sitios mar adentro. Para el proceso de calibración se consultaron los datos medidos por boyas del *National data Buoy Center NDBC*, en particular las ubicadas sobre el Golfo de México.

El tipo de boyas consultadas miden y transmiten la presión barométrica, la dirección del viento, la velocidad del viento, la temperatura del mar y la energía espectral del oleaje (de la cual se derivan la altura de ola significativa), el periodo dominante del oleaje y el periodo

promedio del oleaje, así como se puede obtener la dirección del frente del oleaje con la ayuda de varias boyas.

Los tipos de boyas consultadas tienen las siguientes características generales:

- a) Boya tipo disco, figura 2.3.
- b) Boyas NOMAD, figura 2.4

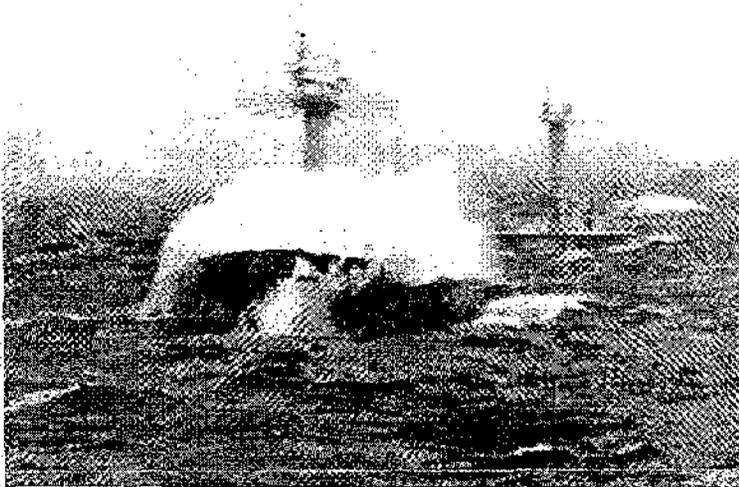


Figura 2.3 Boya de disco de 12 metros de diámetro

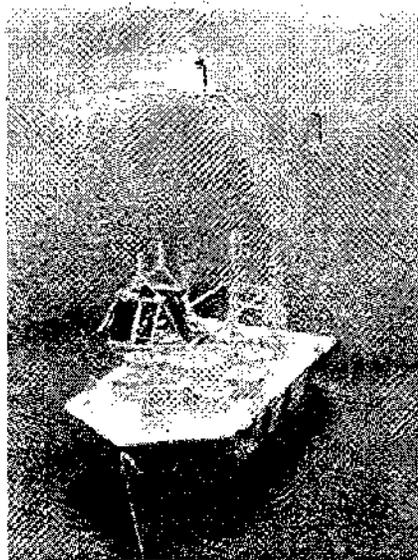


Figura 2.4 Boya tipo NOMAD de 6 metros de longitud

Las boyas se seleccionaron de acuerdo a su ubicación geográfica, procurando que estuvieran lo más cercanas posibles al litoral mexicano, figura 2.5. En la tabla 2.7 se presenta la lista de boyas, su número de identificación y su ubicación georreferenciada..

Como se puede apreciar en la figura 2.5, estas boyas se encuentran en la parte sur de la Florida en los Estados Unidos, y algunas de ellas se encuentran al noreste del Golfo de México, lo cual permite tomar parte de la información histórica recopilada a lo largo de los años y así poder realizar la calibración del modelo de presión más adecuado para este estudio.

<i>Estación No.</i>	<i>Grad</i>	<i>Min</i>	<i>Seg</i>	<i>N/S</i>	<i>Grad</i>	<i>Min</i>	<i>Seg</i>	<i>E/W</i>
41008	31	24	8	N	80	52	14	W
41009	28	30	1	N	80	11	3	W
41010	28	53	33	N	78	31	1	W
42001	25	55	20	N	89	40	55	W
42002	25	53	30	N	93	34	3	W
42003	25	56	10	N	85	54	51	W
42007	30	5	42	N	88	46	30	W
42019	27	54	59	N	95	21	1	W
42020	26	54	59	N	96	42	0	W
42035	29	14	47	N	94	24	35	W
42036	28	30	22	N	84	30	37	W
42039	28	47	5	N	86	2	16	W
42040	29	12	30	N	88	12	0	W
42054	26	13	28	N	87	26	4	W

Tabla 2.7 Boyas utilizadas para la calibración

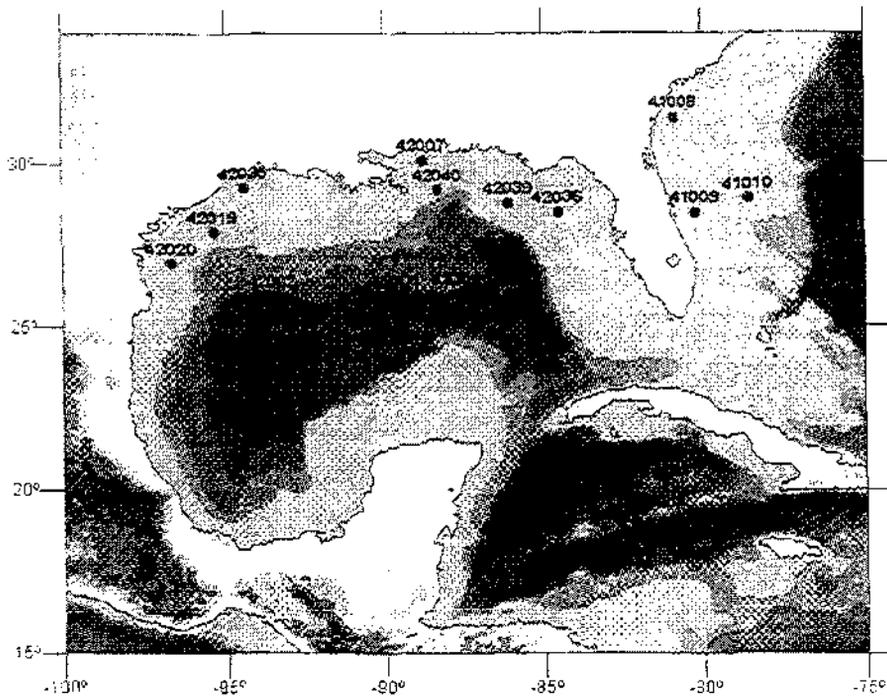


Figura 2.5 Localización de las boyas utilizadas para la calibración

II.5.2 Determinación del radio ciclostrofico

Como se puede observar de los apartados II.2 al II.4, los modelos de presión, viento y oleaje son dependientes del radio ciclostrofico. Normalmente este parámetro no se reporta en los boletines meteorológicos, por lo que antes de proceder a calibrar los modelos es necesario determinar una relación que nos auxilie a estimar dicho valor en función de los datos que se reportan en dichos boletines. Para esto se realizó una recopilación histórica de datos de presión contra radios ciclostroficos medidos por el *National Hurricane Center*, *NHC*, entre los años 1999 y 2000, así como datos reportados para huracanes que se han presentado históricamente en las cercanías de la península de Florida (Dean et. al 1995).

Al realizar un primer análisis y homogeneización de la información recabada (277 datos), se pudo observar una pobre correlación de datos entre la presión central y el radio ciclostrofico, tal y como se puede observar en la figura 2.6.

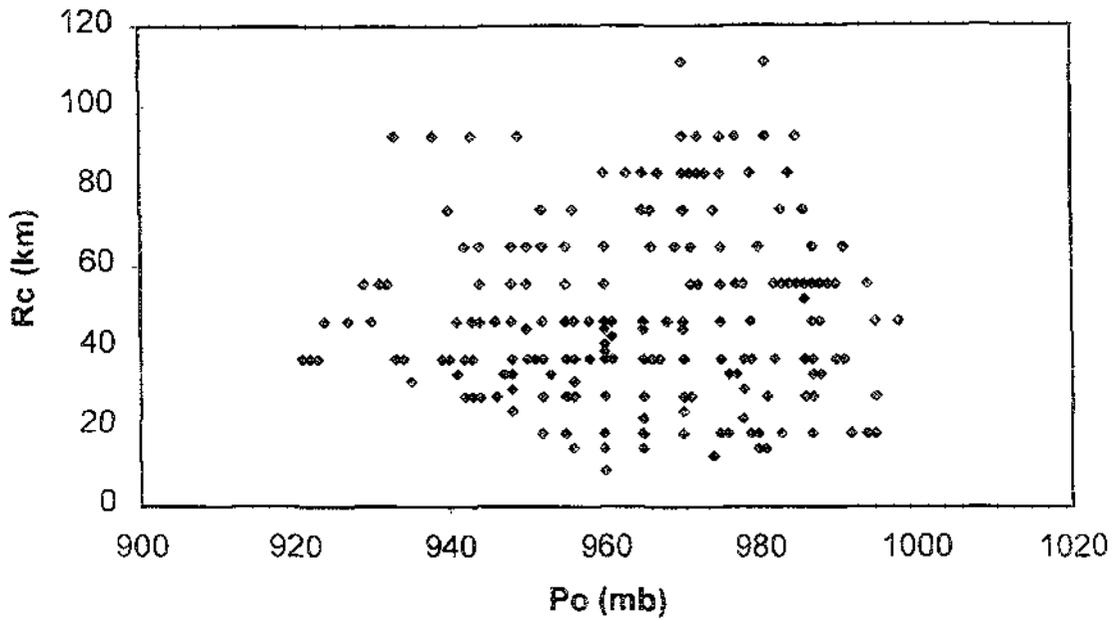


Figura 2.6 Dispersión de datos de Presión central contra radio ciclotrónico.

Dados los primeros resultados, se optó por realizar una separación de datos con respecto a ciertos intervalos de intensidades de presión central y así poder analizar cada rango por separado, lo cual hace mucho más sencillo su manejo y verificación. El promedio que se obtuvo fue a cada 10 mb desde 880mb hasta 980mb de presión central (tabla 2.8), obteniéndose una ecuación de primer grado correspondiente a una recta de ajuste.

de P_c (mb)	hasta P_c (mb)	R_c (km)
880	890	9.26
890	900	12.964
900	910	20.372
910	920	24.076
920	930	43.2133
930	940	51.6708
940	950	43.6682
950	960	40.7852
960	970	44.1685
970	980	53.9074

Tabla 2.8 Rangos de presión central contra radio ciclotrónico

La ecuación obtenida que relaciona el Radio ciclotrónico con la presión central del huracán es la siguiente, mostrada en la figura 2.7:

$$R_c = 0.4785P_c - 413.01 \tag{22}$$

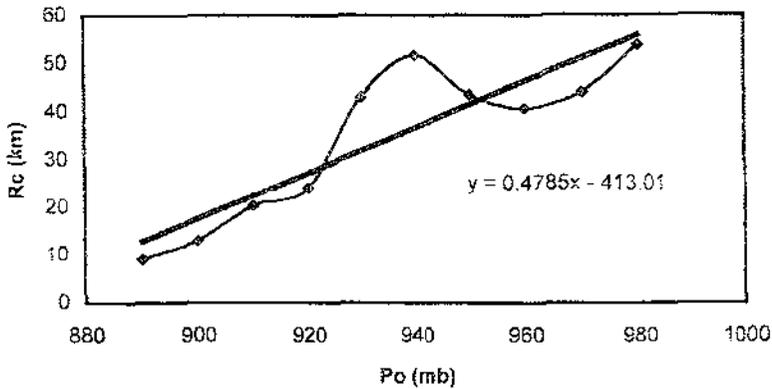


Figura 2.7 Relación de P_o vs. R_c para todo el rango de aplicación del huracán en la vertiente del Atlántico.

La ecuación (22) se aplica para todo el rango de presiones que un huracán puede presentar, aunque históricamente los huracanes que presentaron presiones menores a 900 mb son poco comunes. La ecuación (22) puede subestimar el valor del radio ciclostrofico para valores superiores a 960 mb, por esto se obtuvo una ecuación de tercer grado (tabla 3.8), con un rango de aplicación que va desde 930 mb hasta 980 mb, figura 2.8, obteniéndose una correlación más precisa para huracanes poco intensos:

$$R_c = 0.0011P_o^3 - 3.1082P_o^2 + 2959P_o - 938801 \tag{23}$$

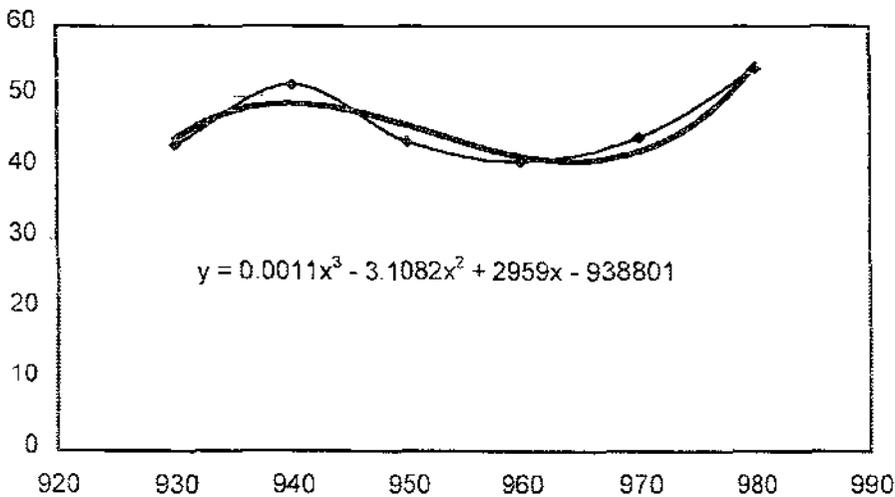


Figura 2.8 Relación de P_o vs. R_c para un rango menor de aplicación del huracán en la vertiente del Atlántico.

El análisis realizado hasta el momento ha sido para la vertiente atlántica, por lo cual y para estudios posteriores se recomienda hacer un estudio de calibración de los modelos de presión con datos oceanográficos medidos en la vertiente pacífica, los cuales de momento no son recabados por ninguna institución. Sin embargo y como una primera aproximación, se utilizaron los datos reportados por el National Weather Service de la NOAA, figura 2.9, los cuales tienen la siguiente tendencia lineal:

$$R_c = 0.2614P_o - 216.63 \tag{24}$$

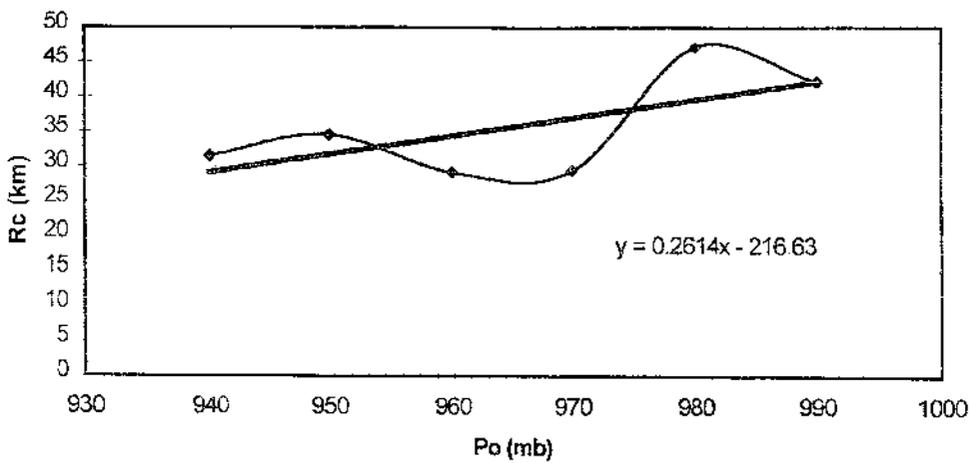


Figura 2.9 Relación de P_o vs. R_c del huracán en la vertiente del Océano Pacífico

II.5.3 Verificación de los modelos de presión

Para verificar que modelo representa mejor el perfil de presiones, se trabajó con seis huracanes que pasaron en un radio de influencia de 3° geográficos, como máximo, de las boyas oceanográficas descritas en el apartado II.5.1. Los huracanes que cumplieron estas características fueron los siguientes:

- Gilbert (1988)
- Opal (1995)
- Berta (1996)
- Georges (1998)
- Bret (1999)
- Floyd (1999)

En la figura 2.10 se muestra un mapa que ilustra las trayectorias de los seis huracanes con los que se realizó la calibración. Se puede observar que todos pasan muy cerca de la zona en donde se encuentran las boyas oceanográficas de la NDBC, además de que dichos huracanes han sido de los más intensos en los últimos diez años.

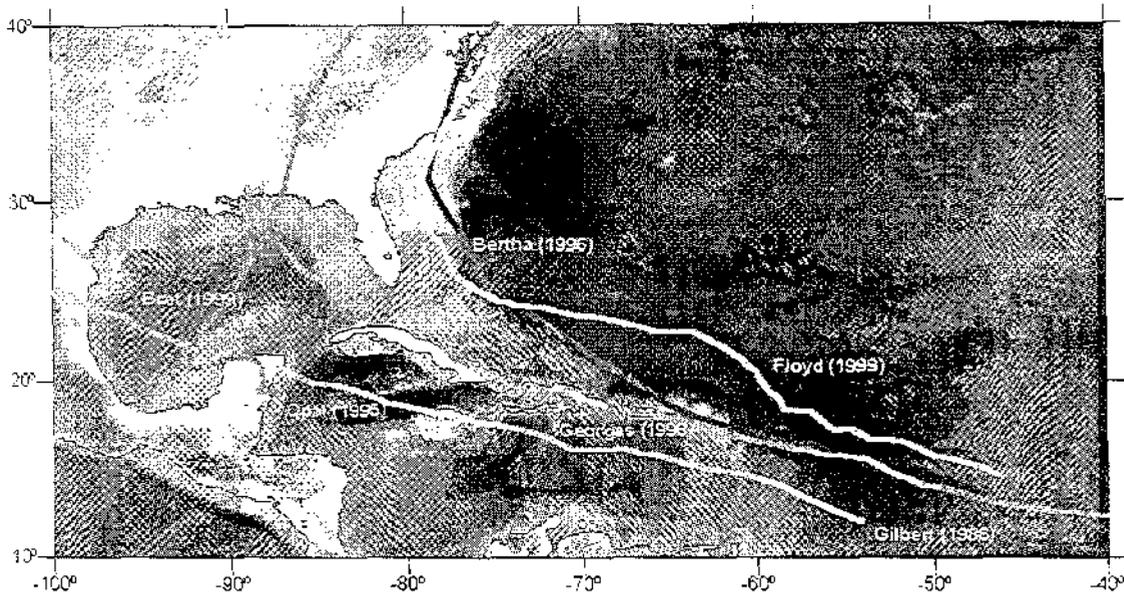


Figura 2.10 Trayectorias de los seis huracanes de calibración del modelo de presiones.

Para determinar que modelo de presión representa mejor el perfil de presiones, se consideraron los siguientes modelos: el Hidromet Model HM, el NOAA Model I, el Fujita Model J y el Bret Model X, descritos con anterioridad. La presión y ubicación geográfica de cada uno de los eventos se obtuvo de los boletines meteorológicos, mientras que el radio ciclostrofico se calculó con las expresiones (22) y (23).

Una comparación entre los datos medidos por las boyas oceanográficas y los resultados obtenidos a través de los modelos paramétricos se muestran en las figuras 2.11 a la 2.16. En estas figuras se puede observar que:

- En términos generales todos los modelos representan bien la tendencia del perfil de presiones.
- Las diferencias más importantes, entre los modelos y los datos medidos, se presentan cuando el ojo del huracán pasa más lejos de las boyas oceanográficas. Por lo que se puede concluir que la forma de decaimiento del perfil de presiones pierde precisión a medida que las estimaciones se realizan más lejos del ojo del huracán.
- Los modelos que mejor ajuste presentaron fueron el Bret Model X, y el Hidromet Model

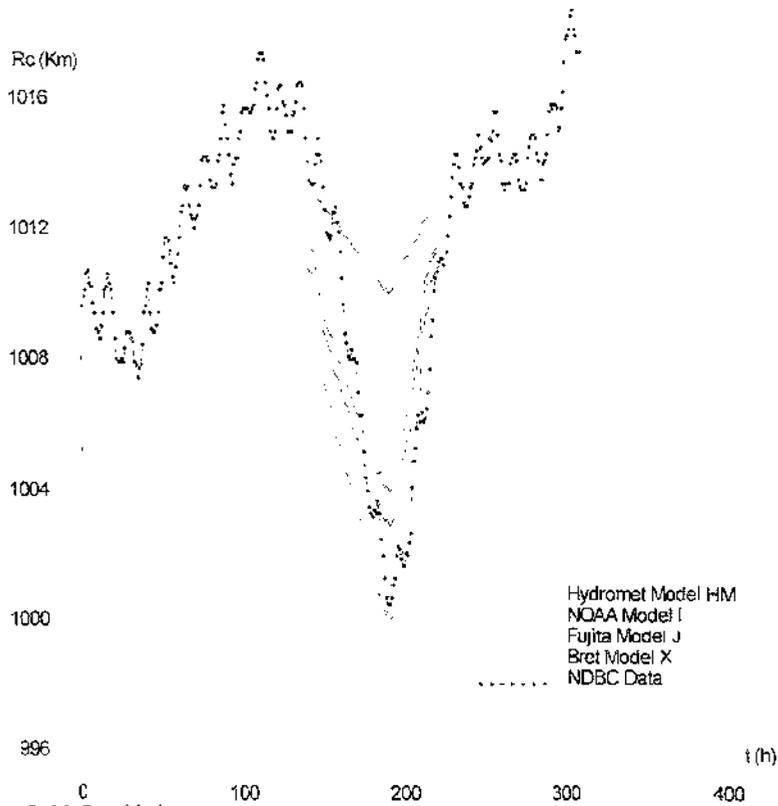


Figura 2.11 Perfil de presiones con respecto al tiempo para el huracán Gilbert (1988).

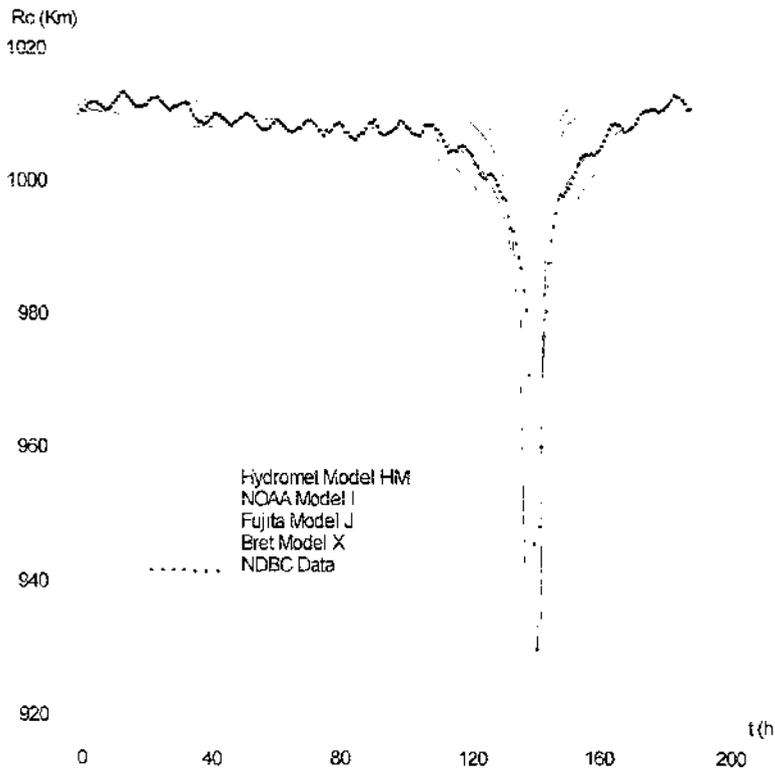


Figura 2.12 Perfil de presiones con respecto al tiempo para el huracán Opal (1995).

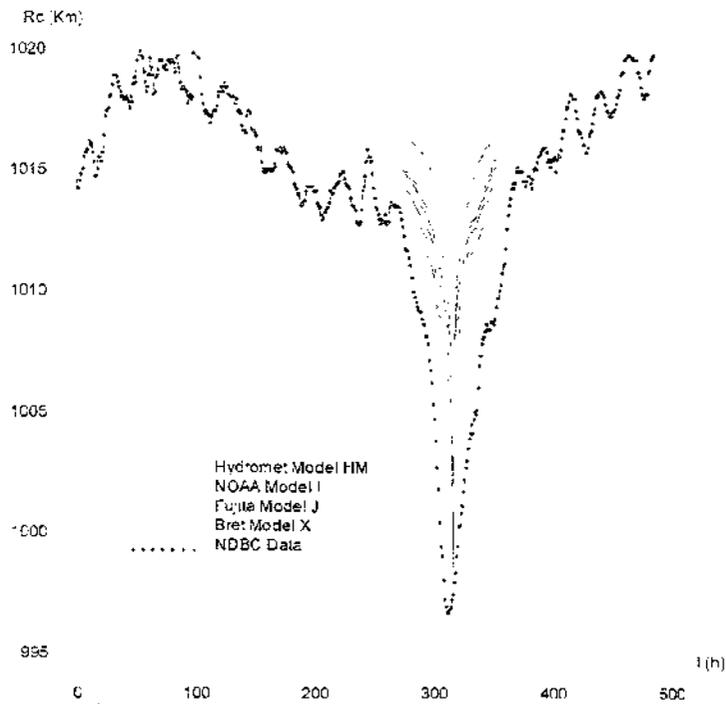


Figura 2.13 Perfil de presiones con respecto al tiempo para el huracán Bertha (1996)

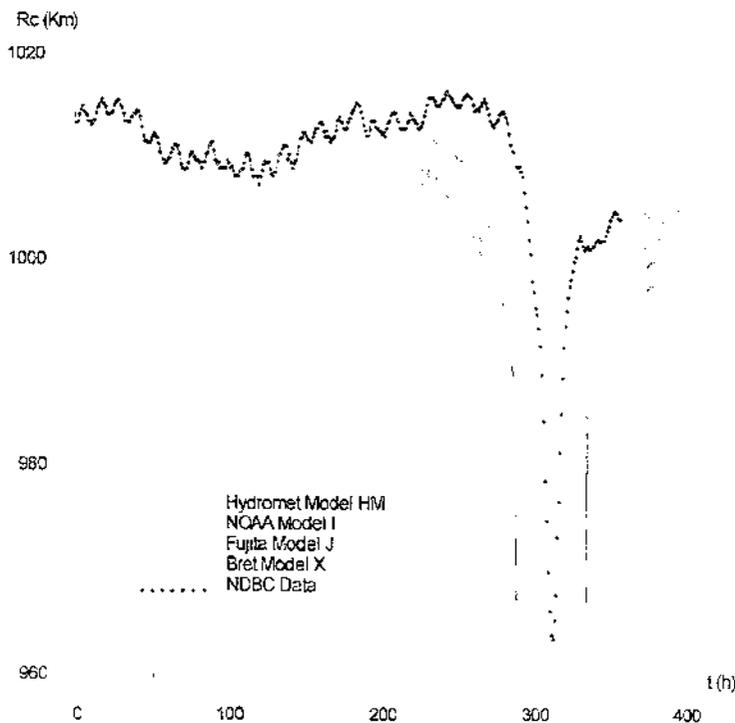


Figura 2.14 Perfil de presiones con respecto al tiempo para el huracán Georges (1998).

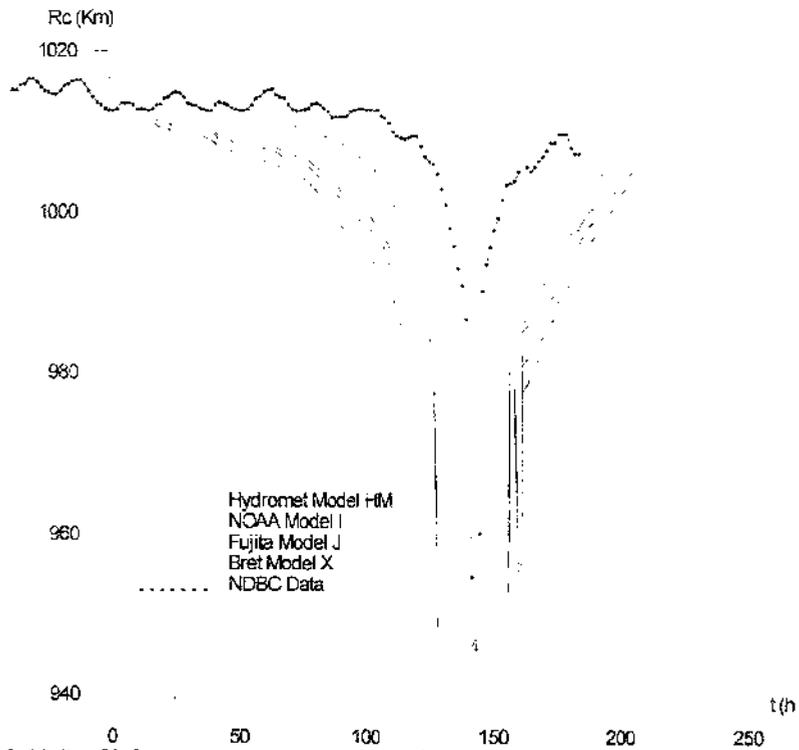


Figura 2.15 Perfil de presiones con respecto al tiempo para el huracán Bret (1999).

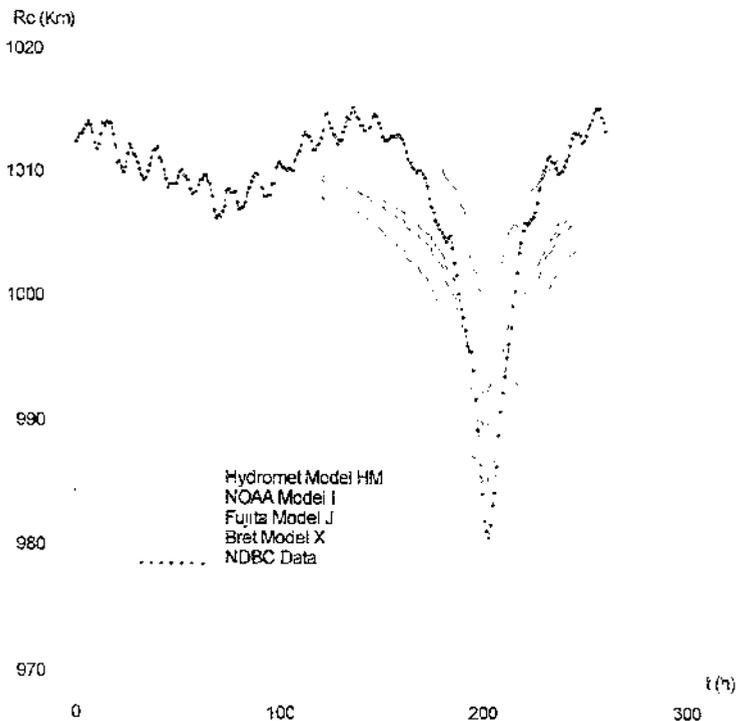


Figura 2.16 Perfil de presiones con respecto al tiempo para el huracán Floyd (1999).

**CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD POR
PRESENCIA DE HURACANES**

III ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD POR LA PRESENCIA DE HURACANES

III.1 Introducción

La presencia y acción de los huracanes sobre las costas mexicanas se traduce en un riesgo inminente para las poblaciones e infraestructura costera, con pérdidas millonarias a lo largo de las costas del Océano Pacífico, Golfo de México y Mar Caribe. Para poder cuantificar éste riesgo y su efecto potencial se utilizan modelos de riesgo desarrollados con bases estadísticas. Los avances recientes en modelado estadístico son una ayuda importante para la toma de decisiones bajo incertidumbre. Sin embargo, el proceso y la información requerida por estas técnicas para resolver problemas son, en forma general, aproximados, imprecisos y sujetos a cambio. Es casi imposible obtener datos estadísticos suficientes para representar fielmente cualquier problema que se presente.

Normalmente, la mayor parte del daño causado por la presencia y acción de los huracanes, cuando se aproximan a tierra, ocurre dentro de las primeras seis horas a partir de que se manifiestan las tormentas.

III.2 Panorama general del fenómeno

La destrucción ocasionada por los huracanes en los últimos años, especialmente en las zonas del Caribe Mexicano y en América Central, se ha caracterizado por cambiar constantemente las configuraciones costeras. El peligro aumenta al crearse una combinación de factores que acompañan a un huracán: aumento del nivel del mar, vientos extraordinarios y lluvias importantes.

Desde 1960 hasta 1988, La vertiente del Mar Caribe se ha visto afectada por diversos huracanes que han generado más de 20,000 muertes, además que han afectado a más de 6 millones de personas y han destruido infraestructura con un costo aproximado de 9.5 billones de dólares. Las zonas más dañadas en los últimos veinte años han sido las islas caribeñas y la península de Yucatán.

La información relacionada con daños asociados a la presencia de huracanes se ha recopilado desde finales de los años 30's; es notorio que mientras que la magnitud y fuerza destructiva parece no cambiar con el transcurso del tiempo, las poblaciones y asentamientos humanos han aumentado considerablemente en las zonas costeras de alto riesgo. En años recientes se observa que la tasa de damnificación por siniestro ha disminuido poco en los últimos años, debido a que las nuevas políticas de alertamiento, preparación y evacuación, se han implementado de manera lenta.

III.3 Antecedentes de vulnerabilidad por presencia de huracanes

Durante varios años la vulnerabilidad de las costas mexicanas por la presencia de huracanes ha sido una constante. Muchas de las edificaciones e infraestructura costera construidas a lo largo de las costas mexicanas no se han diseñado considerando un análisis de riesgo por la acción destructiva de los huracanes, de hecho muchas poblaciones costeras en constante crecimiento ignoran los efectos de los huracanes en su planeación y desarrollo.

Anteriormente los huracanes se consideraban como eventos sin ninguna frecuencia de presentación y las tormentas ocurridas en las zonas costeras no se relacionaban directamente al ciclo o temporada de generación de huracanes. Consecuentemente, tanto los dueños de las casas habitaciones como los gobiernos estatales no tomaban en cuenta el posible daño a causa de dicho fenómeno meteorológico y se limitaban a asegurar en algunas ocasiones, las propiedades pensando en un daño reparable y no en un daño irreversible.

Cuando las infraestructuras costeras se veían dañadas por alguna tormenta, las autoridades se limitaban a realizar reparaciones superficiales para así alcanzar solamente el estado estructural igual o menor al que se tenía antes de la tormenta, siendo que se deben de hacer mejoras en el estado de la infraestructura dañada para que pueda resistir en un futuro un evento similar o de mayor intensidad a los ocurridos.

El riesgo debido a la presencia de huracanes durante los últimos cincuenta años en México parece no ser suficiente para que las autoridades se preocupen por realizar o promover estudios sobre la materia, traduciéndose en un grave retraso en comparación con otros países de la región que cuentan con programas integrales de riesgo por presencia de huracanes.

Los huracanes Paulina (1997) en el Océano Pacífico y Gilberto (1988) en el Océano Atlántico, han sido los huracanes más intensos que han azotado las costas mexicanas en los últimos años. Ambos causaron pérdidas millonarias en infraestructura y cobraron un gran número de vidas humanas probando que, inclusive en los polos de mayor desarrollo (Acapulco y Cancún), el diseño de la infraestructura es inadecuado para resistir los embates de huracanes de gran magnitud.

III.4 Factores físicos de riesgo de los huracanes

III.4.1 Vientos ciclónicos

Los vientos generados por huracanes pueden alcanzar y sobrepasar los 250 km/h en el límite del radio de máximos vientos ciclostróficos, con rachas de más de 300 km/h. El poder destructivo del viento aumenta con respecto al cuadrado de la velocidad, esto significa que al triplicar la velocidad del viento el factor destructivo aumenta hasta en nueve veces.

El viento, ya sea por su impacto directo o por objetos arrastrados por él, como árboles, anuncios publicitarios, entre otros, es el fenómeno que produce la máxima destrucción en infraestructura en zonas costeras. De hecho se tiene documentado la pérdida de bosques completos debido a la fuerza del viento ciclónico que arranca los árboles de raíz.

Dado que la topografía juega un papel muy importante en la configuración del patrón de velocidades del viento, el viento se ve disminuido por obstáculos físicos y áreas abruptas como montañas y bosques, y que con los modelos numéricos se estima la velocidad del viento a 10 metros sobre el nivel del mar (msnm), se decidió definir como límite de influencia la topográfica de 200 m de altitud. En la figura 3.1 se muestra el límite geográfico de las zonas costeras, por debajo de 200 msnm, consideradas en este trabajo como las zonas vulnerables por presencia de huracanes. En dicha figura se puede observar que solo por topografía, la zona más expuesta de México a la acción y embate de los vientos huracanados es la vertiente del Atlántico.

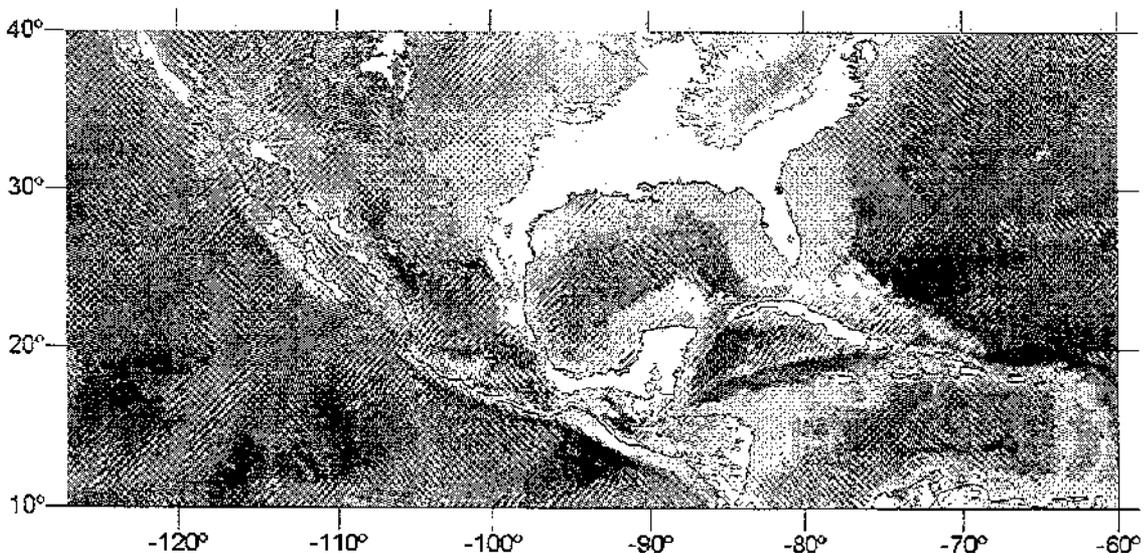


Figura 3.1 Límite de zonas de alta vulnerabilidad por presencia de vientos ciclónicos.

III.4.2 Lluvias e inundaciones

Las lluvias que acompañan a los huracanes varían de forma dramática y son muy difíciles de predecir. Estas pueden ser muy intensas y durar varios días o simplemente se pueden disipar en cuestión de horas. La topografía local, la humedad, y la velocidad del viento ciclónico son factores que afectan directamente a las precipitaciones por huracanes.

Las destrucciones que pueden ocurrir debido a la presencia de lluvias extraordinarias se pueden dividir en dos:

1. La más directa es cuando la lluvia se infiltra dentro de las estructuras, causando daños estructurales internos. Si la lluvia es persistente, las estructuras simplemente se colapsan debido al peso del agua absorbida, los deslaves de cuerpos sólidos como son macizos rocosos y grandes estructuras de suelo ocurren comúnmente, esto debido al sobresaturamiento de dichos cuerpos y a su eventual colapso por sobrepeso.
2. La más común forma de daño ocurre cuando se generan inundaciones tierra adentro, lo cual causa severos daños a la infraestructura y poblaciones, como son el caso de las vías de comunicación, las líneas telefónicas y las instalaciones eléctricas, por mencionar algunos casos.

III.4.3 Marea de tormenta

La marea de tormenta se define como una sobrelevación temporal del nivel del mar. Esta se debe principalmente a la conjunción de varios factores como: la fuerza de arrastre que el viento genera en el cuerpo de agua al aproximarse a la costa; el equilibrio hidrostático que el agua experimenta para equilibrar la depresión atmosférica; la superposición del oleaje, y la disminución del fondo marino. Se estima que por cada 100mb que disminuye la presión atmosférica en el huracán, el nivel del mar aumenta aproximadamente 1 m en la zona cercana al centro del huracán solamente por la disminución de presión.

La magnitud de la marea de tormenta en un sitio determinado está en función directa a los vientos ciclónicos máximos y a su configuración geométrica con respecto al radio ciclostrófico que se presente. Se debe de considerar también la configuración del fondo marino en las zonas de aguas poco profundas o someras.

La marea de tormenta ocasiona los daños más grandes y directos en las comunidades costeras, 90% de las muertes ocurridas en los grandes desastres históricos en los últimos veinte años sobre las costas mexicanas se deben a la presencia y acción de la marea de tormenta. Las inundaciones de una marea de tormenta afectan directamente a las zonas más bajas, extendiéndose hasta varios kilómetros tierra adentro.

III.4.4 Ocurrencia histórica e impacto de los huracanes en México

Los huracanes son la fuerza más destructiva que se puede presentar en la zona del Mar Caribe así como las tormentas tropicales menores que han archivado un sinnfn de eventos a través de los años.

Las consecuencias económicas y sociales generadas por efectos directos e indirectos de huracanes son casi siempre de gran magnitud, en especial para los países menos desarrollados donde gran porcentaje de la infraestructura existente no ha sido diseñada con estándares que consideren los efectos de este tipo de fenómenos.

Un ejemplo muy significativo es el huracán Gilberto, el cual comenzó como una onda tropical el 3 de septiembre de 1988 en las cercanías de la costa Norte de África, seis días después, el sistema cruzó el Atlántico y se convirtió en una tormenta tropical. Alcanzó las costas de Jamaica el 12 de septiembre con una categoría 3 (Saffir-Simpson) y se desplazó hacia el Oeste a lo largo de la isla ganando fuerza conforme se movía hacia el Noroeste, tocó la península de Yucatán el 14 de septiembre alcanzando la categoría de huracán clase 5. Para el 16 de septiembre perdió fuerza y se disipó en la costa Este de México. Los vientos sostenidos alcanzaron más de 250 km/h, la presión barométrica fue la menor jamás alcanzada en el hemisferio Norte con 888mb, el ojo alcanzó los 56km de diámetro. Cuando el huracán Gilberto tocó costas mexicanas generó una marca de tormenta de más de 4 metros y una lluvia extraordinaria de aproximadamente 400mm. En la figura 3.2 se presenta una imagen de satélite del aspecto del huracán Gilberto.



Figura 3.2 Foto de satélite del huracán Gilberto..

El gobierno de México reportó que el huracán Gilberto causó 200 muertes y aproximadamente 200,000 damnificados. La península de Yucatán sufrió grandes pérdidas en la infraestructura turística y en las extensiones de los arrecifes de coral y las playas, mientras que en el estado de Nuevo León, el área de Monterrey se vio afectada por extensas inundaciones, 100 personas murieron y 30,000 casas habitaciones fueron destruidas.

La tabla 3.1 muestra los daños humanos y económicos de algunos de los huracanes que se han presentado en la vertiente atlántica en los últimos 50 años.

Año	Mes	Muertes	Personas afectadas	Daños (miles de USD)	Nombre
1951	8	50	23000	15000	-
1955	9	300	15000	16000	Hilda
1955	9	500	32000	40000	Janeé
1960	10	960	16000	17000	-
1961	11	436	21000	18000	Tara
1966	10	14	80000	24000	Inez
1967	8	77	271000	184000	Katrina
1975	10	29	60000	24000	Olivia
1976	10	600	175000	100000	liza
1977	9	10	50000	30000	Anita
1982	9	225	50000	30000	Paul
1983	10	135	25000	19000	Tico
1988	9	240	100000	90000	Gilbert

Tabla 3.1 Daños sociales y económicos de la presencia de los huracanes en costas Mexicanas.

III.5 Manejo vulnerabilidad por presencia de huracanes

La vulnerabilidad por presencia de huracanes se estudia y maneja a partir de la generación de diferentes mapas oceanográficos que representen parámetros climatológicos propios de los huracanes como son: presiones, direcciones e intensidades de vientos, alturas de oleaje extraordinario e intensidades de inundaciones por marea de tormenta sobre las zonas costeras más vulnerables.

La creación de los mapas que contienen los parámetros físicos de los huracanes se realiza utilizando los modelos de presión, viento y oleaje significativo explicados a detalle en el capítulo anterior. Se generan cuatro mapas para cada diferente huracán, tanto para el Océano Pacífico como para el Atlántico de isobaras (igual valor de presiones), isotacas (igual valor de intensidades de viento) y para valores de alturas de oleaje con su periodo asociado.

III.5.1 Análisis histórico de huracanes

El primer análisis que se realiza para determinar la magnitud de vulnerabilidad de un sitio o zona determinada es la evaluación de los parámetros físicos más representativos de cada uno de los huracanes que se han presentado en dicha área geográfica de interés. Por ejemplo, se puede realizar un análisis de vulnerabilidad histórica para toda la zona del Golfo de México o para las costas de algún estado en particular.

Los parámetros físicos que aquí se consideran son: presiones, viento, oleaje y marca de tormenta. Como ejemplo, se presentan en las figuras 3.2 a 3.5 los mapas de presiones mínimas alcanzadas por los huracanes Pauline (1997), Gilbert (1988), Bertha (1996) y Opal (1995), respectivamente.

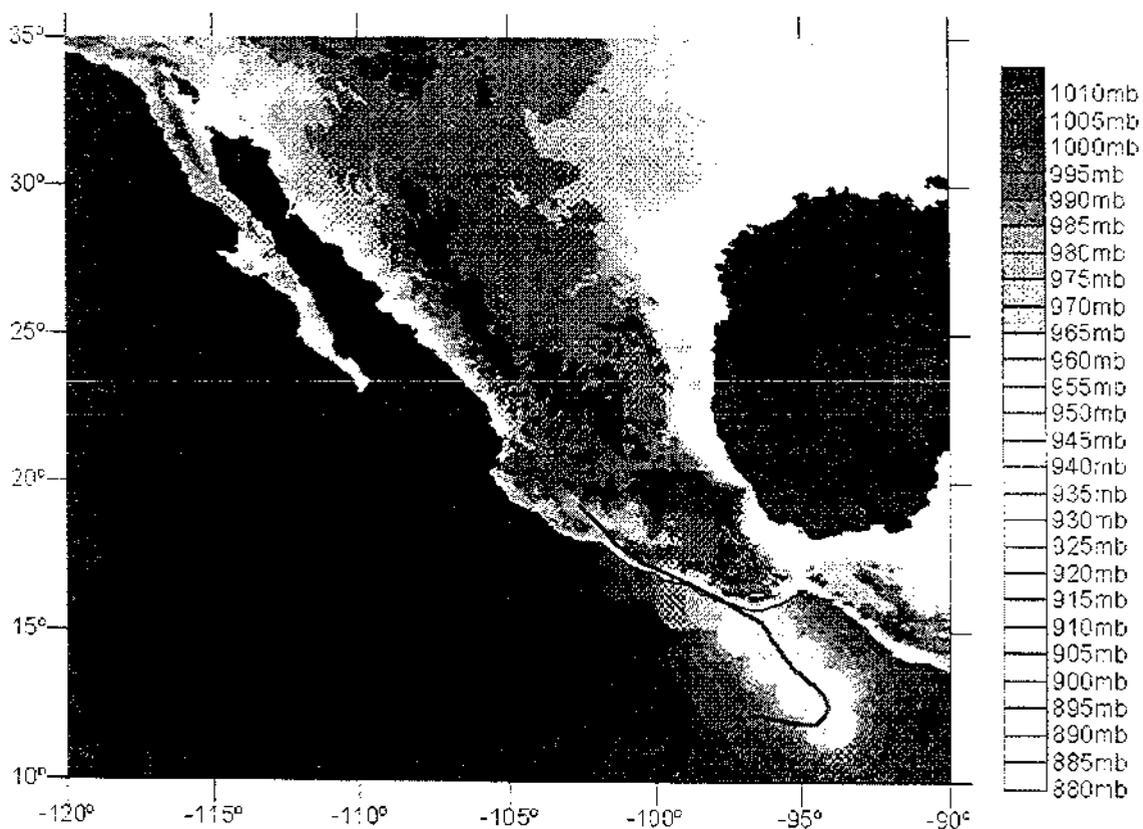


Figura 3.3 Mapa de presiones del huracán Pauline (1997).

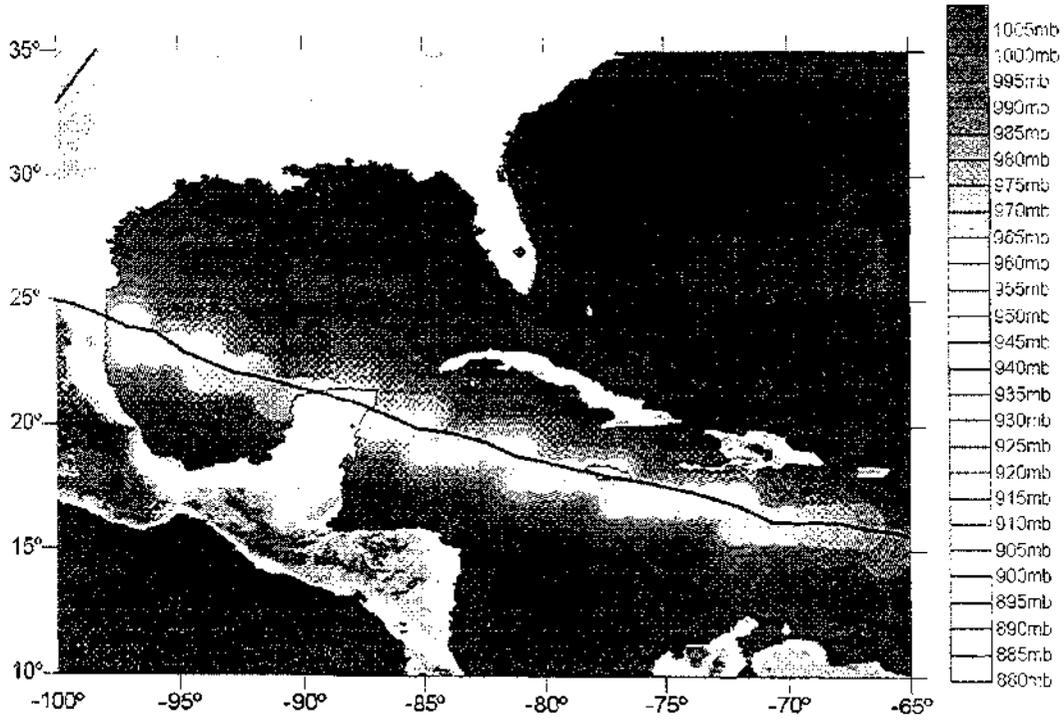


Figura 3.4 Mapa de presiones del huracán Gilbert (1988).

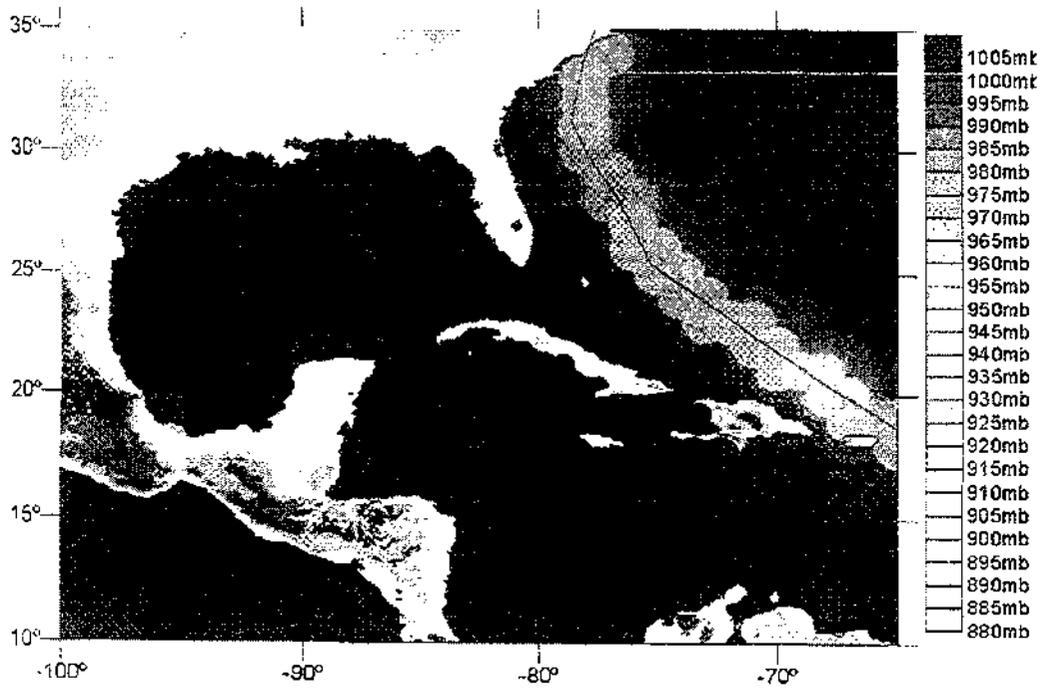


Figura 3.5 Mapa de presiones del huracán Bertha (1996).



Figura 3.6 Mapa de presiones del huracán Opal (1995).

Una vez generados todos los mapas de presiones, se obtiene un solo mapa para representar las presiones mínimas históricas que han ocurrido en una cierta zona. De esta manera se definen los diferentes niveles de vulnerabilidad, relacionando las presiones mínimas con la intensidad de los posibles huracanes que se pueden presentar en cada zona.

De la misma forma se procede para el caso de oleaje, viento y marea de tormenta. Como ejemplo, las figuras 3.6 a 3.9 muestran los mapas de altura de oleaje ocurrido para los huracanes Bertha (1996), Bret (1999), Georges (1998) y Floyd (1999), respectivamente, y las figuras 3.10 a 3.13 muestran los mapas de intensidades de viento ciclónico ocurrido para los huracanes Bertha (1996), Bret (1999), Georges (1988) y Opal (1995), respectivamente.

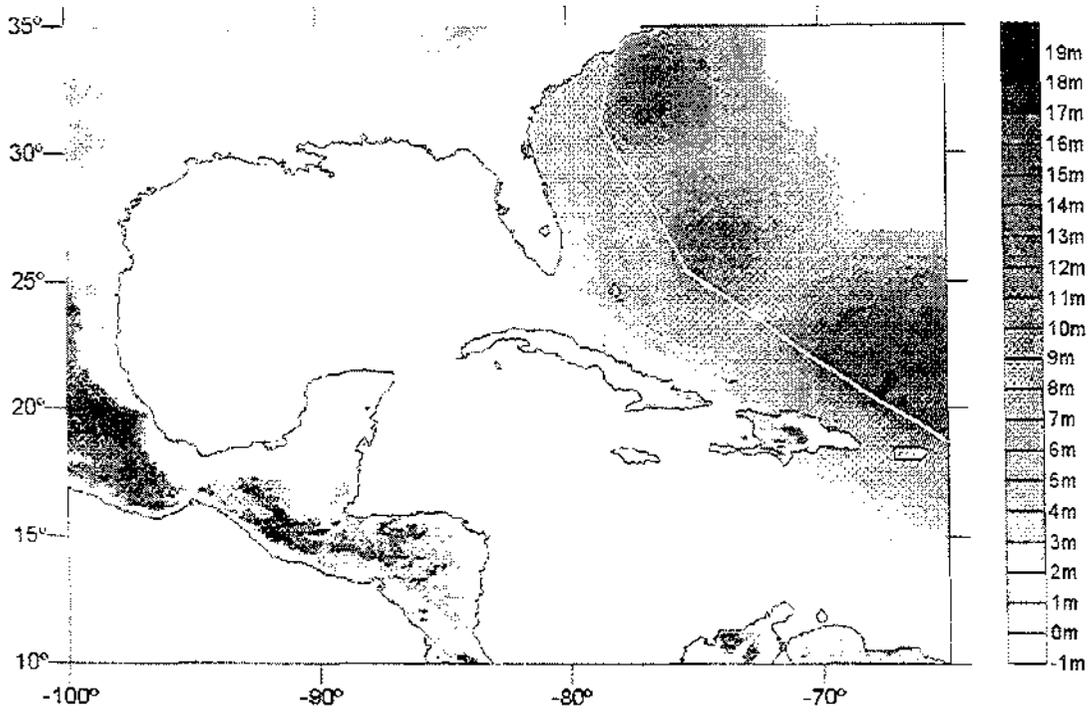


Figura 3.7 Mapa de alturas de oleaje generadas por el huracán Bertha (1996).

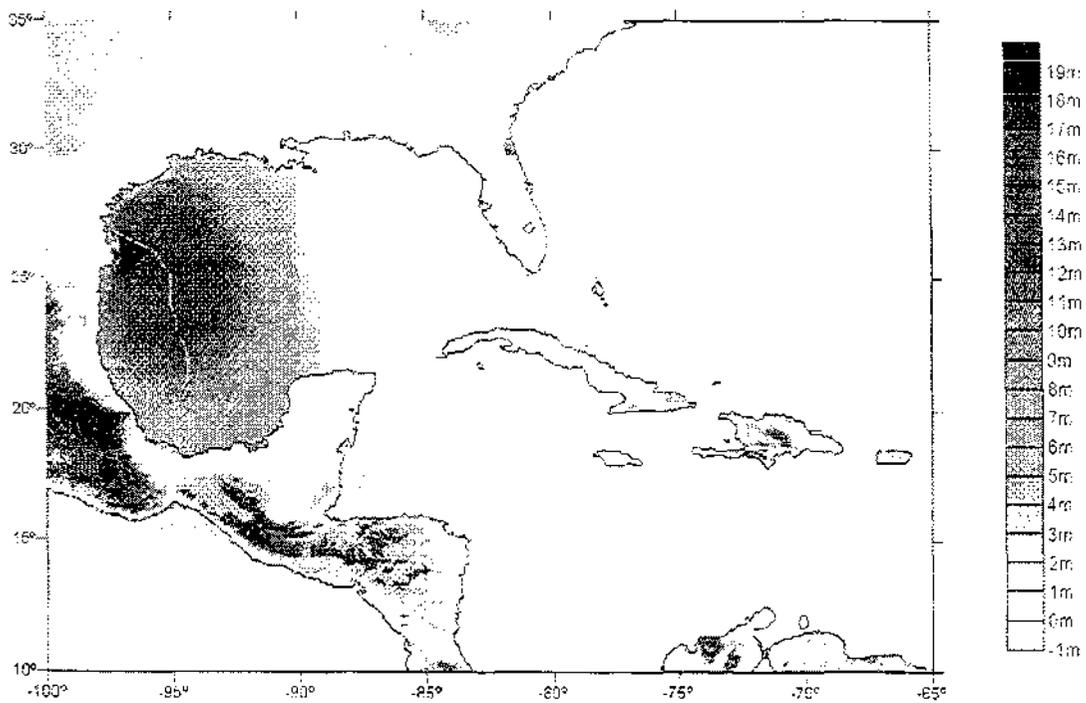


Figura 3.8 Mapa de alturas de oleaje generadas por el huracán Bret (1999).

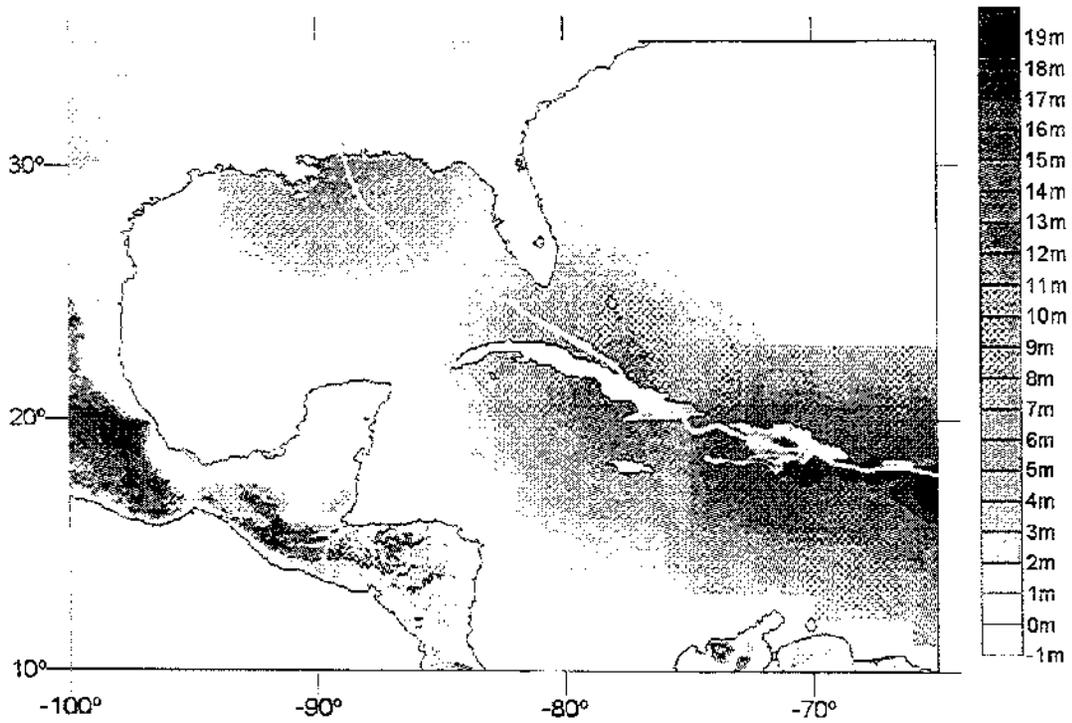


Figura 3.9 Mapa de alturas de oleaje generadas por el huracán Georges (1998).

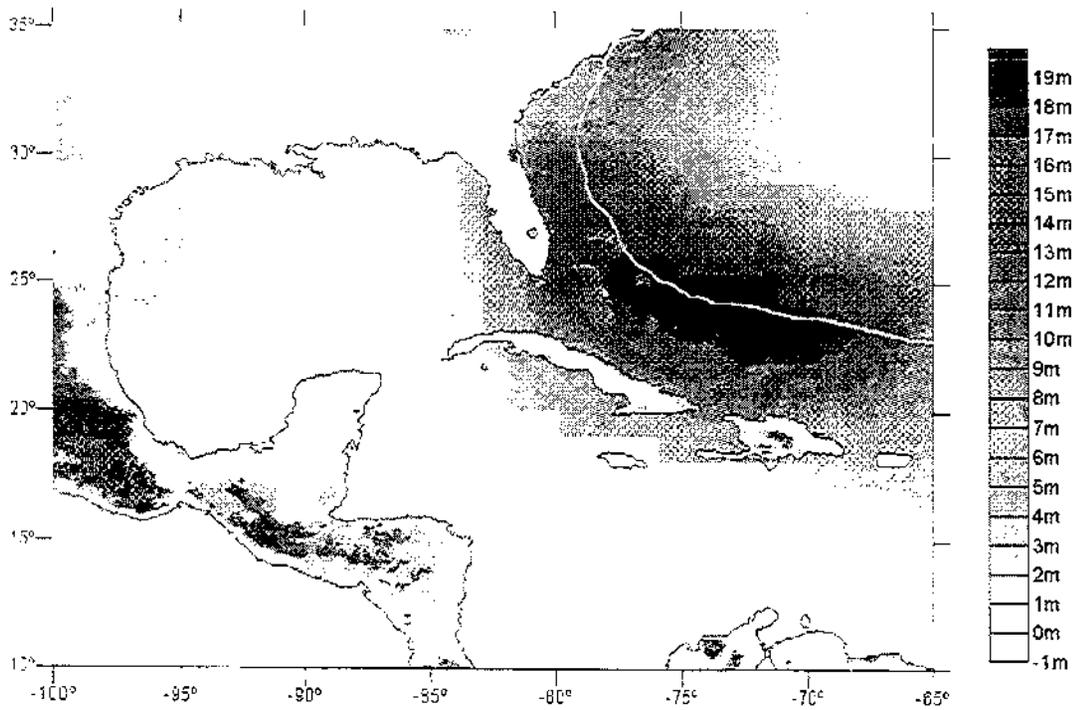


Figura 3.10 Mapa de alturas de oleaje generadas por el huracán Floyd (1999).

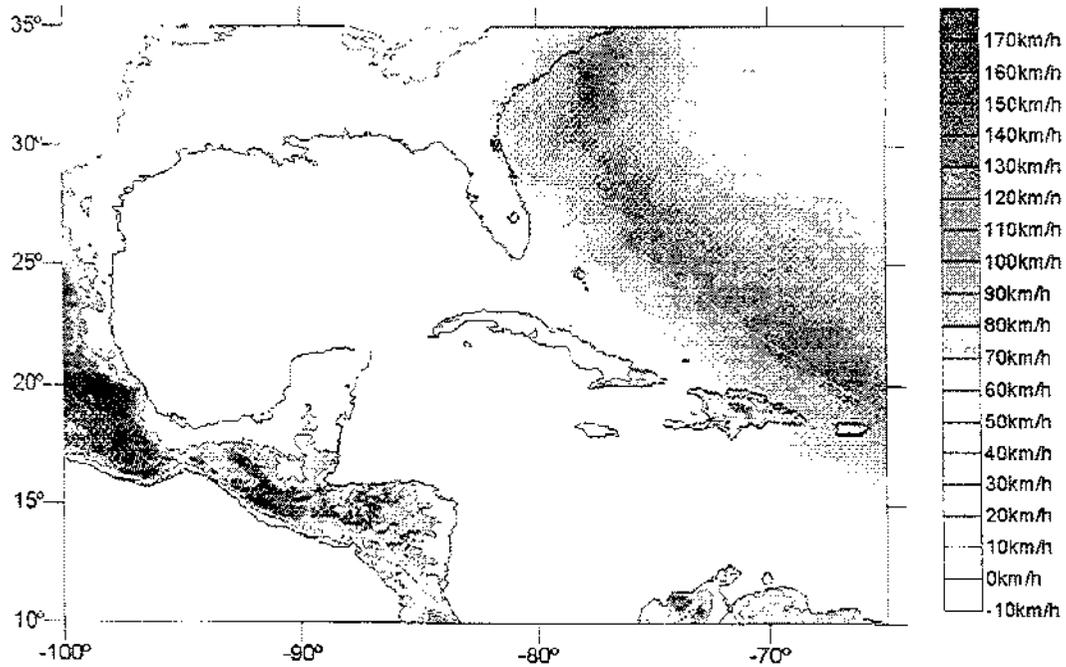


Figura 3.11 Mapa de velocidades del viento generadas por el huracán Bertha (1996).

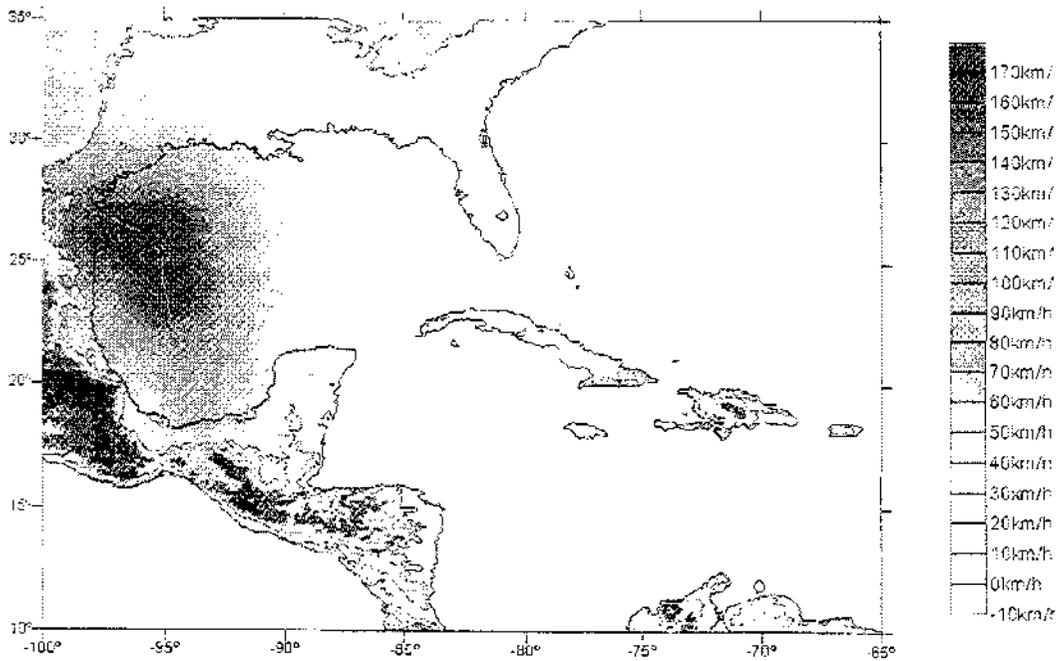


Figura 3.12 Mapa de velocidades del viento generadas por el huracán Bret (1999).

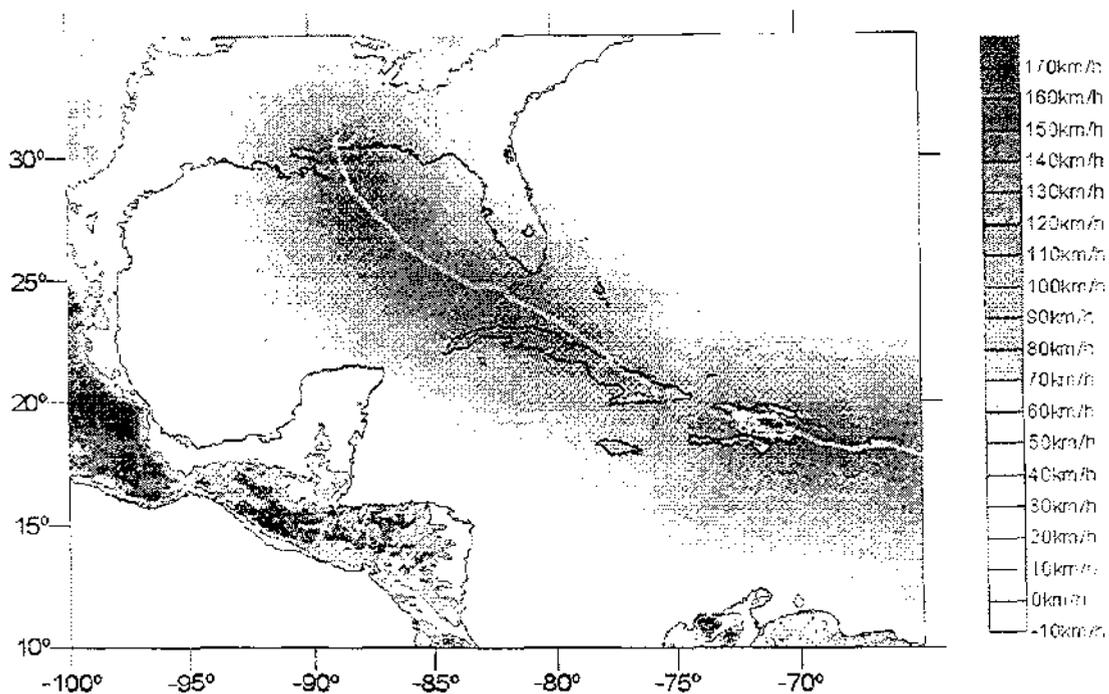


Figura 3.13 Mapa de velocidades del viento generadas por el huracán Georges (1998)

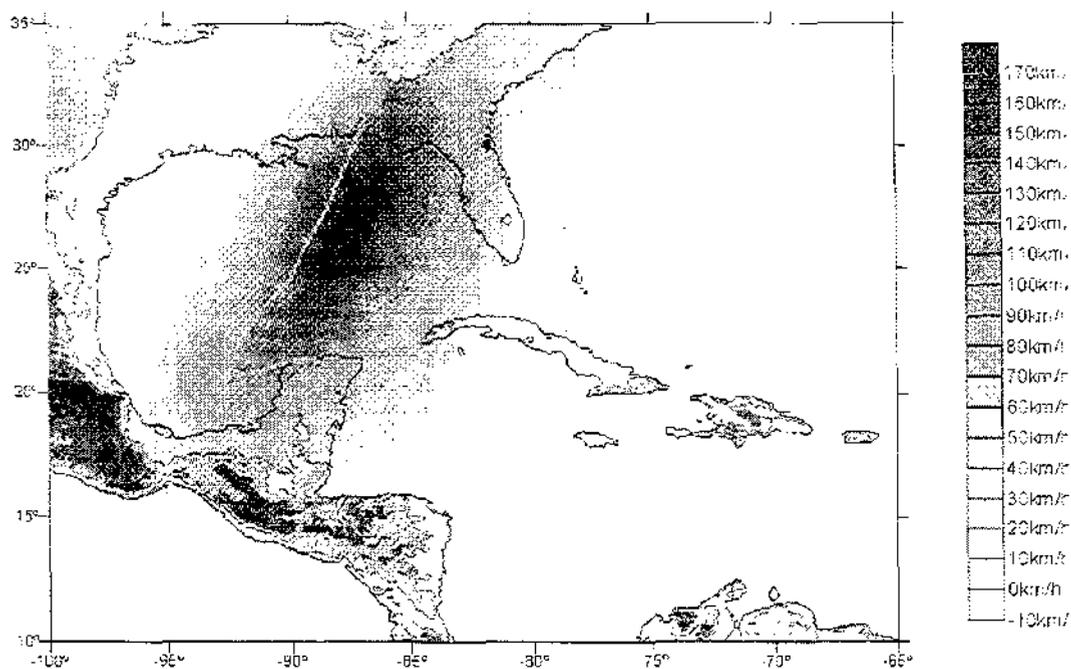


Figura 3.14 Mapa de velocidades del viento generadas por el huracán Opal (1995)

III.5.2 Cruce de información cartográfica con las zonas de vulnerabilidad

Una vez generados los mapas de presiones mínimas, vientos, oleaje y marea de tormenta, se asocian estos valores a la probabilidad de presentación de cada evento que los generó. De esta manera se tienen para cada parámetro una función estadística de presentación.

El siguiente paso consiste en la generación de mapas que contienen información sobre: infraestructura, poblaciones, recursos naturales, por citar algunos, asociados a la magnitud de verse modificados por la presencia de un fenómeno (i.e. oleaje, viento) de cierta intensidad.

Por último, se realiza un cruce de información entre ambos tipos de mapas generados, de tal forma que se pueda estimar la intensidad de daños o cambios sufridos con una probabilidad de presentación dada.

Para el análisis espacial se puede utilizar casi cualquier tipo de información cartográfica como carreteras, municipios, localidades, viviendas, infraestructura portuaria, líneas de electricidad, ríos, hospitales, etc. El cruce de información se realiza superponiendo la información cartográfica elegida con la intensidad de cada fenómeno para cada probabilidad de presentación deseada. De esta forma se pueden generar gráficas y tablas de información que relacionan información cartográfica con una vulnerabilidad dada.

En el capítulo siguiente se realiza el análisis de vulnerabilidad con base en lo tratado en éste capítulo y en la generación de nueva información

**CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD APLICADO A LA
PENÍNSULA DE YUCATÁN**

IV ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD APLICADO A LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

IV.1 Introducción

Históricamente, la península de Yucatán se ha visto afectada por la presencia de un gran número de huracanes altamente destructivos. El ejemplo más significativo se presenta en el año de 1988 con el paso del huracán Gilberto sobre las costas de los estados de Quintana Roo y Yucatán, donde los daños ocasionados a poblaciones, infraestructura y recursos naturales fueron muy significativos.

Es muy importante realizar un estudio de vulnerabilidad sobre la península de Yucatán. Primeramente, ésta es una zona de muy poca altitud y prácticamente sin ninguna elevación superior a los 200 msnm, lo cual permite la libre entrada de cualquier tormenta o huracán que se aproxime, además la disipación generada por la topografía de la península es muy pequeña. En segundo lugar, la península de Yucatán se encuentra en la entrada sur del golfo de México, lo cual la hace ser una zona de alto índice de ocurrencia de huracanes y un "obstáculo natural" para un gran número de eventos meteorológicos. En tercer lugar, la zona peninsular del sureste de México se ha visto altamente poblada debido al gran desarrollo en el ámbito turístico, arqueológico y costero experimentado en los últimos años. Las zonas más importantes económicamente hablando son las costas de Quintana Roo, especialmente: Cancún; la zona costera del sur; conocida como Riviera Maya; las zonas arqueológicas de Chichén Itzá, Xel-Ha y Tulum; el puerto Progreso al norte, y; por supuesto la ciudad de Mérida, donde se tiene un porcentaje muy alto de entradas de divisas extranjeras al país.

El estudio de vulnerabilidad se realizó en cuatro etapas principales, las cuales son:

1. Se realizó un estudio histórico con todos los huracanes que se han presentado en el área de influencia de la península de Yucatán, obteniendo parámetros meteorológicos históricos, como son la altura de ola máxima histórica, las presiones mínimas históricas y los vientos máximos históricos en toda la zona, y de esa manera tener parámetros de vulnerabilidad histórica en la península y el mar circundante.
2. Posteriormente, se realizó un estudio estadístico de ocurrencia de eventos históricos e intensidad que éstos presentaron, todos estos asociados a su posición geográfica. Con esta información se determinaron zonas de influencia para diferentes intensidades de huracanes, permitiendo crear un mapa que resume las zonas de afectación sobre toda la península.

3. Se realizó un estudio estadístico de afectación sobre poblaciones e infraestructura.
4. Finalmente se realizó un análisis extremal con los datos generados para cada huracán de presión mínima, altura de ola máxima y viento ciclónico máximo

El estudio de vulnerabilidad desarrollado en éste capítulo, también ha permitido establecer un criterio para el "Sistema de Alertamiento Temprana", el cual es aplicado a zonas costeras susceptibles de ser afectados por la presencia de huracanes. Teniendo una posición previsible de un huracán y en función de cierto rango de velocidades preestablecidas, este sistema de alertamiento permite la determinación a través de circunferencias de las posibles zonas de afectación. lo cual hace muy sencilla la determinación de los poblados y el grado de vulnerabilidad al que están expuestos.

IV.2 Estudio histórico de presencia de huracanes en la península

La península de Yucatán ha sufrido el embate de 86 huracanes, de diversas intensidades, entre los años de 1949 y 2001. Las trayectorias e intensidades de los eventos parecen no tener un patrón bien definido ni una duración predecible, por lo que se optó por generar mapas que representen las alturas de oleaje, los vientos ciclostróficos y las presiones mínimas para todos los huracanes que han afectado la zona. La información océano-meteorológica se obtuvo usando los modelos descritos en el segundo capítulo de esta tesis. La tabla 4.1 muestra el nombre de los huracanes que ocurrieron históricamente en la zona de estudio, delimitada por -92° a -85° en longitud y 17° a 29° en latitud.

No.	Nombre	Año	No.	Nombre	Año	No.	Nombre	Año	No.	Nombre	Año
1	S/N	1949	26	HATTIE	1961	51	CAROLINE	1975	76	ARLENE	1993
2	S/N	1949	27	NOT	1964	52	ELOISE	1975	77	GERT	1993
3	BAKER	1950	28	HILDA	1964	53	SUBTROP	1976	78	ALBERTO	1994
4	HOW	1950	29	ISBELL	1964	54	FRIEDA	1977	79	ALLISON	1995
5	ITEM	1950	30	S/N	1964	55	BESS	1978	80	OPAL	1995
6	CHARLIE	1951	31	S/N	1965	56	DEBRA	1978	81	ROXANNE	1995
7	HOW	1951	32	DEBBIE	1965	57	GRETA	1978	82	DOLLY	1996
8	NOT	1952	33	INEZ	1966	58	CLAUDETTE	1979	83	KYLE	1996
9	ALICE	1953	34	BEULAH	1967	59	FREDERIC	1979	84	MITCH	1998
10	NOT	1953	35	ABBY	1968	60	HENRI	1979	85	HARVEY	1999
11	FLORENCE	1953	36	CAMILLE	1969	61	ALLEN	1980	86	KATRINA	1999
12	HAZEL	1953	37	SUBTROP	1969	62	HERMINE	1980			
13	HILDA	1955	38	LAURIE	1969	63	JEANNE	1980			
14	JANET	1955	39	BECKY	1970	64	ALBERTO	1982			
15	NOT	1956	40	CELIA	1970	65	DANNY	1985			
16	DORA	1956	41	ELLA	1970	66	ELENA	1985			
17	FLOSSY	1956	42	GRETA	1970	67	JUAN	1985			
18	DEBBIE	1957	43	CHLOE	1971	68	DEBBY	1988			
19	ELLA	1958	44	EDITH	1971	69	FLORENCE	1988			
20	ARLENE	1959	45	LAURA	1971	70	GILBERT	1988			
21	IRENE	1959	46	AGNES	1972	71	KEITH	1988			
22	JUDITH	1959	47	BRENDA	1973	72	CHANTAL	1989			
23	ABBY	1960	48	DELIA	1973	73	KAREN	1989			
24	ETHEL	1960	49	SUBTROP	1974	74	DIANA	1990			
25	CARLA	1961	50	CARMEN	1974	75	FABIAN	1991			

Tabla 4.1 Nombre y año de los huracanes que se han afectado a la península de Yucatán

Para la generación de los mapas de presiones mínimas, velocidades de viento máximas y oleaje máximo, asociados a cada uno de los 86 huracanes que han afectado la zona en estudio, se utilizó el modelo Hydromet. Posteriormente, con la información generada se elaboraron los mapas de alturas de ola máxima, viento ciclostrofico máximo y presiones mínimas históricas.

En la figura 4.1 se presenta el mapa de presiones mínimas históricas que han afectado la Península de Yucatán. En esta figura se puede observar que sobre la parte Norte, Este y Noreste de la península de Yucatán se han presentado las presiones mínimas.

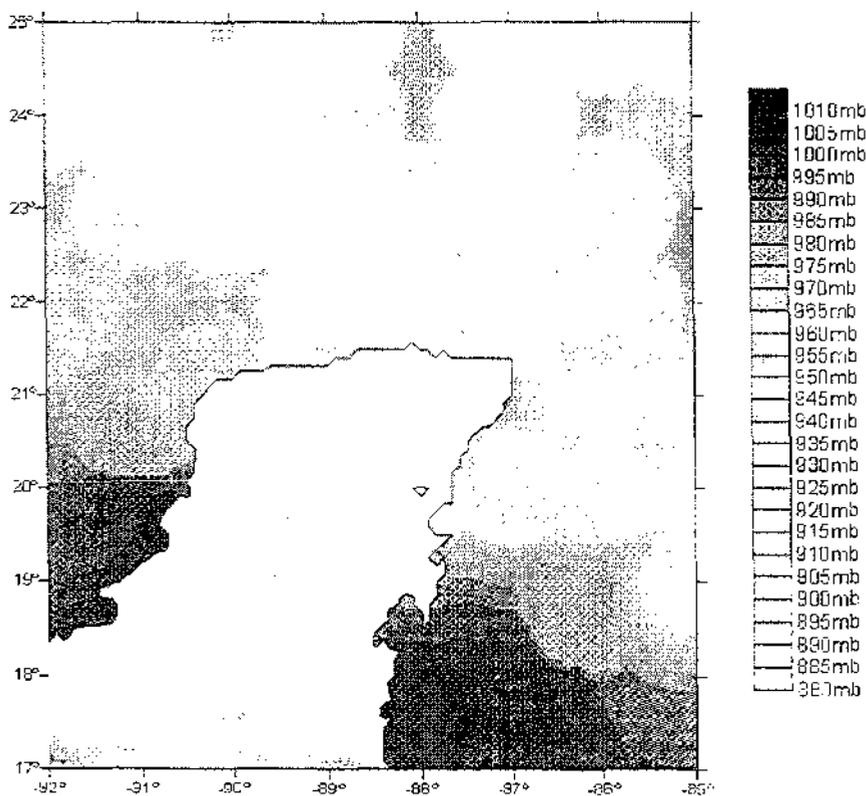


Figura 4.1 Presión mínima histórica sobre la península de Yucatán.

En la figura 4.2 se presentan los resultados para altura de ola máxima histórica. Al igual que en el mapa de presiones mínimas, se puede observar la fuerte tendencia de los efectos generados por huracanes de alta intensidad en la parte Norte y Noreste de la península. Por otro lado, es notorio el amortiguamiento del oleaje por la presencia de una barrera natural, formada por un arrecife de coral, que funciona como protección y en contraste con la falta de alguna protección natural de esta magnitud en el resto del litoral.

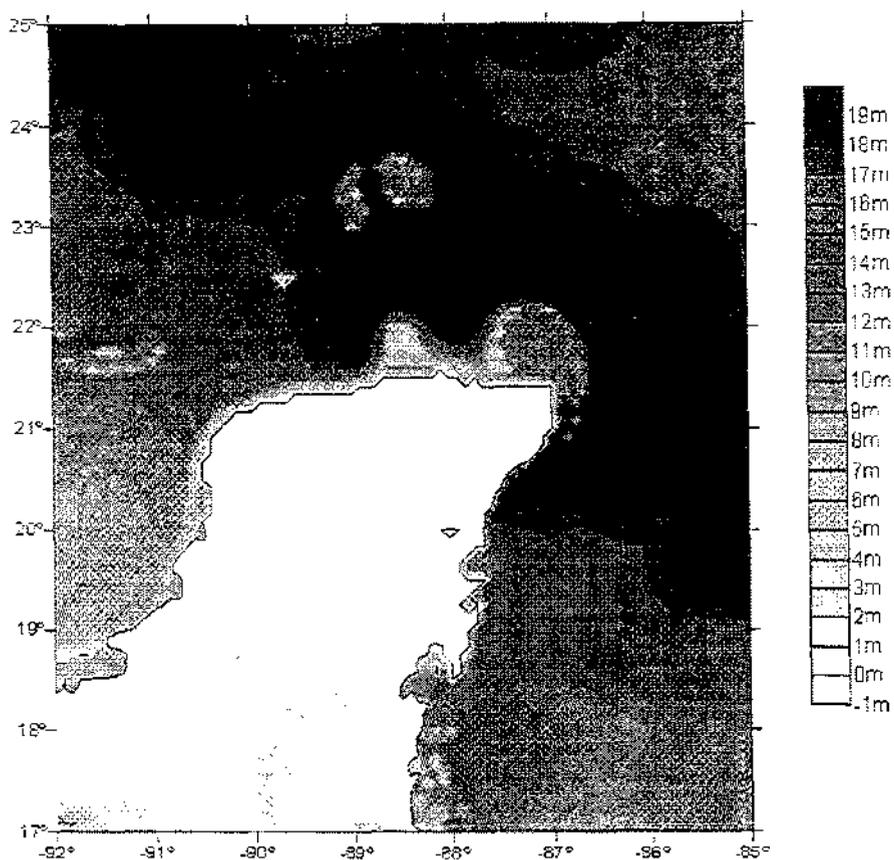


Figura 4.2 Altura de ola máxima histórica sobre la península de Yucatán.

La figura 4.3 muestra el mapa correspondiente al estudio histórico de vientos máximos presentados en la península de Yucatán. Se observa la severa afectación que tiene gran parte de la península debido a que no se tiene ninguna elevación geográfica mayor a 200 msnm en la zona, lo que permite la libre entrada de los vientos ciclónicos sobre la parte Norte y Noreste de Quintana Roo principalmente.

El estudio histórico presentado permite delimitar la zona Noreste de la península de Yucatán como la zona más expuesta a la acción de los huracanes, y por ende la tiene un índice de vulnerable más alto.

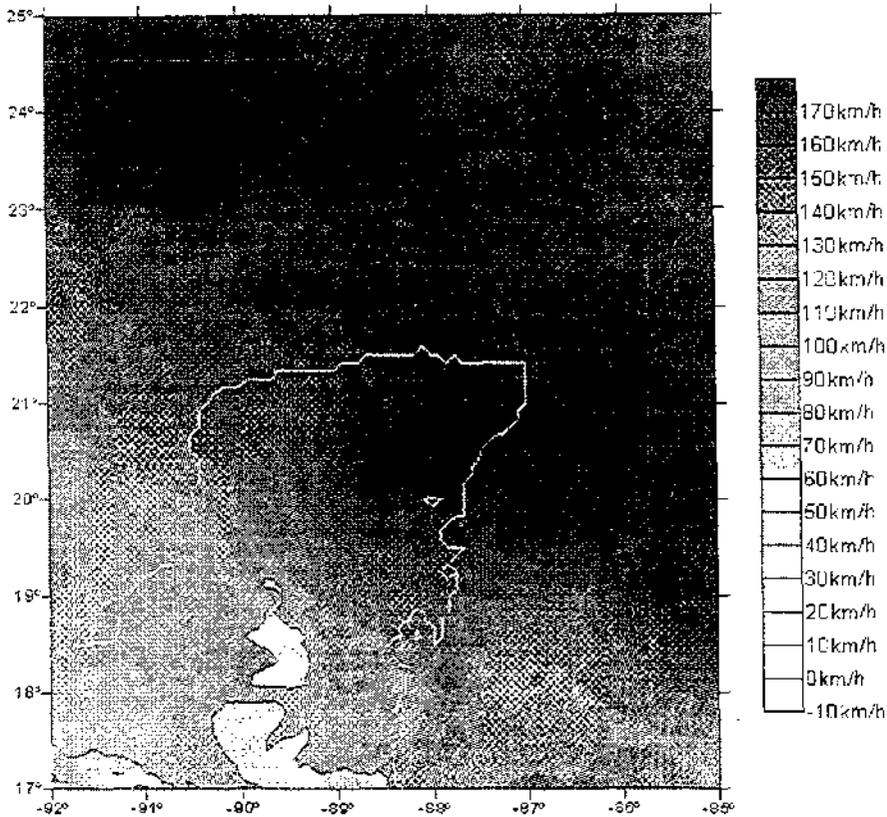


Figura 4.3 Intensidad de viento ciclónico máximo histórica sobre la península de Yucatán.

IV.3 Análisis estadístico de ocurrencia de eventos históricos

En el apartado anterior, se mencionó que han ocurrido 86 huracanes en la zona de estudio para la península de Yucatán. Cada uno de estos huracanes está relacionado con una base de datos que contiene la posición geográfica de cada aviso (a cada 6 horas), la intensidad (Saffir-Simpson), la presión central, la velocidad de desplazamiento y la fecha y hora de ocurrencia. Debido a que el número de avisos para los 86 huracanes con los que se trabajó es muy grande, se tomó la decisión de dividir la zona de estudio en cuadrantes, como se muestra en la figura 4.4, siendo estos: primer cuadrante (-92° a -88.5° longitud, 21° a 25° latitud), segundo cuadrante (-88.5° a -85° longitud, 21° a 25° latitud), tercer cuadrante (-92° a -88.5° longitud, 17° a 21° latitud) y cuarto cuadrante (-88.5° a -85° longitud, 17° a 21° latitud).

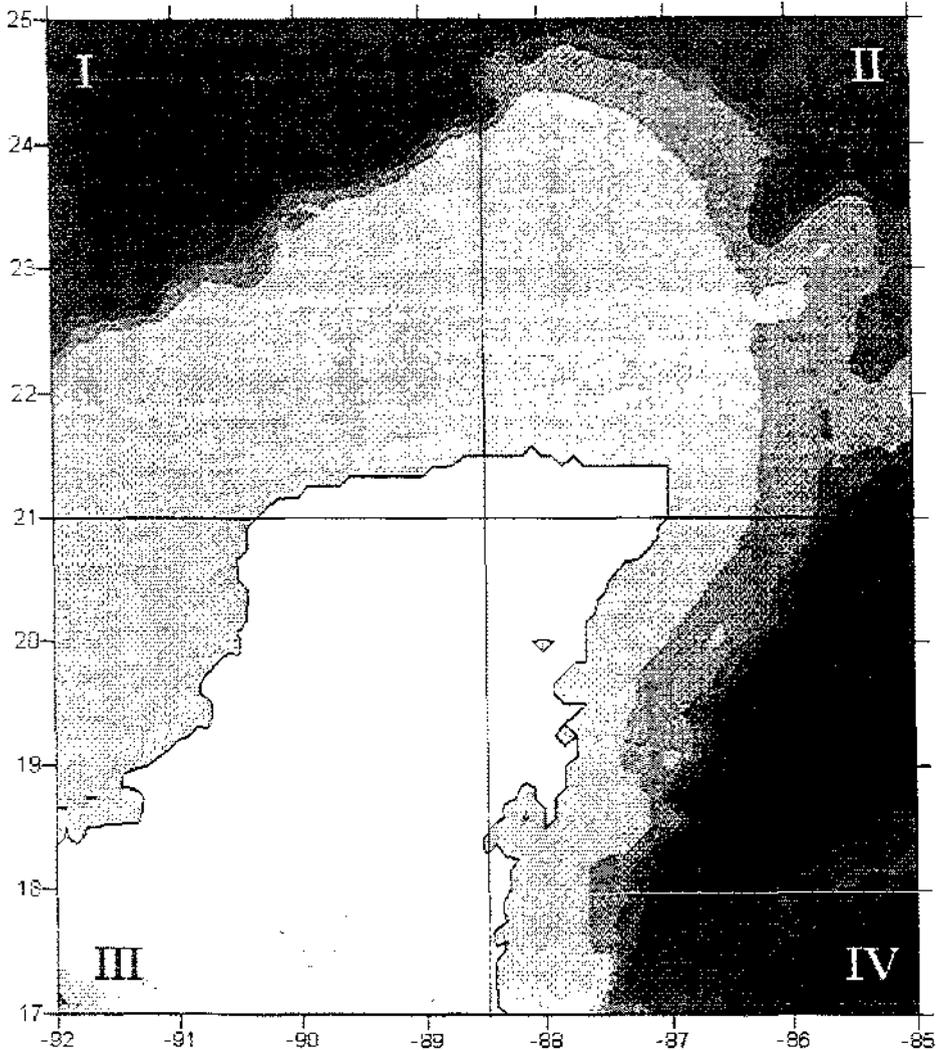


Figura 4.4 División en cuadrantes del área de estudio.

Con base en la escala Saffir-Simpson, para cada cuadrante se seleccionaron los eventos que afectaron cada una de las áreas. Una vez identificados los huracanes, se procedió a generar los histogramas de ocurrencia de huracanes de cierto umbral. El análisis arrojó los resultados que se muestran en las tablas 4.2 a la 4.5 y en las figuras 4.5 a 4.8.

De la tabla 4.2 se observa que para el primer cuadrante se reportaron un total de 139 avisos en el periodo de estudio, cada aviso es representativo de 6 horas. Es notoria la ocurrencia moderada de huracanes intensos, menos del 25% de los avisos están asociados a huracanes clase 3 o superior. en contraste con un gran número de depresiones tropicales y huracanes clase 1. Lo anterior no implica que esta zona no sea vulnerable, ya que en muchas ocasiones las lluvias más importantes están asociadas a ciclones de baja intensidad

Primer cuadrante

Clase	Descripción	No.	%
1	Tormenta tropical	0	0
2	Depresión Tropical	48	34.5
3	Huracán Clase 1	43	30.9
4	Huracán Clase 2	17	12.2
5	Huracán Clase 3	13	9.4
6	Huracán Clase 4	11	7.9
7	Huracán Clase 5	7	5.1
		139	100

Tabla 4.2 Número y probabilidad de ocurrencia de los avisos para el primer cuadrante

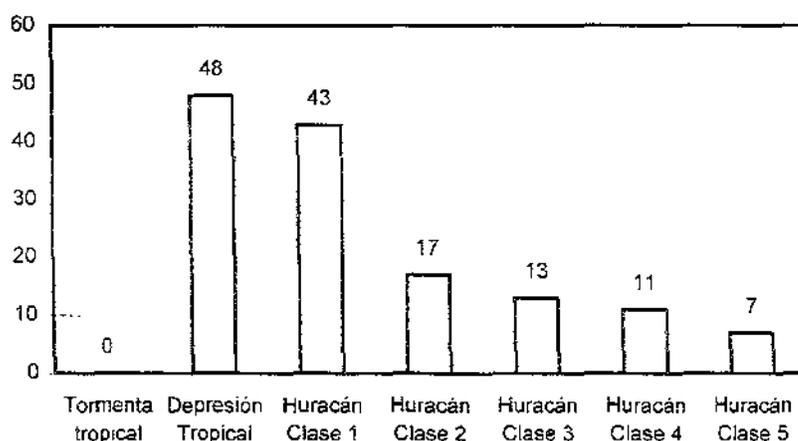


Figura 4.5 Probabilidad de ocurrencia de huracanes sobre el primer cuadrante.

En el segundo cuadrante se reportaron un total de 157 avisos, que a diferencia del primer cuadrante, son las tormentas se presentan con mayor frecuencia. En el segundo cuadrante dominan los huracanes de intensidad clase 1 y las depresiones tropicales, siendo moderado el número de tormentas de alta intensidad, se reportaron 20 avisos de huracanes con intensidad asociada a clase 3 o superior.

Segundo cuadrante

Clase	Descripción	No.	%
1	Tormenta tropical	0	0
2	Depresión Tropical	56	36.2
3	Huracán Clase 1	69	43.7
4	Huracán Clase 2	12	7.5
5	Huracán Clase 3	8	5.1
6	Huracán Clase 4	10	6.3
7	Huracán Clase 5	2	1.2
		157	100

Tabla 4.3 Número y probabilidad de ocurrencia de los avisos para el segundo cuadrante.

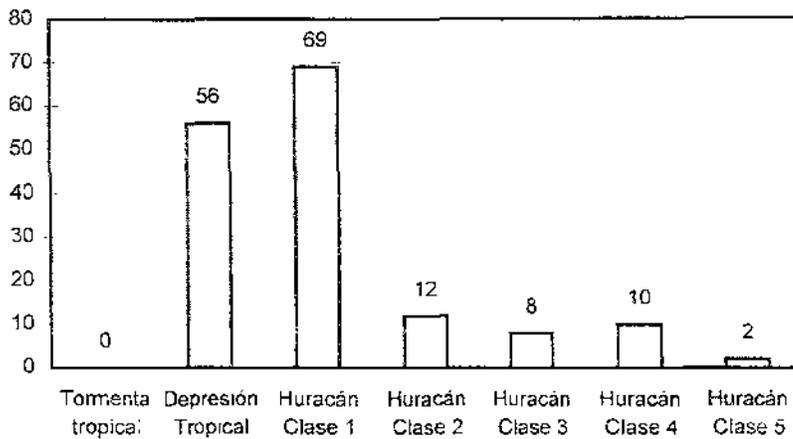


Figura 4.6 Probabilidad de ocurrencia de huracanes sobre el segundo cuadrante.

Los resultados para el tercer cuadrante muestran que esta zona es la más protegida, con una tendencia de huracanes de alta intensidad mucho menor que los dos cuadrantes anteriores. La razón de esta tendencia se debe a que la zona se encuentra mucho más protegida por el efecto de la topografía de la península, y por tanto los huracanes que sobrepasan el tercer cuadrante llegan con menos energía. El tercer cuadrante registró un total de 90 avisos con la probabilidad máxima de 47.8% para huracanes clase 1 y probabilidades nulas para huracanes clase 4 y clase 5.

Este tercer cuadrante se clasifica como la zona menos vulnerable y consecuentemente la menos dañada por la presencia de huracanes intensos.

Tercer cuadrante

Clase	Descripción	No.	%
1	Tormenta tropical	0	0
2	Depresión Tropical	29	32.2
3	Huracán Clase 1	43	47.8
4	Huracán Clase 2	11	12.2
5	Huracán Clase 3	7	7.8
6	Huracán Clase 4	0	0
7	Huracán Clase 5	0	0
		90	100

Tabla 4.4 Número y probabilidad de ocurrencia de los avisos para el tercer cuadrante.

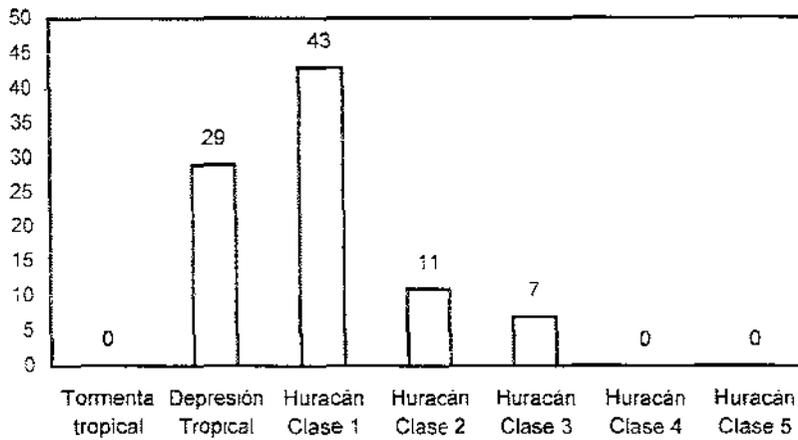


Figura 4.7 Probabilidad de ocurrencia de huracanes sobre el tercer cuadrante

El cuarto cuadrante es el que presentó números de ocurrencia más significativos, comparado con los tres anteriores, un total de 168 avisos fueron registrados y a pesar de que se presentaron 56% de depresiones tropicales, los huracanes clase 1 y clase 2 suman un total de 50 eventos y los clase 3, 4 y 5 un total de 24 eventos siendo la zona más vulnerable de todas y en donde se han presentado los eventos más destructivos en los últimos 50 años.

Se concluye que el cuarto cuadrante es la zona más vulnerable de la península de Yucatán, mientras que el tercer cuadrante es la zona menos desprotegida, la ocurrencia de un gran número de tormentas tropicales no se compara con los eventos de huracanes clase 4 y 5 desde el punto de vista que las fuerzas destructivas crecen exponencialmente desde un huracán clase 1 hasta uno clase 5.

Clase	Descripción	No.	%
1	Tormenta tropical	0	0
2	Depresión Tropical	94	56
3	Huracán Clase 1	43	25.5
4	Huracán Clase 2	7	4.2
5	Huracán Clase 3	10	6
6	Huracán Clase 4	6	3.6
7	Huracán Clase 5	8	4.7
		168	100

Tabla 4.5 Número y probabilidad de ocurrencia de avisos para el cuarto cuadrante.

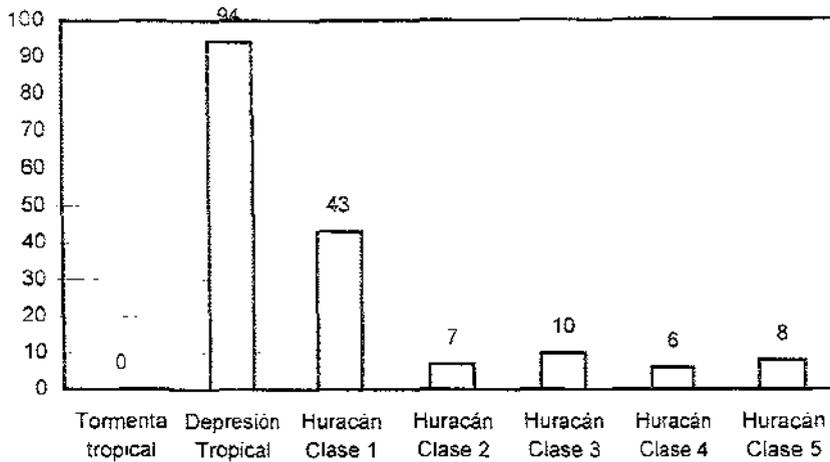


Figura 4.8 Probabilidad de ocurrencia de huracanes sobre el cuarto cuadrante

IV.4 Análisis geográfico para la determinación de zonas de vulnerabilidad

En este apartado se describe la determinación de zonas geográficas de vulnerabilidad a través de un análisis histórico. Utilizando la misma metodología del apartado anterior, se dispuso a trabajar en cuadrantes para mejor manejo de los datos, pero en éste caso se realizó un análisis espacial para zonas de concentración de intensidades.

Para cada cuadrante se tomaron los avisos históricos de las bases de datos, ya que cada aviso contiene información sobre su ubicación geográfica, lo cual hizo posible realizar una referencia cartográfica sobre las cuatro zonas de estudio, se visualizó en forma general la disposición de avisos en cada mapa y se generaron diferentes áreas de influencia para cada punto o puntos de misma intensidad. Los mapas resultantes muestran áreas de variadas formas relacionadas a las 7 intensidades diferentes que se han presentado históricamente (depresión tropical a huracán clase 5).

El primer cuadrante muestra una evidente concentración de eventos con intensidad de tormenta tropical y solo pequeñas concentraciones de eventos tipo huracán clase 1 o mayores, en la parte cercana a la costa Noroeste de la península se observa un área de afectación principalmente de depresiones tropicales y huracanes clase 1. La figura 4.9 muestra la concentración y las áreas de vulnerabilidad generadas.

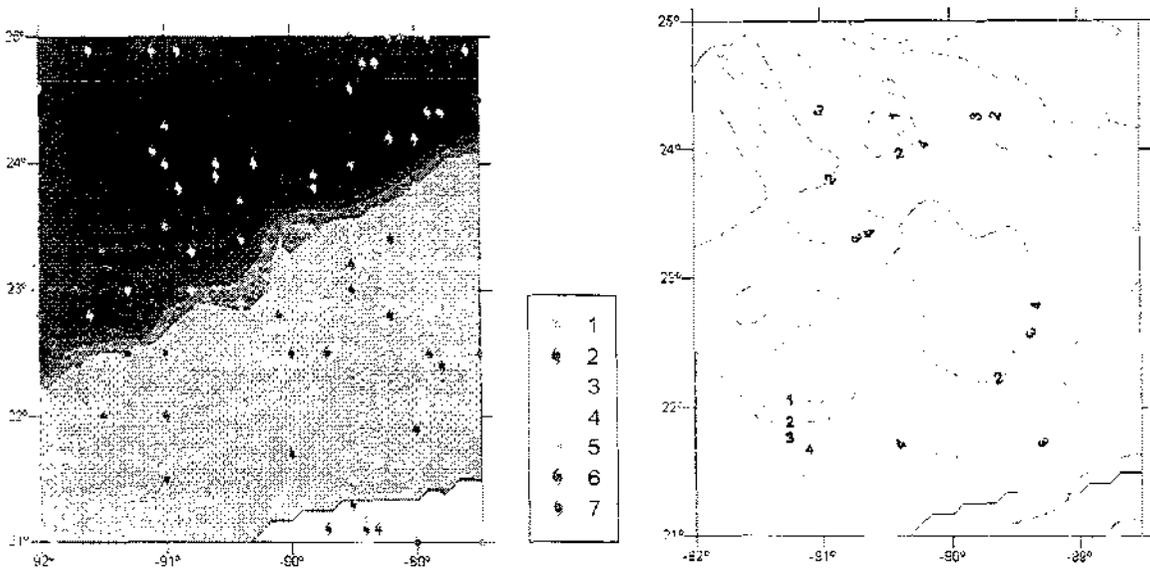


Figura 4.9 Concentración de eventos por intensidad y áreas de vulnerabilidad generadas para el primer cuadrante.

La figura 4.10 muestra el mapa de áreas de vulnerabilidad y el mapa de concentraciones de eventos con intensidades asociadas para el segundo cuadrante de cálculo. El segundo cuadrante muestra una dispersión de puntos muy errática, con una concentración de eventos intensos en la parte Sudeste y pequeñas lagunas correspondientes a tormentas tropicales sobre las aguas del Mar Caribe.

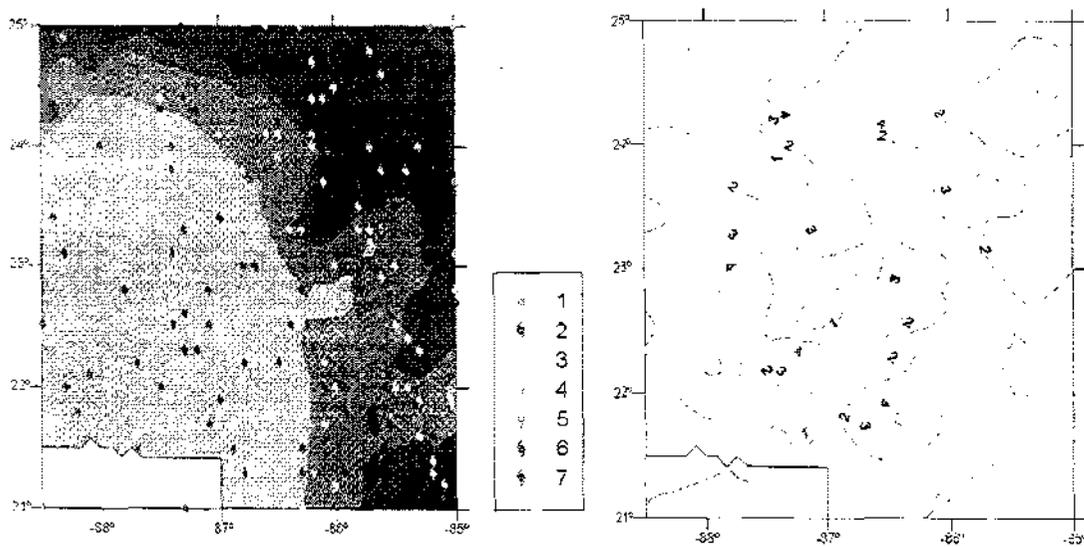


Figura 4.10 Concentración de eventos por intensidad y áreas de vulnerabilidad generadas para el segundo cuadrante.

La generación del mapa de áreas vulnerables para el segundo cuadrante arrojó como resultado que las costas de la punta Norte de la península son de alta susceptibilidad a eventos de intensidades de huracanes clase 2 a clase 4, mientras que tierra adentro en la punta Noreste se define una zona de vulnerabilidad relacionada con tormentas tropicales principalmente.

Es importante considerar que el segundo cuadrante define el espacio que se encuentra entre la punta de la península de Yucatán y la isla de Cuba, traduciéndose en una zona muy "transitada" por eventos meteorológicos que siguen ésta entrada natural al Golfo de México de forma abierta y sin tener ningún obstáculo aparente, siendo esto la causa de una concentración de eventos importantes a considerar para la navegación y tránsito de aeronaves.

En la figura 4.11 se muestra la concentración de avisos y las áreas de vulnerabilidad analizadas para el tercer cuadrante. Como se pudo observar en el apartado anterior, el tercer cuadrante es una zona poco vulnerable, debido a la poca ocurrencia de eventos intensos, contando con solo un número representativo de eventos relacionados con tormentas tropicales a todo lo largo de la costa Oeste de la península. El tercer cuadrante está protegido por un mayor relieve de toda la península de Yucatán, esto se traduce directamente en tener poca ocurrencia de eventos destructivos tierra adentro de la península. Los eventos se concentran en las costas de Campeche y parte de Yucatán, pero sin llegar a ser zonas de gran importancia en cuanto a destructividad se refiere.

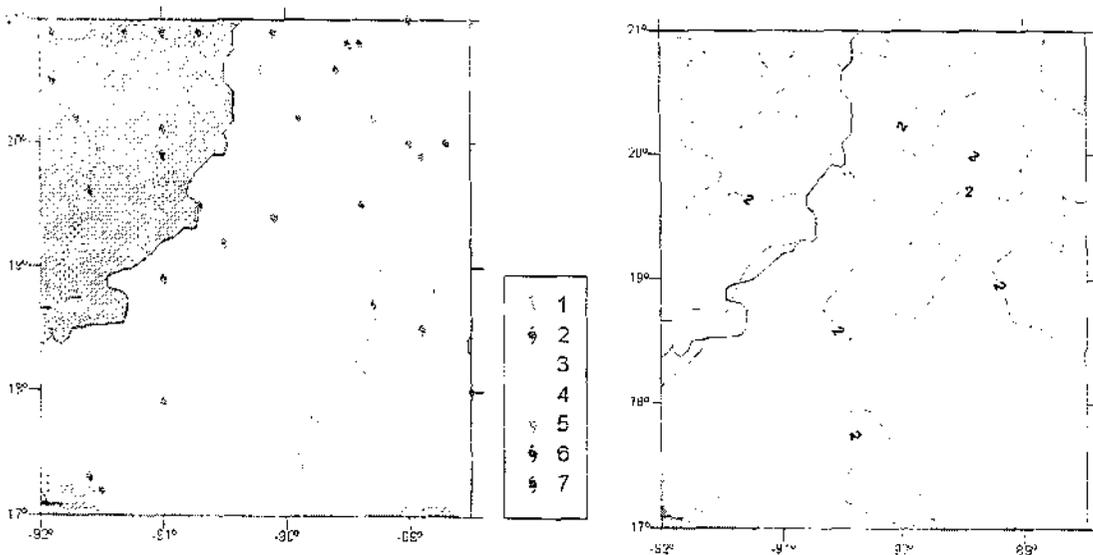


Figura 4.11 Concentración de eventos por intensidad y áreas de vulnerabilidad generadas para el tercer cuadrante

En la figura 4.12 se presentan los eventos y su concentración, así como las zonas de influencia generadas para cada intensidad. La zona más vulnerable al ataque directo de huracanes intensos es la que corresponde al cuarto cuadrante, presentando una gran concentración de huracanes de intensidad clase 3 a clase 5 frente a las costas de Quintana Roo y el Mar Caribe. Los huracanes entran de forma abierta y se aproximan tierra adentro sin encontrar ningún obstáculo significativo que pueda atenuar su intensidad. Las zonas turísticas más importantes como la de Cancún se encuentra en una de las zonas de más alta vulnerabilidad y destructividad. En la parte Noroeste del cuadrante, se forma una franja de aproximadamente 10km de longitud.

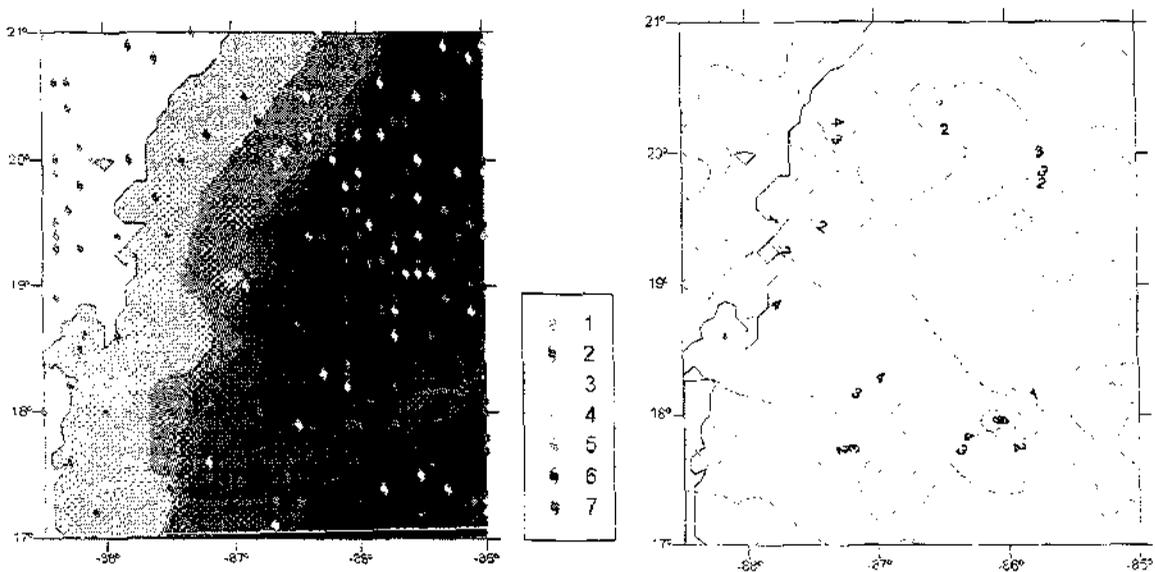


Figura 4.12 Concentración de eventos por intensidad y áreas de vulnerabilidad generadas para el cuarto cuadrante.

La visualización en conjunto de las cuatro áreas de vulnerabilidad permiten realizar un análisis espacial mucho más exhaustivo. Al integrar los cuatro cuadrantes se obtiene un solo mapa de zonas de vulnerabilidad, relacionadas con cada intensidad, que se superpone a un mapa de división estatal y municipal de la península de Yucatán, y que contiene la localización geográficamente referenciada de las principales localidades con información de población e infraestructura (viviendas, urbanización, electricidad, agua potable, etc.).

Se optó por realizar el análisis espacial de las localidades dentro de la península en tres grandes rangos: las que entran en la zona de vulnerabilidad que va desde una tormenta tropical hasta un huracán clase 1, las localidades que entran en el rango de un huracán clase 1 hasta un huracán clase 3 y finalmente las localidades que se encuentran dentro de la zona de vulnerabilidad que comprende a los huracanes de intensidad clase 3 hasta los de intensidad clase 5.

La figura 4.13 muestra el cruce de información de las zonas de vulnerabilidad generadas contra el mapa de municipios y localidades de la península de Yucatán.

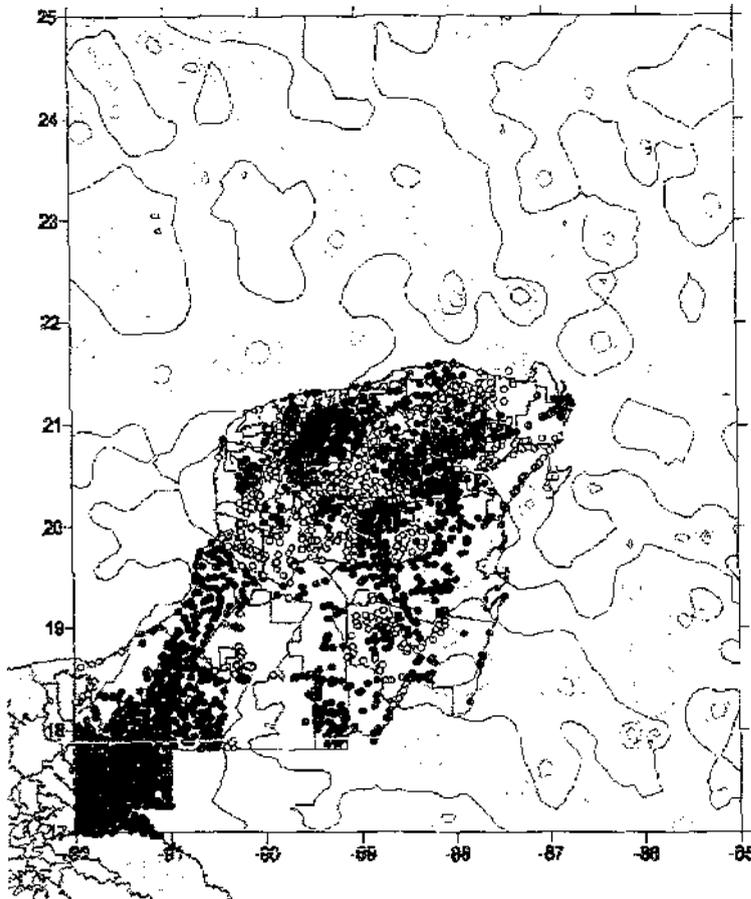


Figura 4.13 Cruce del mapa de áreas de vulnerabilidad contra el mapa de localidades y municipios.

Los tres grandes rangos se representan en los colores azul, amarillo y rojo para las zonas de vulnerabilidad de tormenta tropical a huracán clase 1, huracán clase 1 a huracán clase 3 y huracán clase 3 a huracán clase 5 respectivamente.

Se observa una zona de baja intensidad en la parte Suroeste de la península, en gran parte debido a que ésta zona comienza a presentar una altitud geográfica significativa, lo cual se traduce en tener una barrera natural que disipa energía de los huracanes. La segunda zona generada definida como vulnerabilidad media, se observa que forma una línea de influencia que prácticamente divide por la mitad al estado de Yucatán y parte de Quintana Roo. La zona Noroeste de la península de Yucatán es también una zona de vulnerabilidad media. La zona de más alta vulnerabilidad comienza en la punta Noreste de la península de Yucatán y se mueve a lo largo de la franja delimitada por la segunda zona de vulnerabilidad en su parte media. La ciudad de Cancún, las principales zonas arqueológicas de Quintana Roo y parte

de la ciudad de Mérida se encuentran dentro de la zona de más alta vulnerabilidad, así como la parte Sur de Quintana Roo.

Se realizó un análisis de vulnerabilidad para las localidades potencialmente afectadas de la península de Yucatán. Para cada uno de los municipios, se tomó el número de localidades afectadas con los datos de población y número de viviendas registradas a fin de encontrar el nombre del municipio y nivel de vulnerabilidad para cada zona y poder visualizar las poblaciones e infraestructura en posible afectación.

Se generaron tablas de resultados para cada estado y zona de vulnerabilidad y posteriormente se graficaron los resultados generales, mismos que se muestran a continuación en la tabla 4.6, para la primera zona de afectación (de tormenta tropical a huracán clase 1). Las figuras 4.14 a 4.16 muestran los resultados gráficos para la zona de vulnerabilidad 1 (baja vulnerabilidad).

	Número de localidades	Población	Viviendas
Campeche	534	388765	83603
Chiapas	409	113186	15849
Quintana Roo	328	497966	116235
Tabasco	338	137696	29051
Yucatán	382	407453	78911
Total	1991	1545066	323649

Tabla 4.6 Resultados del análisis de vulnerabilidad para la zona 1

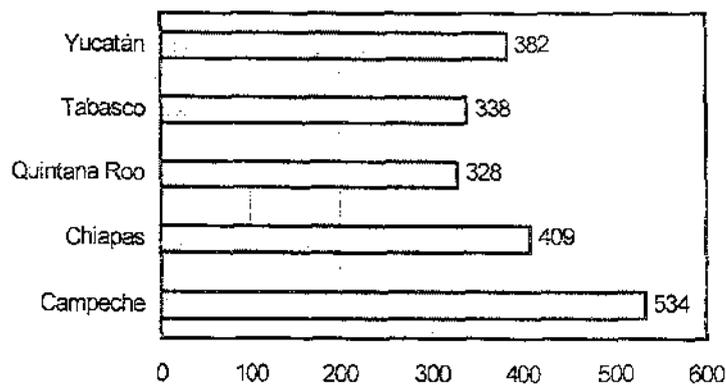


Figura 4.14 Número de localidades en posible afectación en la zona 1

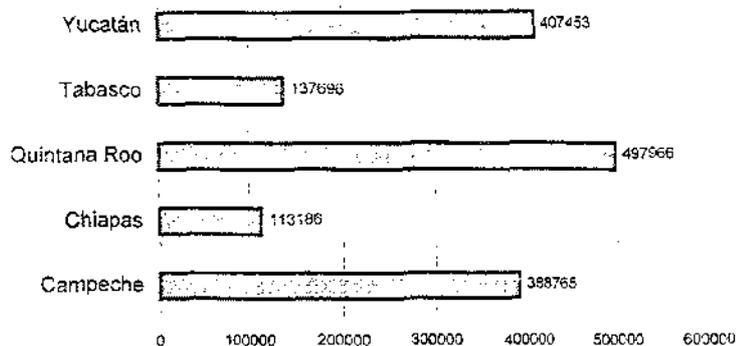


Figura 4.15 Población en posible afectación en la zona 1.

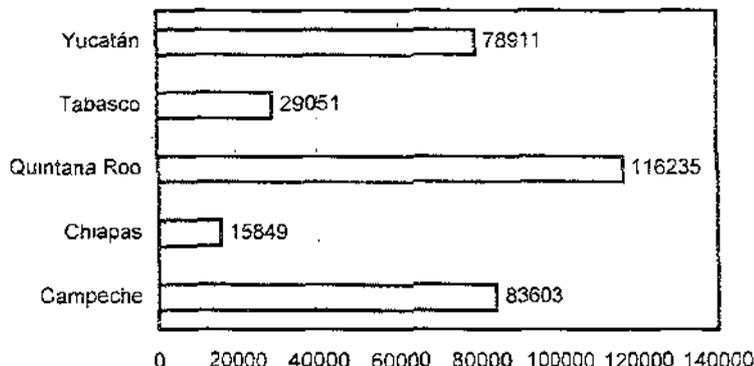


Figura 4.16 Viviendas particulares en posible afectación en la zona 1.

Para la zona 2 (vulnerabilidad media), se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 4.7 y en las gráficas 4.17 a 4.19. la zona de vulnerabilidad media solamente afectó a los estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán con un total de 580 localidades en posible riesgo por presencia de huracanes. Se observa que la población del estado de Yucatán son más vulnerables por la presencia de huracanes clase 1 a clase 3.

	Número de localidades	Población	Viviendas
Campeche	131	222210	47386
Quintana Roo	101	61061	13436
Yucatán	348	882926	196934
Total	580	1166197	257756

Tabla 4.7 Resultados del análisis de vulnerabilidad para la zona 2.

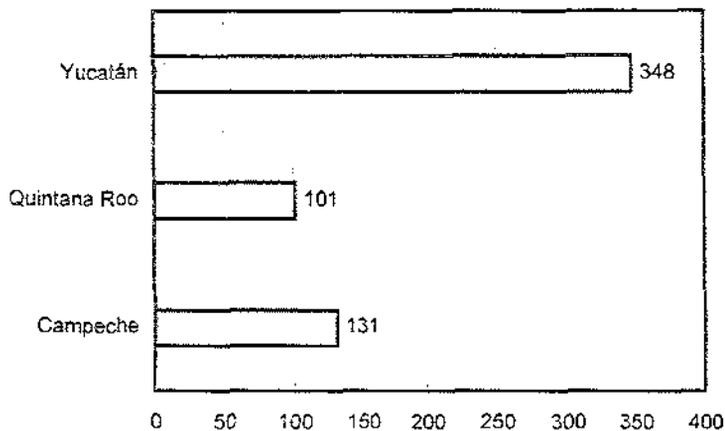


Figura 4.17 Número de localidades en posible afectación en la zona 2

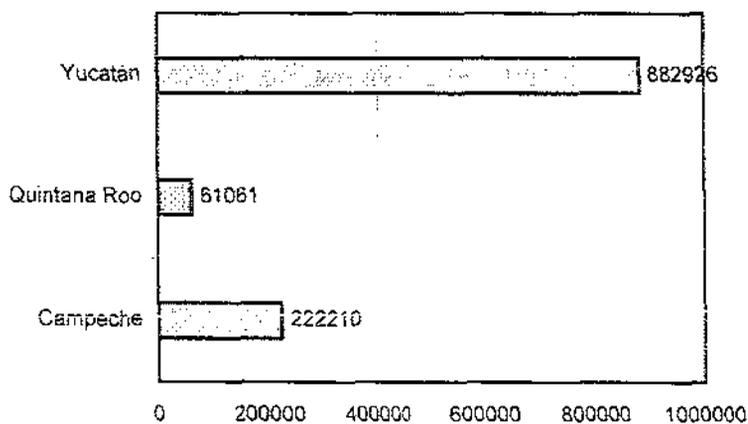


Figura 4.18 Población en posible afectación en la zona 2.

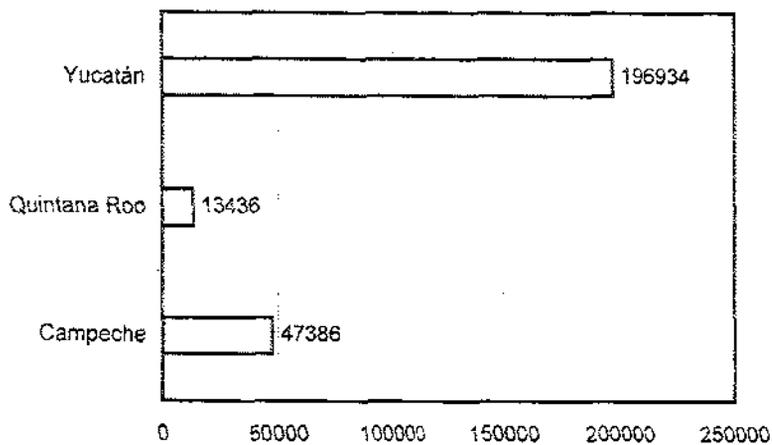


Figura 4.19 Viviendas particulares en posible afectación en la zona 2.

La zona de alta vulnerabilidad definida como zona 2, arroja un total de 630 localidades en posible riesgo, mostradas en el resumen de la tabla 4.8. Los estados de Yucatán y Quintana Roo son los más afectados históricamente por huracanes intensos que van de clase 3 a clase 5, mientras que el estado de Campeche solo presenta 14 localidades en posible afectación por presencia de dichos huracanes. Las figuras 4.20 a 4.22 presentan los resultados obtenidos.

	Número de localidades	Población	Viviendas
Campeche	14	9015	1625
Quintana Roo	328	497966	116235
Yucatán	288	218146	42719
Total	630	725127	160579

Tabla 4.8 Resultados del análisis de vulnerabilidad para la zona 3.

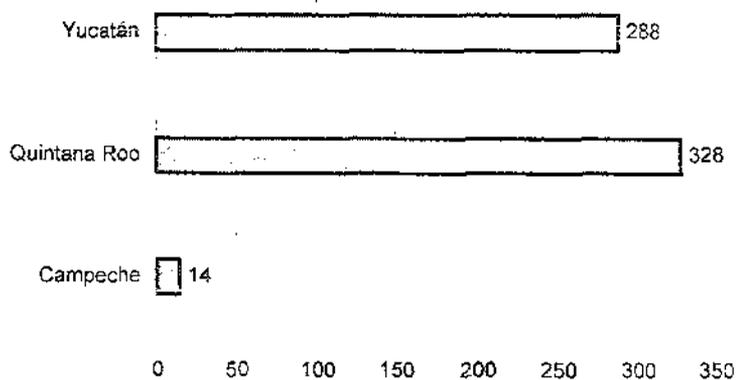


Figura 4.20 Número de localidades en posible afectación en la zona 3.

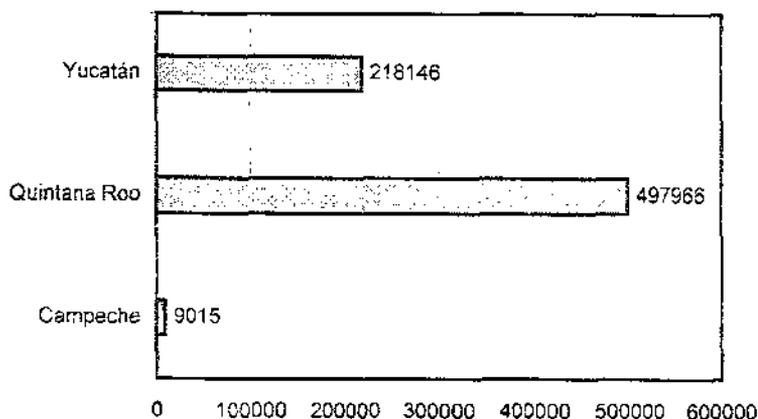


Figura 4.21 Población en posible afectación en la zona 3.

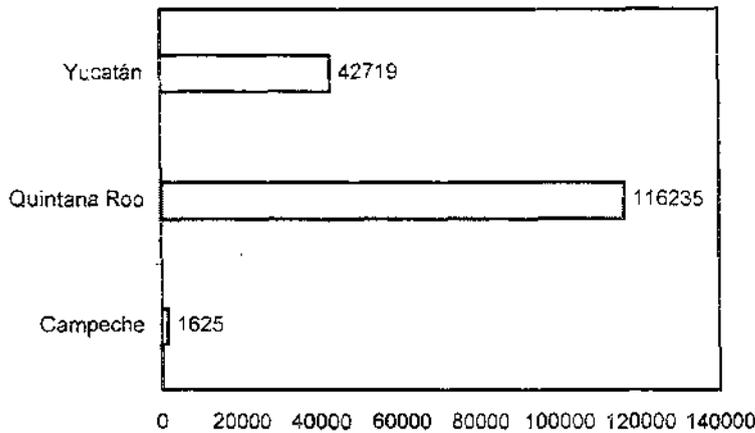


Figura 4.22 Viviendas particulares en posible afectación en la zona 3.

IV.5 Análisis extremal de presión oleaje y viento.

Como estudio complementario al análisis de vulnerabilidad sobre la península de Yucatán, se realizó un estudio de análisis extremal para datos de presión mínima, altura de ola máxima y viento ciclónico máximo, a fin de obtener los parámetros de huracán mencionados para un periodo de retorno dado.

Se utilizó el papel probabilístico de Gumbel debido a que mostró tener un buen ajuste de datos. La curva de la función de distribución acumulativa de la familia de Gumbel para máximos está dada por.

$$y = F(x; \lambda, \delta) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\lambda}{\delta}\right)\right] \tag{1}$$

La estimación de los parámetros de la distribución de Gumbel se realiza a partir de la media y la desviación estándar de la muestra, por medio del método de momentos, el cual propone las siguientes ecuaciones para su estimación.

$$\lambda = \bar{x} + 0.5772\delta \tag{2}$$

$$\delta = \frac{S_x \sqrt{6}}{\pi} \tag{3}$$

Una vez obtenidos los valores de dichos parámetros y debido a que son producto de una muestra finita, se dibuja la función de distribución empírica que será una aproximación de la función de distribución exacta.

Se muestran los resultados obtenidos directamente y los obtenidos a través de una transformación lineal para la familia de rectas dada.

$$\eta = a\xi + b = \frac{\xi - \lambda}{\delta} \tag{4}$$

A continuación se presenta la gráfica (figura 4.23) de ajuste por medio de la distribución Gumbel para la muestra de valores mínimos de presión obtenidos analíticamente.

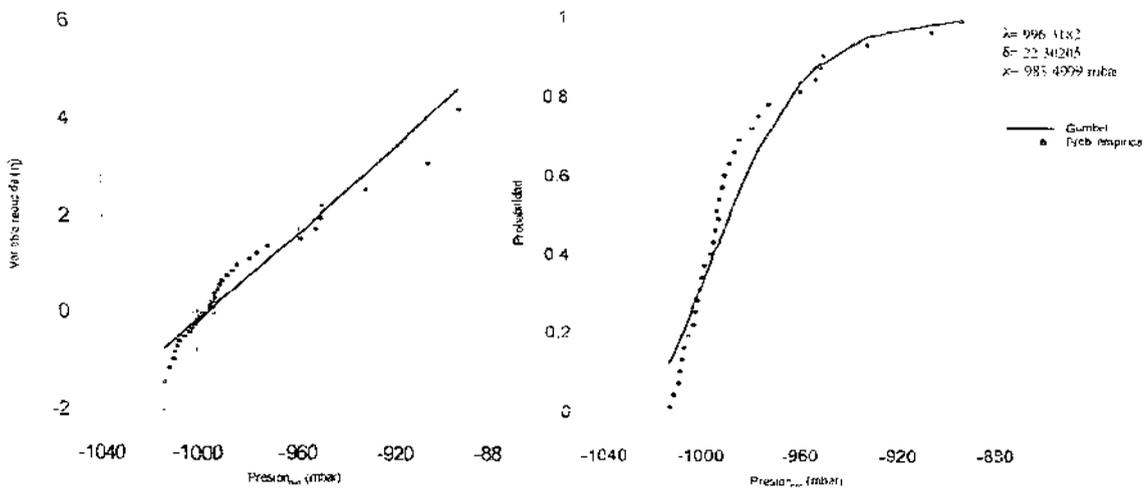


Figura 4.23 Ajuste para los valores de presión mínima obtenidos

En la figura 4.24 se muestra el ajuste para los valores de altura de ola máximos obtenidos a través del modelo de oleaje.

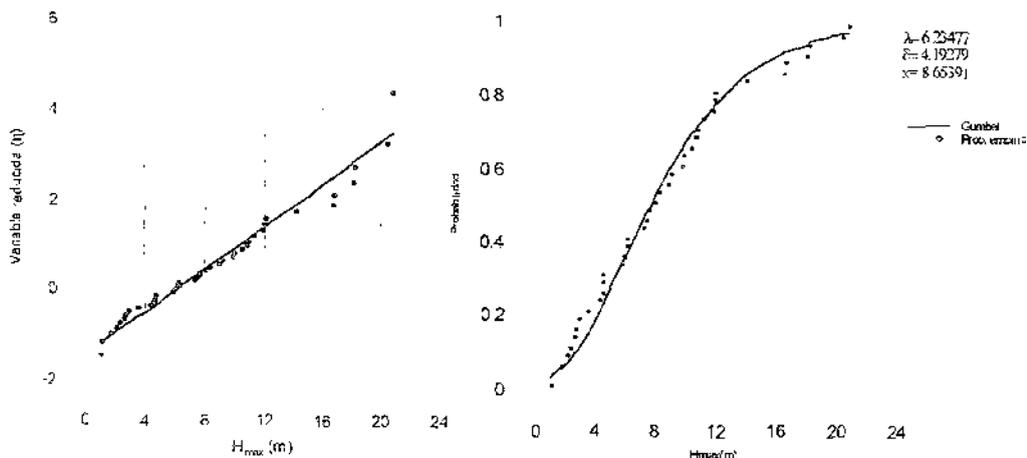


Figura 4.24 Ajuste para los valores de altura de ola máximo obtenidos

La figura 4.25 muestra el ajuste para los valores de viento ciclónico máximo obtenido a través del papel probabilístico de Gumbel.

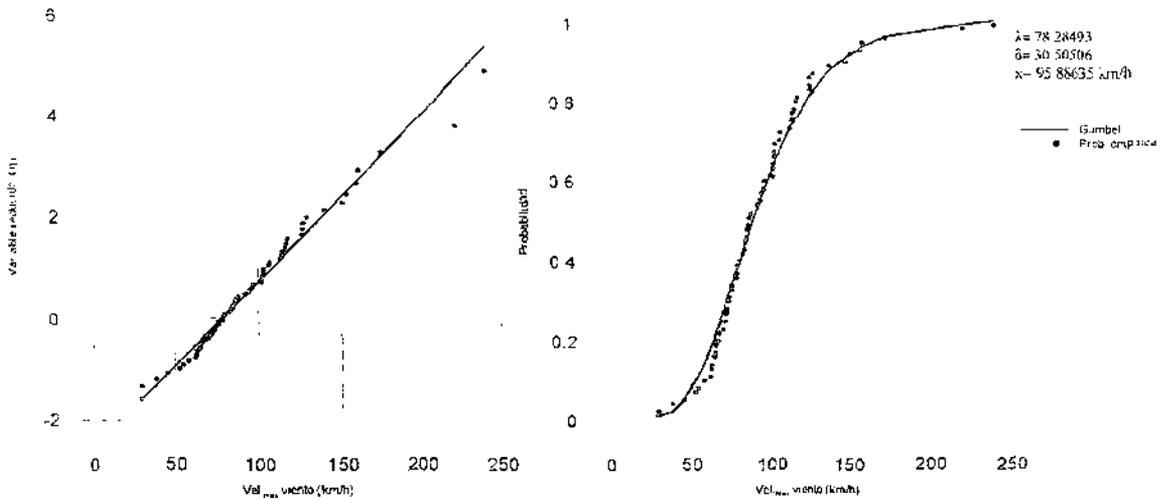


Figura 4.25 Ajuste para los valores de velocidad de viento máximo obtenidos

IV.6 Sistema para la alerta temprana por presencia de huracanes

Como estudio final de vulnerabilidad, se presenta la metodología del sistema de alertamiento temprano a las zonas costeras en posible riesgo por presencia de huracán.

El alertamiento temprano consiste en generar un cruce de circunferencias de influencia geográficas y superponerlas a la capa geográfica de localidades y municipios de la republica mexicana.

El criterio de generación de las circunferencias de influencia por la acción de los huracanes se tomó de la tabla propuesta por Saffir-Simpson, que relaciona la intensidad del evento con radios de afectación para diferentes intensidades de huracán. La tabla 4.9 muestra la propuesta de Saffir-Simpson.

Categoría	60 km	100 km	150 km	200 km	250 km	300 km	350km	400 km	500 km
Depresión Tropical	DT								
Tormenta Tropical	TT	DT							
Huracán clase 1	H1	TT	DT						
Huracán clase 2	H2	H1	TT	DT					
Huracán clase 3			H2	H1	TT	DT			
Huracán clase 4	H4	H3	H2	H1	H2	H1	TT	DT	
Huracán clase 5	H5	H5	H4	H4	H3	H2	H1	TT	DT

Tabla 4.9 Relación de intensidades con radios de afectación

Esto quiere decir que si se presenta un huracán clase 2, se tendrá una afectación equivalente a la acción de una depresión tropical en el área definida entre 200 y 150 kilómetros a partir del centro del huracán y una afectación directa de un huracán clase 2 dentro de un radio de afectación de 60 kilómetros.

La importancia de contar con un sistema de alertamiento temprano, es la de poder generar avisos con antelación a las poblaciones que se encuentran dentro de determinadas áreas de afectación para cada aviso que se publique. Se pueden generar listados que contienen el nombre de la localidad, el municipio, la población y su localización geográfica.

Para ilustrar los resultados del sistema de alertamiento temprano se muestran tres ejemplos generados para tres diferentes huracanes, Gilberto (1988), Roxane (1995) y Pauline (1997).

La figura 4.25 muestra el análisis de alertamiento temprano para el huracán Gilberto en el aviso del día 15 de septiembre de 1988 a las 24:00hr con una intensidad de huracán clase 3, y una presión central de 944mb.

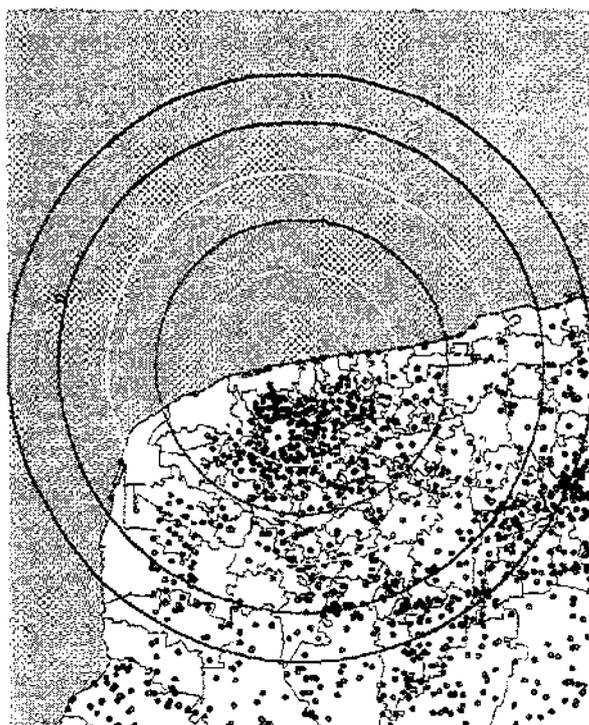


Figura 4.25 Análisis de alerta temprana para el huracán Gilberto (1988)

Se observa que para éste aviso del huracán Gilberto, la zona más afectada con una intensidad de huracán clase 3 comprende a la ciudad de Mérida Yucatán y al puerto Progreso, mientras que la parte sur del estado de Campeche solo sufrió la acción equivalente a una depresión tropical.

La figura 4.26 muestra el análisis de alertamiento temprano para el huracán Roxane en el aviso del día 12 de octubre de 1985 a las 24:00hr con una intensidad de huracán clase 1, y una presión central de 990mb.

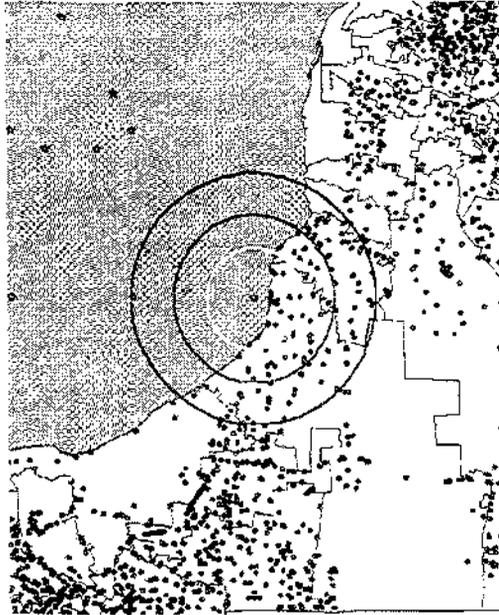


Figura 4.26 Análisis de alerta temprana para el huracán Roxane (1995)

Se observa que la capital del estado de Campeche y ciudades alcañanas se vieron afectadas directamente por un huracán clase 1. La figura 4.27 muestra el análisis de alertamiento temprano para el huracán Pauline en el aviso del día 8 de octubre de 1985 a las 12:00hr con una intensidad de huracán clase 3, y una presión central de 954mb.

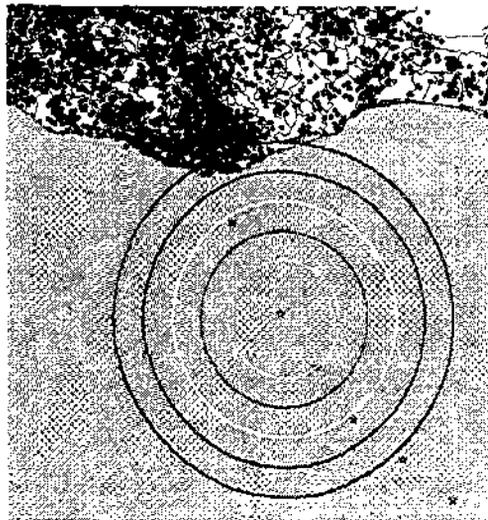


Figura 4.27 Análisis de alerta temprana para el huracán Pauline (1997).

V CONCLUSIONES

- Se generaron gráficas estadísticas con base en los parámetros de huracanes recabados de 1949 – 1999 que relacionan el número de eventos por intensidad y año.
- Se realizó el estudio estadístico con base en los datos históricos para las vertientes del Pacífico y Atlántico Mexicano, relacionando la duración de los eventos por año e intensidad.
- En el proceso de calibración de los modelos de presión, se pudo ver que la configuración de presiones alrededor del centro del huracán depende en gran parte del cálculo del radio ciclostrofico relacionado con la presión en el ojo del huracán.
- Se observó que los cuatro modelos de presión (Hydromet, Bretschneider, Fujita y NOAA) no varían significativamente uno del otro, presentando solamente diferencias en las duraciones con respecto al tiempo de las presiones mínimas obtenidas debido a la distancia de comparación entre la posición geográfica de la boya y los datos analíticos ya que en ocasiones los huracanes pasan prácticamente encima de las boyas y en otras ocasiones a más de 2° de distancia.
- Se encontraron dos ecuaciones que relacionan el radio ciclostrofico con la presión central del huracán para dos diferentes rangos de aplicación dentro del Océano Atlántico: el primero abarcando la presión mínima de 880mb hasta 1000mb considerado como el rango completo de acción de los huracanes. El segundo rango se aplica para el rango de 960mb a 1000mb con un mejor ajuste de resultados para huracanes menos intensos.
- Se fijó una metodología a seguir para la obtención y generación de áreas de vulnerabilidad por presencia de huracanes a partir de un análisis histórico de los valores de presión mínima históricos, altura de ola máximo histórico y velocidad del viento ciclónico máximo histórico.
- Se presentó una metodología a seguir para la obtención y generación de zonas de vulnerabilidad baja, media y alta a partir de una análisis de probabilidad de ocurrencia de eventos de huracán de iso-intensidades.
- Se realizó un análisis extremal con base en el papel probabilístico de Gumbel para los valores de presión mínima, altura de ola máxima y velocidad del viento

máximo para los huracanes presentados históricamente en las cercanías de la península de Yucatán.

- Se propuso una metodología para realizar el cruce de información cartográfica con las zonas de vulnerabilidad generadas con la finalidad de generar gráficas de afectación de localidades, municipios e infraestructura para la península de Yucatán.
- Se mostró la metodología y criterios geométricos a seguir para realizar un análisis de alertamiento temprano aplicado a las costas mexicanas a partir de un cruce simple de información cartográfica de localidades en posible afectación con circunferencias de influencia tomadas de la escala de intensidades Saffir-Simpson.

VI FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

- Hacer la calibración de la ecuación propuesta para el Océano Pacífico que relaciona el radio ciclostrófico con la presión central, comparándola con información tomada en campo a través de boyas oceanográficas o algún aparato similar.
- Integrar al análisis de vulnerabilidad histórica, toda la zona del atlántico mexicano y del Pacífico para generar zonas de vulnerabilidad histórica a lo largo de los más de 11,00km de costa.
- Adicionar al análisis de vulnerabilidad histórica, los datos de inundaciones por mareas de tormenta históricos presentados en todo el litoral mexicano.
- Adicionar al análisis de vulnerabilidad por eventos de iso-intensidad, más capas geográficas para obtener tablas cruzadas de tipo de daño posible contra infraestructura diversa.
- Integrar el sistema de alertamiento temprano al sistema de vulnerabilidad como un módulo de aplicación a priori del análisis de vulnerabilidad total.
- Relacionar las zonas de vulnerabilidad baja, media y alta con periodos de retorno de ocurrencia de fenómenos a partir de un análisis estadístico exhaustivo.

VII REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bretschneider, C. 1990. Tropical cyclones. Gulf Publishing. Handbook on Ocean Engineering, Chapter 6.
2. CDMP/CIMH Storm Hazard Atlas Introductory Text, Unit of Sustainable Development and Environment for the USAID Office of Foreign Disaster Assistance and the Caribbean Regional Program. 1999
3. Dean R.G., Chiu T. Y., Wang S. Y. Combined total storm tide frequency analysis for Pinellas County, Florida. Florida State University, March 1995
4. Díaz G, Contreras A, Pedrozo A, Silva R. (aceptado) "Sistema para la evaluación de riesgos oceanográficos generados por ciclones tropicales" AMH, XVI Congreso Nacional de Hidráulica, Morelia, México. Octubre 2000.
5. Handbook of coastal and ocean Engineering (1992). Ed. Herbich. Vol. 3
6. Houston S. H. Comparisons of HRD and SLOSH Surface Wind Fields in Hurricanes. Hurricane Research Division. Miami Florida. October 1999.
7. Holland, G. J., 1980, A analytical model of the wind and pressure profiles in hurricanes. Monthly review, 108, 1212-1218.
8. Holland, G. J., 1990 Windfield Dynamics of Landfalling Tropical Cyclones. Bureau of Meteorology Research Center, Melbourne.
9. Inter-American Development Bank Newsletter, June, 1989. "Emergency Plan for the Yucatan" (Washington, D.C.: Inter-American Development Bank, 1989).
10. Jacob S. D. Upper Ocean Report to Tropical Cyclone Wind Asymmetries. RSMAS, Miami Florida. 1998.
11. Pan K. A parametric Wind field model for Hurricane Risk Assessment. ASCE. 1996
12. Pedrozo A. Análisis frecuencial y temporal del oleaje. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería, UNAM 1999.

13. R. Silva, G. Díaz, A. Contreras, G. Bautista & C. Sánchez, (2000) "Determination of oceanographic risk for hurricanes on the Mexican coast", 6th international Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, pg 137-160.
14. Sánchez, C. et al. 1998. Comparison of 4 wave prediction models. 5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting. Melbourne Fl. Pp. 134-145.
15. Silva R. Contreras A., Díaz G. 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.
16. Silva R, Contreras A, Bautista G, Díaz G.(aceptado) "Determinación del Riesgo Oceanográfico en el Litoral Mexicano", XI Congreso Panamericano de Ingeniería Oceánica y Costera. Panamá. Agosto 2000.
17. UNDRO News. April, 1989. "Hurricanes Gilbert and Joan: Implications for the Caribbean Housing Sector" (Geneva: UNDRO, 1989).
18. Van Gelder, P.H.A.J.M. 1999. Statistical Methods for the Risk-Based Design of Civil Structures. T.U. Delft. Ne.

ANEXO I

A partir de un análisis estadístico de la base de datos del Océano Atlántico se generaron las gráficas que presentan el número de eventos registrados de 1949 a 1999 para el Océano Atlántico agrupados por intensidad mostrado en las figuras A.1 a A.5.

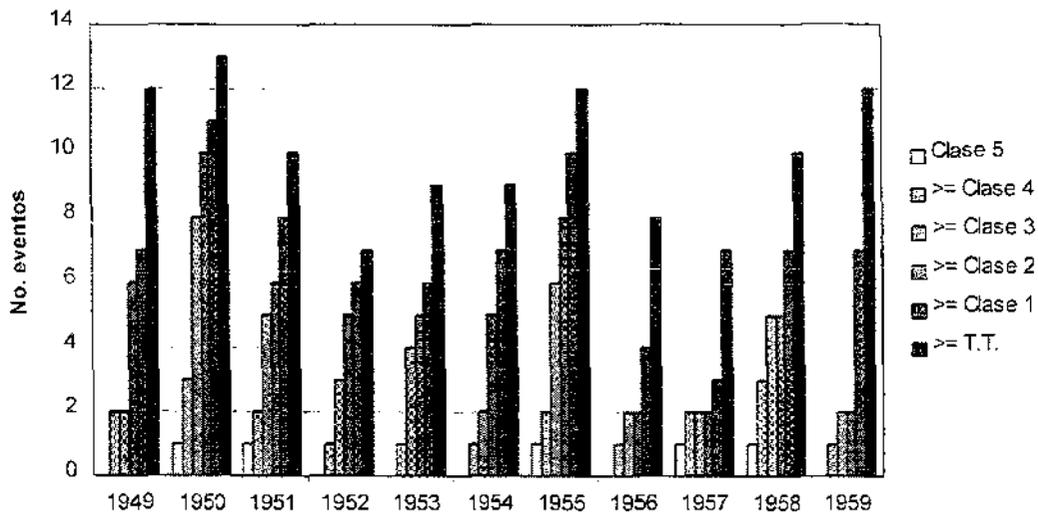


Figura A.1 Número de eventos registrados para el Atlántico por intensidad para la década de los 50's

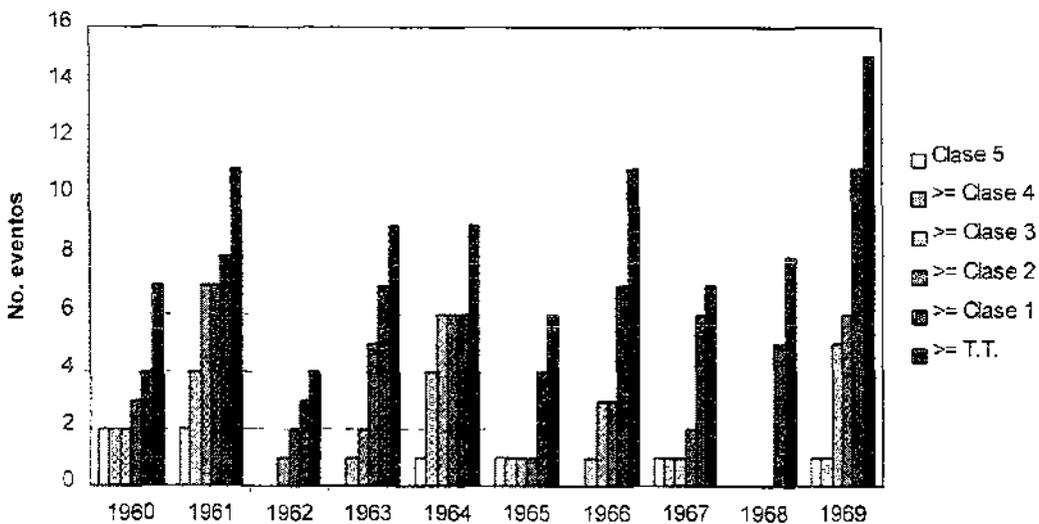


Figura A.2 Número de eventos registrados para el Atlántico por intensidad para la década de los 60's

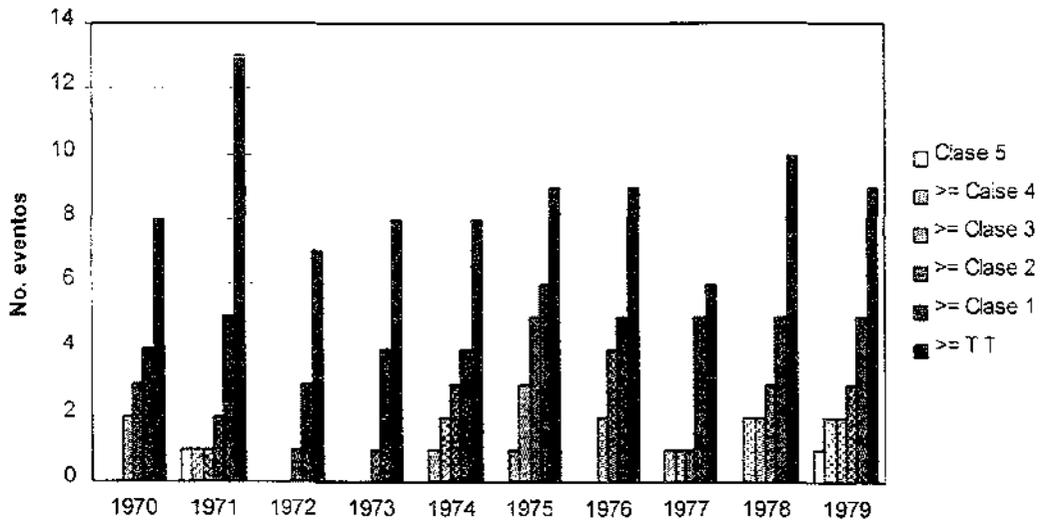


Figura A.3 número de eventos registrados para el Atlántico por intensidad para la década de los 70's

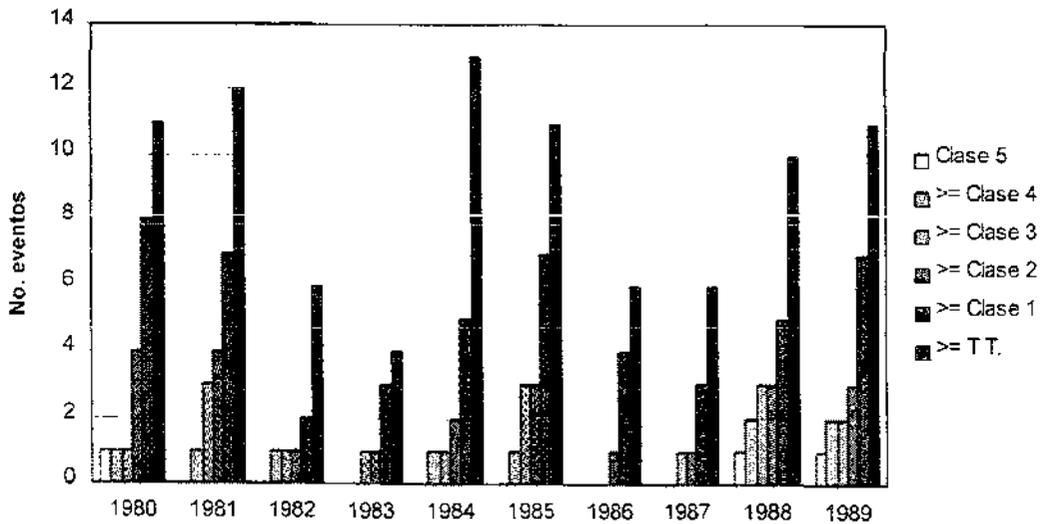


Figura A.4 Número de eventos registrados para el Atlántico por intensidad para la década de los 80's

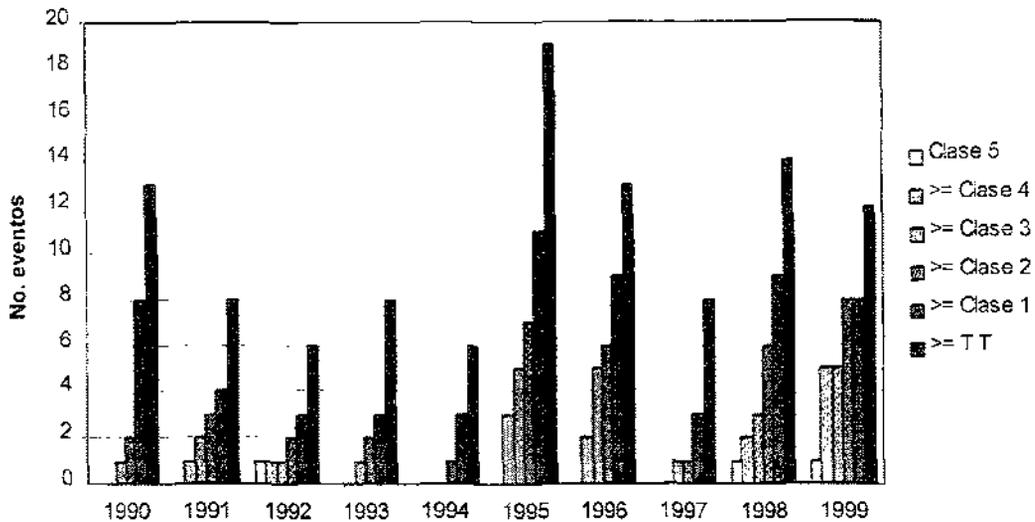


Figura A 5 Número de eventos registrados para el Atlántico por intensidad para la década de los 90's

Se observa que en la década de los 50's se presentaron un mayor número de eventos que van de intensidad clase 1 a intensidad clase 5, mientras que la década de los 70's es la que cuenta con menos eventos. El menor número de eventos se presentaron en las décadas de los 60's y 80's, mientras que la década de los 90's mostró una tendencia elevada de eventos que se asemeja en gran parte a la década de los 50's, lo cual da pie a considerar el periodo de aumento de huracanes de cada 40 años viendo que en la década de los 60's, 70's y 80's se presentaron menos eventos intensos.

Para poder analizar a fondo la ocurrencia de huracanes en la vertiente del Atlántico se realizó un análisis del número de días de duración de cada evento por intensidad, permitiendo obtener mayor información sobre el desarrollo del fenómeno de 1949 a 1999. las figuras A.6 a A.10 muestran las gráficas que relacionan la duración de los eventos por año e intensidad.

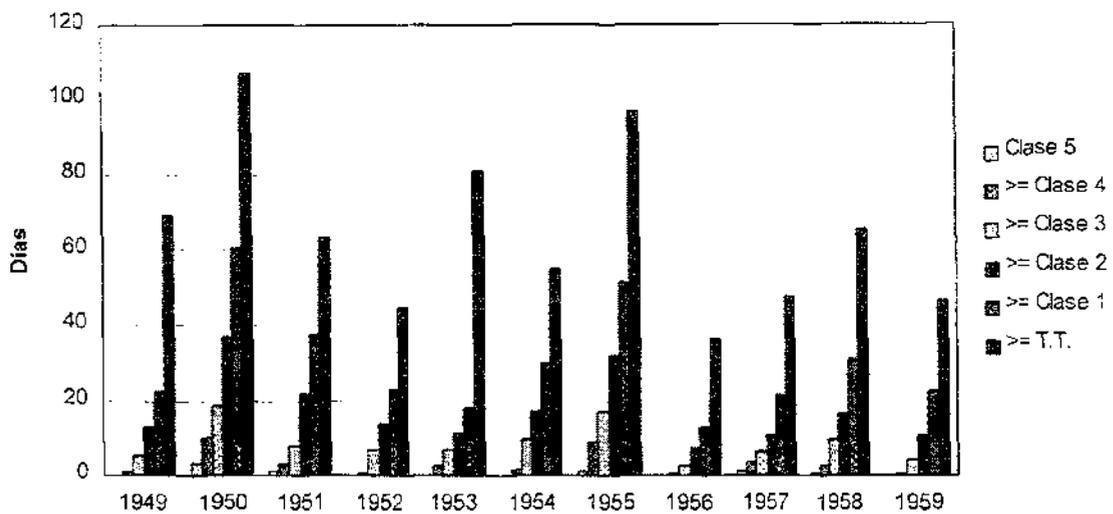


Figura A.6 Número de días de ocurrencia de huracanes por intensidad en el Atlántico para los 50's

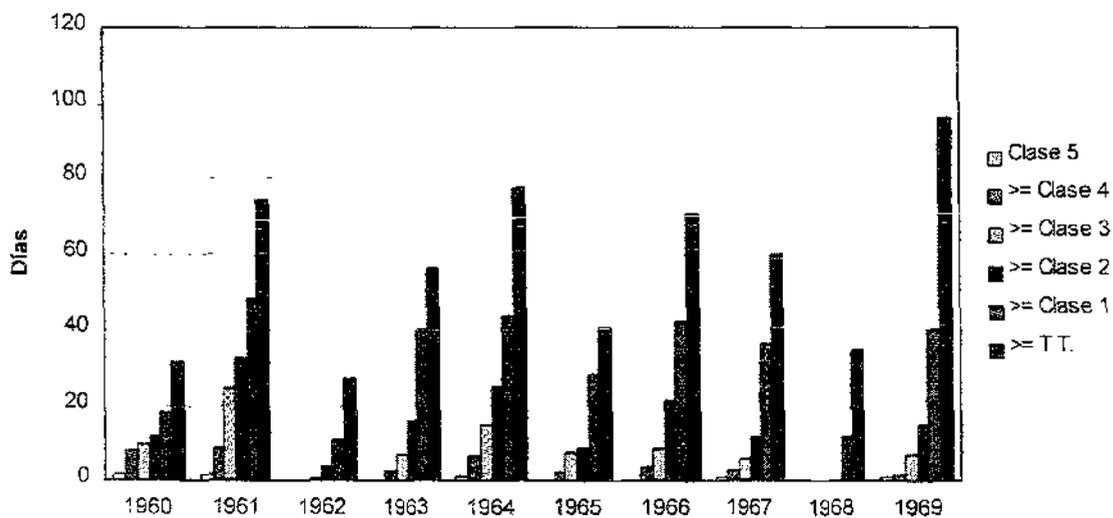


Figura A.7 Número de días de ocurrencia de huracanes por intensidad en el Atlántico para los 60's

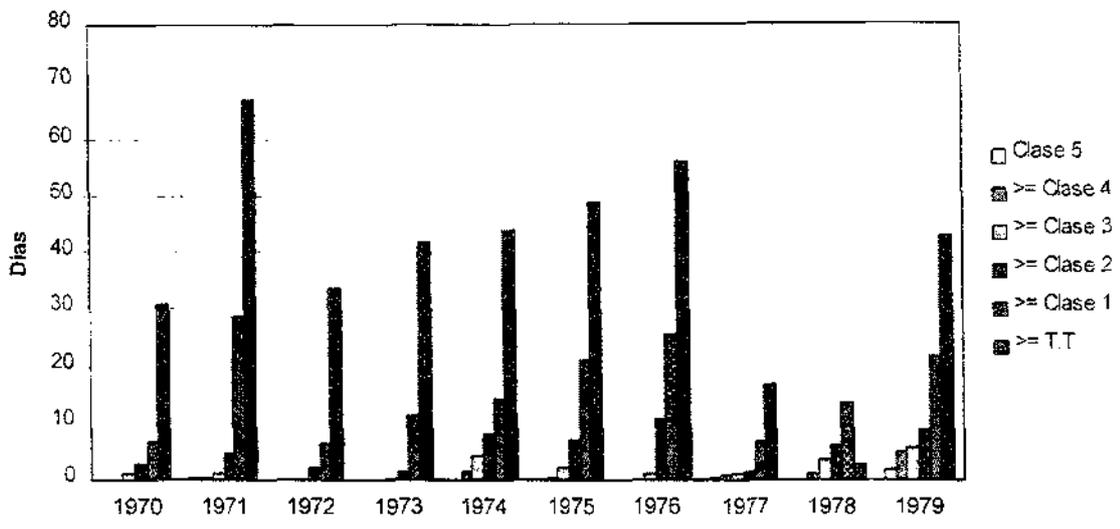


Figura A.8 Número de días de ocurrencia de huracanes por intensidad en el Atlántico para los 70's

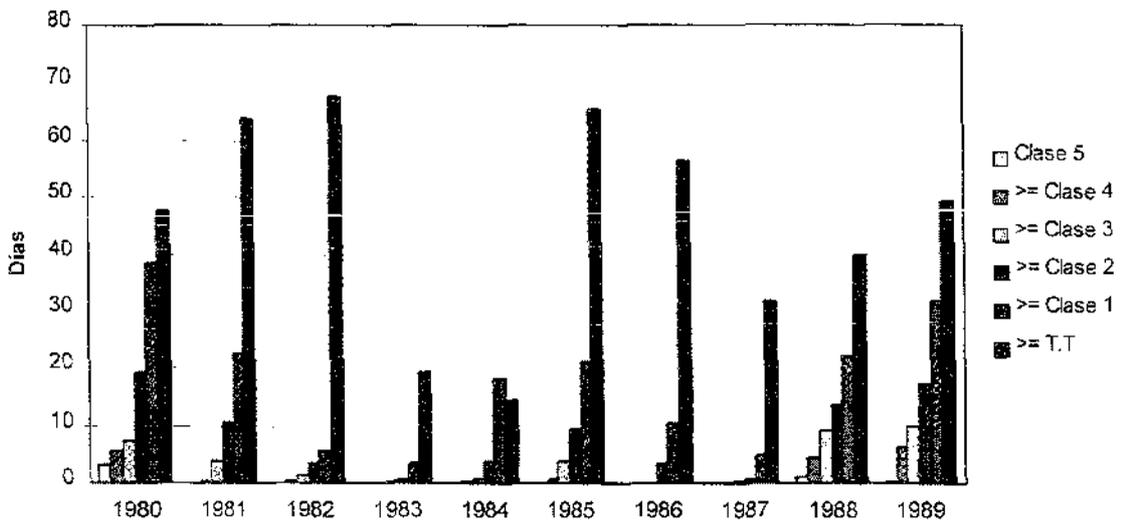


Figura A.9 Número de días de ocurrencia de huracanes por intensidad en el Atlántico para los 80's

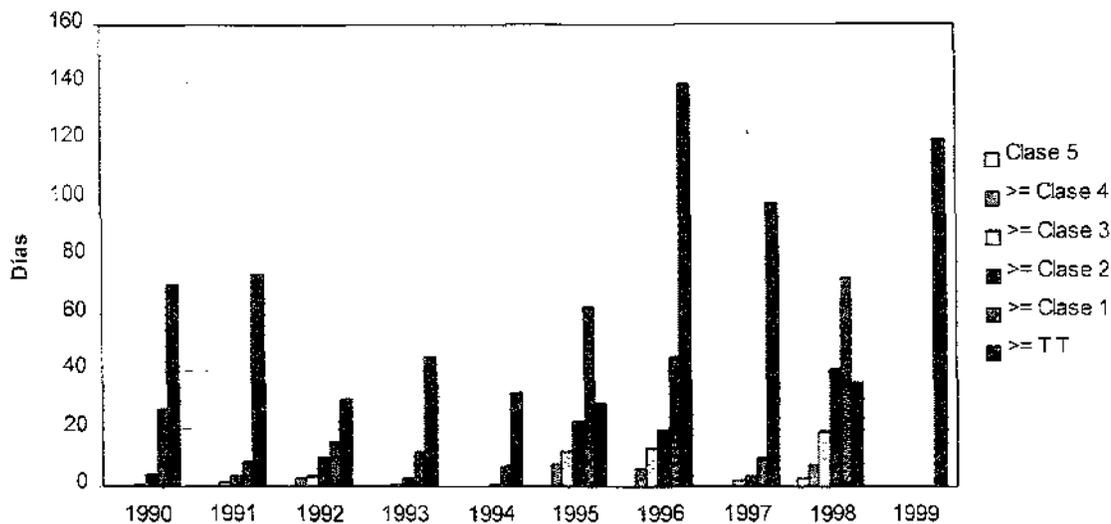


Figura A.10 Número de días de ocurrencia de huracanes por intensidad en el Atlántico para los 90's

Al igual que los resultados obtenidos con base en el número de eventos que se han presentado por año y por intensidad, el análisis de la duración de cada evento por año e intensidad demostró que las décadas de los 50's y los 90's han sido las más activas. Notándose que en 1950 se presentaron tormentas tropicales con duraciones mayores a 100 días, mientras que en el año de 1996 se presentaron duraciones de más de 120 días de huracanes clase 1 y mayores. Las décadas intermedias presentaron una duración de eventos mayores o iguales a tormenta tropical mucho menor con duraciones de más de 60 días para 1971 y 1982 y de más de 80 días para 1969.

Al realizar el análisis estadístico para la vertiente del Océano Pacífico se generaron las gráficas que presentan el número de eventos registrados de 1949 a 1999 agrupados por intensidad mostrado en las figuras A.11 a A.15.

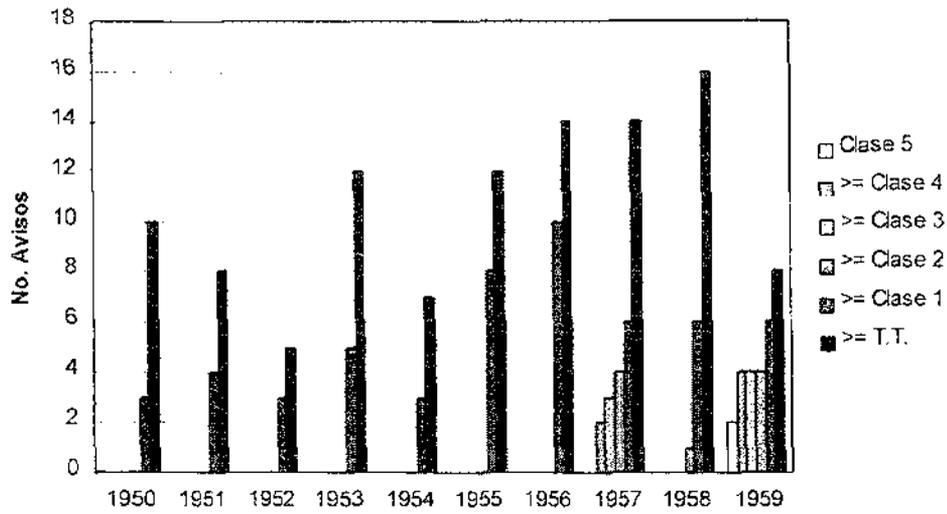


Figura A.11 Número de eventos registrados para el Pacífico por intensidad para la década de los 50's

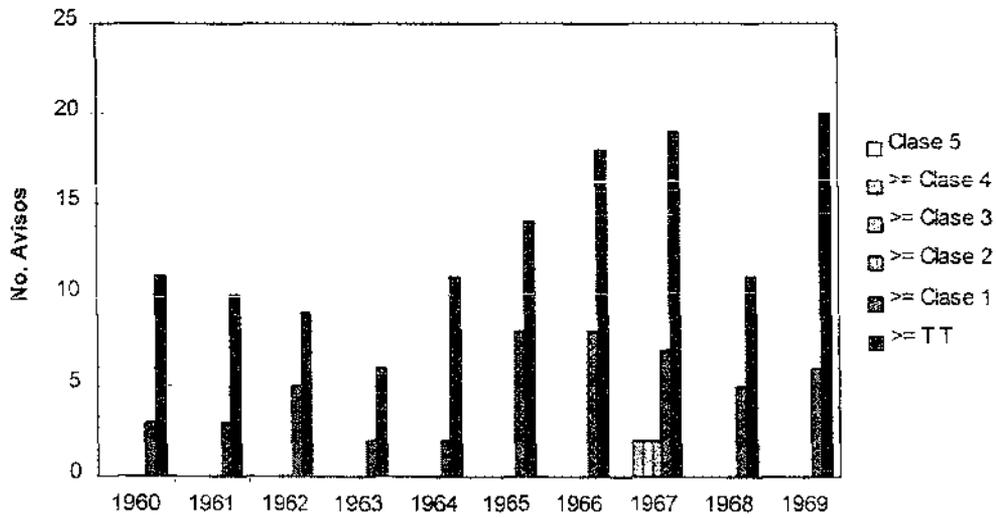


Figura A.12 Número de eventos registrados para el Pacífico por intensidad para la década de los 60's

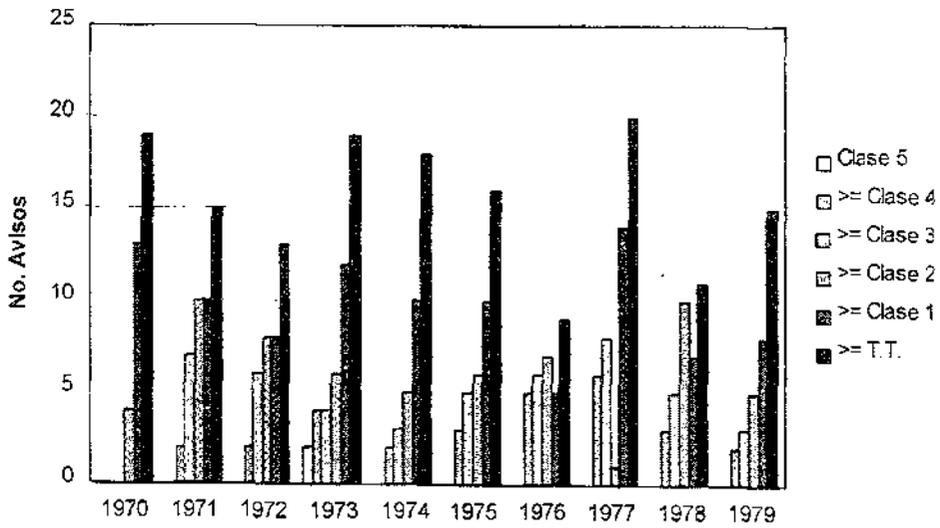


Figura A.13 Número de eventos registrados para el Pacífico por intensidad para la década de los 70's

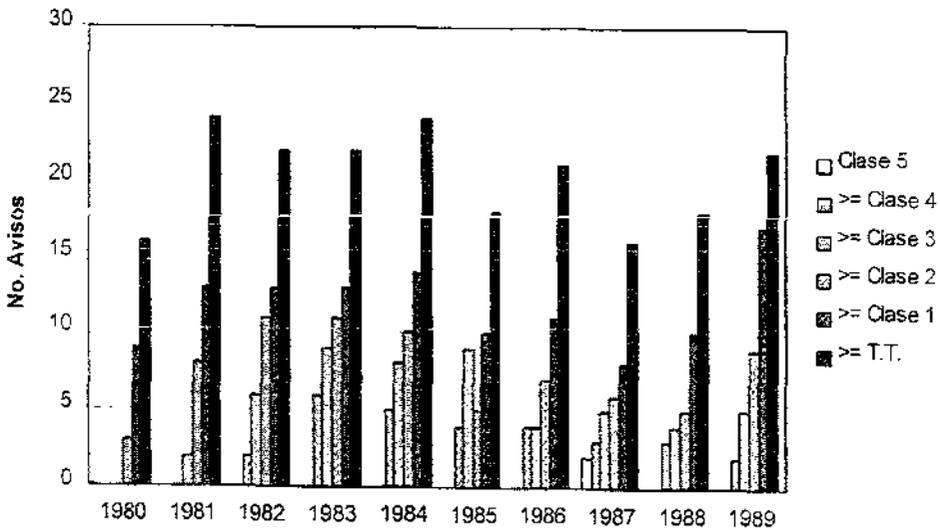


Figura A.14 Número de eventos registrados para el Pacífico por intensidad para la década de los 80's

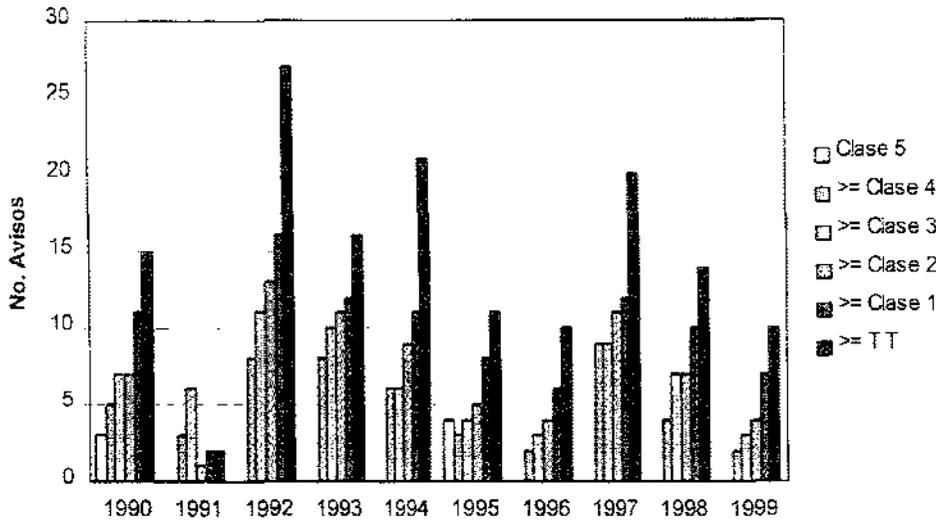


Figura A.15 Número de eventos registrados para el Pacífico por intensidad para la década de los 90's

La tendencia de ocurrencia de eventos por año y por intensidad en el Océano Pacífico muestra un comportamiento ascendente al paso de los años, desde la década de los 50's que presentaron 16 eventos de tormenta tropical y mayores seguido por las décadas de los 60's y 70's con 20 eventos como máximo, con la única diferencia que en la década de los 70's se presentaron esos 20 eventos en más años que en los 60's. Se puede considerar que la década de los 80's ha sido la más intensa debido a que se presentaron más de 20 eventos tipo tormenta tropical y mayores por año, en seis de los diez años y finalmente se presentó un máximo de 25 eventos por año para la década de los 90 pero solamente en el año de 1992.

En la vertiente del Pacífico también se realizó un análisis del número de días de duración de cada evento por intensidad mostrado en las figuras A.16 a A.20 para 1949-1999.

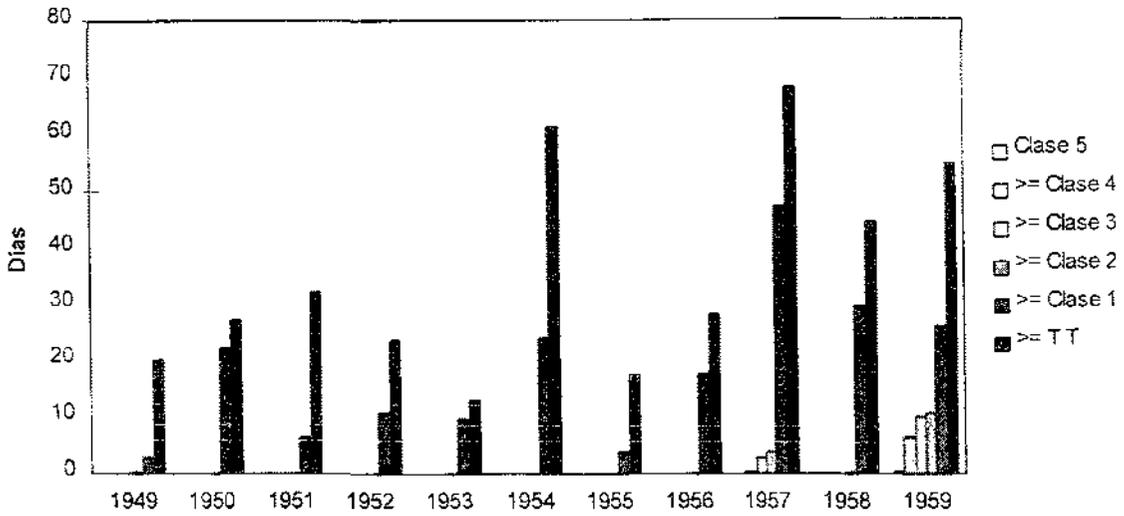


Figura A.16 Número de días de ocurrencia de huracanes por intensidad en el Pacífico para los 50's

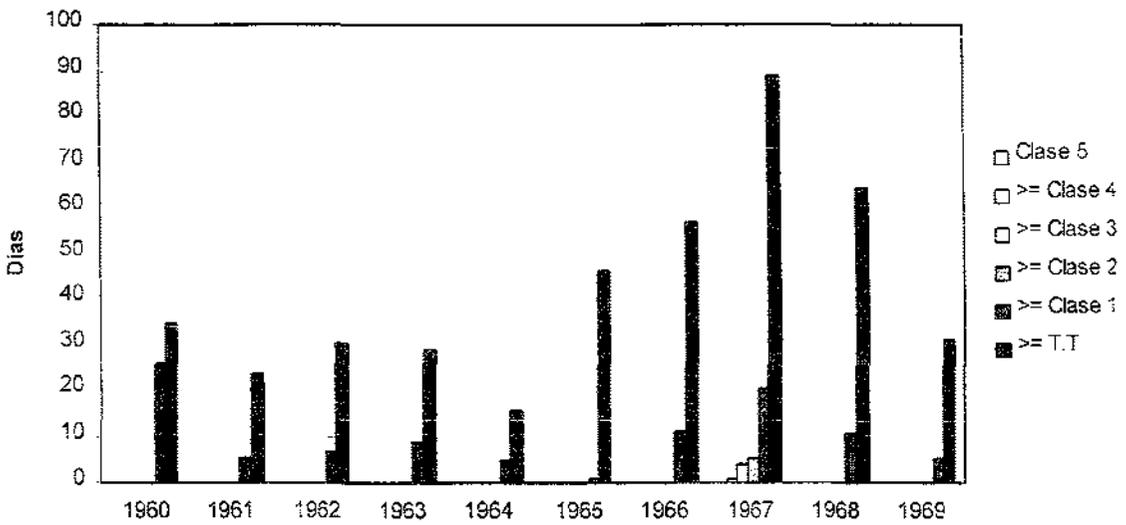


Figura A.17 Número de días de ocurrencia de huracanes por intensidad en el Pacífico para los 60's

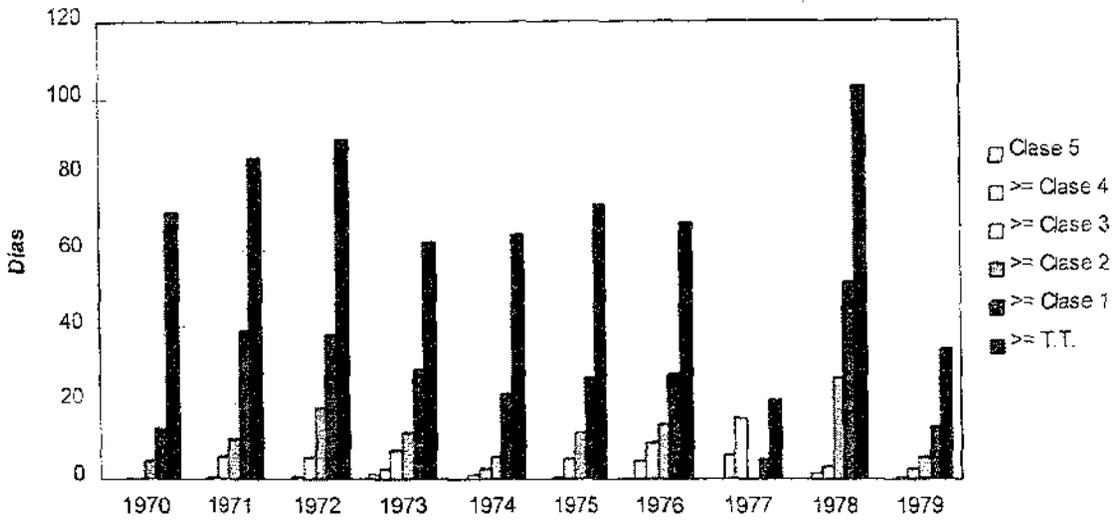


Figura A.18 Número de días de ocurrencia de huracanes por intensidad en el Pacífico para los 70's

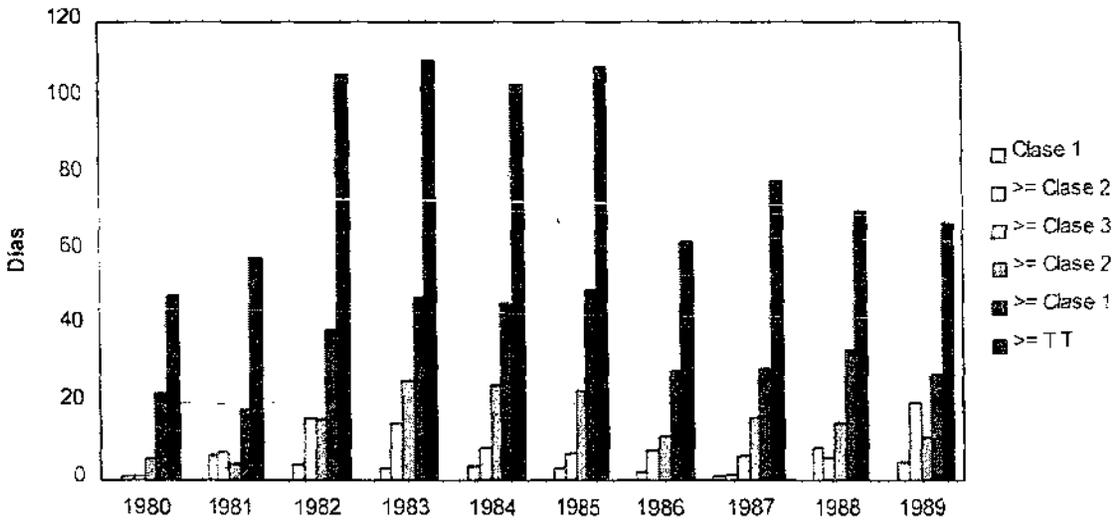


Figura A.19 Número de días de ocurrencia de huracanes por intensidad en el Pacífico para los 80's

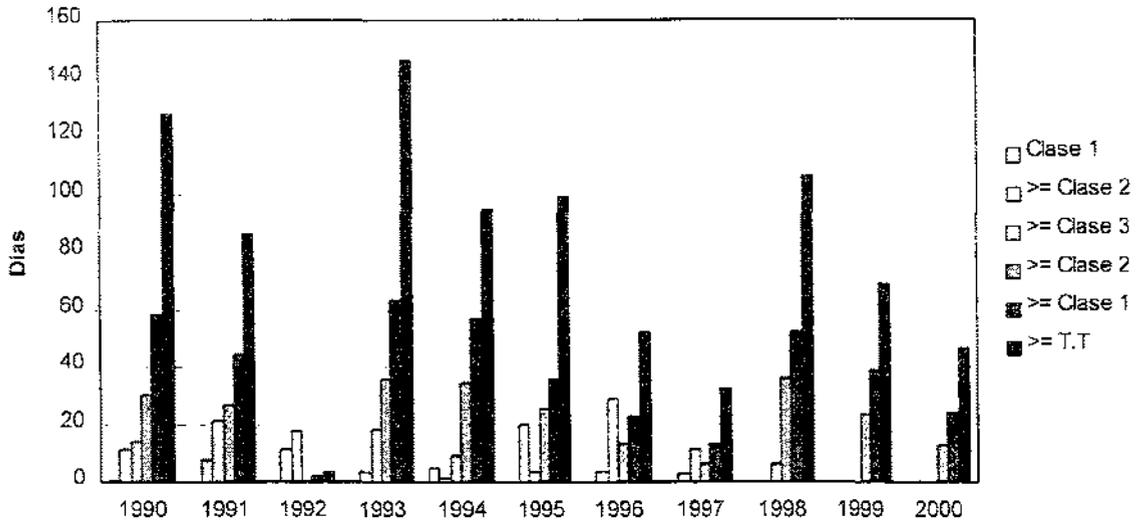


Figura A.20 Número de días de ocurrencia de huracanes por intensidad en el Pacífico para los 90's

La tendencia ascendente de ocurrencia de eventos en el Océano pacífico conforme pasan las décadas, se observa que en la década de los 50's se tienen duraciones de 70 horas para eventos tipo tormenta tropical y mayores. La duración aumenta a 90, 100 y 110 horas para las décadas siguientes y en la década de los 90's se tiene una duración de 140 horas para eventos tipo tormenta tropical y mayores.