

88



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Calibración de los modelos numéricos  
aplicados al análisis de huracanes  
en el Golfo de México.

T É S I S

Como requisito para obtener el título de:

Ingeniero Civil

Presenta:  
DIANA KARINA MORÁN GARCÍA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. RODOLFO SILVA CASARÍN

MÉXICO, D.F.

MARZO 2002



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCIÓN  
FING/DCTG/SEAC/UTIT/036/02

Señorita  
DIANA KARINA MORÁN  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. RODOLFO SILVA CASARÍN, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS APLICADOS AL ANÁLISIS DE HURACANES EN EL GOLFO DE MÉXICO"**

- INTRODUCCIÓN
- I. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL FENÓMENO DEL HURACÁN
  - II. ANÁLISIS HISTÓRICO DE HURACANES
  - III. MODELOS NUMÉRICOS
  - IV. CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS
  - V. APLICACIÓN DE LOS MODELOS
  - VI. CONCLUSIONES
- FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO  
BIBLIOGRAFÍA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cd. Universitario a 11 febrero 2002.  
EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO  
GFB/GMP/mstg.

*A mis padres por quienes hoy estoy aquí:  
A ti Miguel por la fortaleza que siempre demuestras,  
Por enseñarme a hacer las cosas lo mejor que pueda,  
Pero principalmente por enseñarme a vivir la vida  
con plenitud.  
A ti Isabel por la paciencia, confianza, cariño y  
dedicación que depositaste en mí,  
Por otorgarme el regalo de vivir.*

*A Norma, Pepe, Claudia, Miguel, Fabiola,  
Adrián, Pati, Claudia y Rodrigo.  
porque no pude tener mejor destino  
que el tenerlos a ustedes por hermanos.*

*A Víctor y Diego por que con su ternura  
e inocencia llenan mi vida de alegría.  
A ti Aurora, gracias por que contigo he contado  
en todo momento*

*A ti Mau, gracias por el gran apoyo  
y cariño que de ti recibo,  
Porque a tu lado todo es fácil,  
por el corto tiempo y los grandes  
momentos que hemos compartido,  
Porque eres una página que  
encabeza el libro de mi vida.  
Te quiero.*

## AGRADECIMIENTOS

*Qué agradable tarea es recordar a todos aquellos que, de una forma u otra, han participado en la propia formación. Sirvan pues, estas líneas, como humilde homenaje tanto a los aquí mencionados, como a los que tal vez la mente ha olvidado, pero el corazón no.*

*Gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México, que siempre siga viva y formando grandes personas.*

*Gracias a la Facultad de Ingeniería, por la formación que en ella recibí, donde se sufre y se lucha pero al final se aprende.*

*Gracias al Instituto de Ingeniería por su preocupación por formar grandes ingenieros.*

*Un agradecimiento muy especial para el Dr. Rodolfo Silva, por la confianza que depositó en mí para la realización de este trabajo, por brindarme la oportunidad de formar parte de su equipo, y compartir sus conocimientos, por ofrecer todo lo que está a su alcance en pos del desarrollo de nuevos ingenieros, gracias.*

*Para el M.I. Victor Franco, un agradecimiento especial por las oportunidades que me ha brindado.*

*Gracias a todos y cada uno de los profesores que ayudaron en mi formación, en especial al M.I. Agustín Demeneghi, M.I. Ricardo Padilla, Ing. Jesús Gallegos e Ing. Miguel Ángel Rodríguez.*

*A Hilda, Evelyn, y Megumi, mis grandes amigas, comparto con ustedes este logro, porque sin ustedes hoy no podría estar aquí, gracias.*

*A mis amigos y compañeros de generación Javier, Jonathan, Vicente, Laura, Angela, Blanca, Ema, Adal, Capu, Robert, Atila, Huato, Chayo, Alejandro, Panda, Felix; muy especialmente a ti Jacobo †, porque de alguna manera sigues aquí.*

*A mi gran amiga Sara, por los grandes momentos y experiencias que hemos compartido durante muchos años.*

*A mis amigos del Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del I.I. Roberto, Paco, Martha, Juan, Gustavo, Gregorio, Georges, Gabriel, Edgar, Alberto y Adrián, por ofrecerme su apoyo y amistad.*

## RESUMEN

En este trabajo de investigación se realizó un análisis estadístico de los datos obtenidos de todos los huracanes que se han presentado en las costas de la República mexicana con la finalidad de encontrar el período del año en el que se presentan estos eventos así como el porcentaje de ocurrencia de intensidades de acuerdo a la escala Saffir-Simpson como antecedente para la determinación de zonas de vulnerabilidad en el litoral mexicano.

Se calibraron los modelos de presión, viento y altura de ola para la zona del Atlántico con el fin de determinar la ecuación que relacione el parámetro del radio ciclostrofico con la presión central del huracán la cual permita modelar las condiciones que alcanzaría un fenómeno al proporcionarle el valor del radio ciclostrofico y este de datos como presión mínima, velocidad de viento máximo y altura de ola máxima para el fenómeno.

Para la obtener una calibración más adecuada se utilizaron cuatro modelos deterministas:

- Hydromet Model
- NOAA Model
- Fujita model
- Bret Model X

Finalmente, se determina cual de los cuatro modelos representa mejor el fenómeno al obtener el porcentaje de error para cada modelo comparando los datos medidos por las boyas oceanográficas utilizadas y los resultados de cada modelo de donde se aprecia que tanto el NOAA Model como el Fujita Model son los que mejor ajuste presentaron.

Una vez que se determinó cual de los modelos representa mejor el fenómeno se presenta un caso de aplicación como es el huracán Gilberto (1988) para el cual se evaluó la marea de tormenta generada en Cancún, Quintana Roo con base en los datos obtenidos por el modelo de Presión, y el modelo de velocidad de viento.

---



e intensidad .....	34
2.4.1.5. Comparación de los resultados obtenidos por mes .....	39
2.4.2. Región del Pacífico .....	40
2.4.2.1. Selección de eventos de acuerdo a la categoría .....	40
2.4.2.2. Determinación de la cantidad de avisos registrados por año y por intensidad para cada área .....	42
2.4.2.3. Evaluación del número de horas de afectación por categoría ..	44
2.4.2.4. Registro de la cantidad de eventos obtenidos por década e intensidad .....	47
2.4.2.5. Comparación de los resultados obtenidos por mes .....	52
2.5. Resumen .....	53
2.5.1. Región del Atlántico .....	53
2.5.2. Región del Pacífico .....	53
<b>3. MODELOS NUMÉRICOS.....</b>	<b>55</b>
3.1. Antecedentes.....	55
3.2. Modelos .....	55
3.2.1. Descripción de los modelos de presión .....	55
3.2.2. Descripción de los modelos de viento .....	57
3.2.3. Descripción de los modelos de altura de ola .....	60
<b>4. CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS PARA EL ATLÁNTICO.....</b>	<b>65</b>
4.1. Selección de las boyas oceanográficas .....	65
4.2. Determinación del radio ciclostrofico .....	67
4.3. Verificación de los modelos de presión, viento y altura de ola .....	69
4.3.1. Modelo de presión.....	70
4.3.2. Modelo de viento.....	73
4.3.2.1. Factor de corrección de velocidad de viento.....	75
4.3.3. Modelo de altura de ola.....	79
4.4. Resultados.....	81
<b>5. APLICACIÓN DE LOS MODELOS.....</b>	<b>83</b>
5.1. Aplicación .....	83
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>94</b>
<b>FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO .....</b>	<b>95</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>96</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>99</b>



## LISTA DE TABLAS.

Tabla 1.1	Clasificación del desarrollo del huracán según su intensidad de viento .....	14
Tabla 1.2	Escala Saffir-Simpson .....	18
Tabla 1.3	Eventos registrados en los estados costeros .....	21
Tabla 2.1	Determinación del número de avisos según sus características en las distintas zonas del Atlántico.....	27
Tabla 2.2	Total de eventos registrados por año en las tres zonas del Atlántico .....	28
Tabla 2.3	Total de eventos de no-ocurrencia por zona .....	29
Tabla 2.4	Duración en horas por categoría en las tres zonas del Atlántico .....	31
Tabla 2.5	Registros del total de eventos por década por mes para la zona Atlántico 1 .....	34
Tabla 2.6	Registros del total de eventos por década en cada mes para la zona Atlántico 2 ...	36
Tabla 2.7	Registro del total de eventos por década en cada mes para la zona Atlántico 3.....	38
Tabla 2.8	Registro del total de eventos en las tres zonas del Atlántico .....	39
Tabla 2.9	Determinación de Categorías en las distintas zonas del Pacífico .....	40
Tabla 2.10	Total de avisos registrados por año en las tres zonas del Pacífico.....	42
Tabla 2.11	Duración en horas por categoría en las tres zonas del Pacífico .....	44
Tabla 2.12	Registro del total de eventos por década en cada mes para la zona Pacífico 1.....	47
Tabla 2.13	Registros del total de eventos por década en cada mes para la zona Pacífico 2....	49
Tabla 2.14	Registros del total de eventos por década en cada mes para la zona Pacífico 3....	51
Tabla 2.15	Registros del total de eventos de las tres zonas del Pacífico .....	52
Tabla 3.1	Valores de las constantes del número de Rankin-Vortex.....	56
Tabla 3.2	Valores de las constantes $B_1$ y $B_2$ .....	59
Tabla 3.3	Valores de las constantes $Y_1$ y $Y_2$ .....	59
Tabla 3.4	Valores de las constantes $A_1$ y $A_2$ .....	61
Tabla 3.5	Valores de las constantes $Y_1$ y $Y_2$ para el modelo de oleaje .....	62
Tabla 4.1	Localización de las Boyas Oceanográficas en la región del Atlántico.....	65
Tabla 4.2	Número de Huracanes que afectaron cada una de las boyas localizadas en el Atlántico.....	66
Tabla 4.3	Rangos de presión central contra radio ciclostrofico .....	68
Tabla 4.4	Factor de corrección de velocidad de viento para la calibración de los modelos ....	75
Tabla 4.5	Error calculado para cada modelo .....	81
Tabla 5.1	Trayectoria real del huracán Gilberto(1988) .....	84

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.0	Sistema idealizado del comportamiento terrestre de presiones y vientos.....	15
Figura 1.1	Trayectoria que siguen los huracanes .....	16
Figura 1.2	Regiones donde se originan ciclones tropicales .....	17
Figura 2.1	Delimitación de áreas para la región del Atlántico .....	23
Figura 2.2	Delimitación de áreas para la región del Pacífico .....	24
Figura 2.3	Área de influencia directa en las costas del Atlántico .....	25
Figura 2.4	Área de influencia directa en las costas del Pacífico .....	25
Figura 2.5	No-ocurrencia de eventos para la zona Atlántico 1 .....	29
Figura 2.6	No-ocurrencia de eventos para la zona del Atlántico 2.....	30
Figura 2.7	No-ocurrencia de eventos para la zona del Atlántico 3.....	30
Figura 2.8	Tiempo en horas vs categoría para el Atlántico 1 .....	32
Figura 2.9	Tiempo en horas vs categoría para el Atlántico 2.....	32
Figura 2.10	Tiempo en horas vs categoría para el Atlántico 3.....	33
Figura 2.11	No-ocurrencia de eventos para la zona Pacífico 1 .....	43
Figura 2.12	Tiempo en horas vs categoría para Pacífico 1 .....	45
Figura 2.13	Tiempo en horas vs categoría para Pacífico 2.....	45
Figura 2.14	Tiempo en horas vs categoría para pacífico 3 .....	46
Figura 3.1	Relación de los factores para el cálculo del viento ciclónico .....	58
Figura 3.2	Relación de los factores para el cálculo del oleaje .....	63
Figura 4.1	Localización de las boyas utilizadas para la calibración en el Atlántico .....	66
Figura 4.2	Dispersión de datos de presión central contra radio ciclostrofico.....	67
Figura 4.3	Relación de $P_o$ vs $R_c$ para todo el rango de aplicación del huracán en el Atlántico	68
Figura 4.4	Intervalo de confianza al 95% de la muestra .....	69
Figura 4.5	Trayectorias de los cinco huracanes con los que se verificó la calibración de los Modelos .....	70
Figura 4.6	Perfil de presiones con respecto al tiempo para el huracán Allison (1995).....	70
Figura 4.7	Perfil de presiones con respecto al tiempo para el huracán Floyd (1999).....	71
Figura 4.8	Perfil de presiones con respecto al tiempo para el huracán Fran (1996).....	71
Figura 4.9	Perfil de presiones con respecto al tiempo para el huracán Irene (1999) .....	72
Figura 4.10	Perfil de presiones con respecto al tiempo para el huracán Opal (1995).....	72
Figura 4.11	Perfil de velocidad de viento para el huracán Allison (1995) .....	73
Figura 4.12	Perfil de velocidad de viento para el huracán Floyd (1999).....	73
Figura 4.13	Perfil de velocidad de viento para el huracán Fran (1996) .....	74
Figura 4.14	Perfil de velocidad de viento para el huracán Irene (1999).....	74
Figura 4.15	Perfil de velocidad de viento para el huracán Opal (1995).....	75
Figura 4.16	Perfil de velocidad de viento corregido para el huracán Allison (1995).....	76
Figura 4.17	Perfil de velocidad de viento corregido para el huracán Floyd (1999).....	77
Figura 4.18	Perfil de velocidad de viento corregido para el huracán Fran (1996).....	77
Figura 4.19	Perfil de velocidad de viento corregido para el huracán Irene (1999) .....	78
Figura 4.20	Perfil de velocidad de viento corregido para el huracán Opal (1995).....	78
Figura 4.21	Perfil de altura de ola con respecto al tiempo para el huracán Allison (1995)...	79
Figura 4.22	Perfil de altura de ola con respecto al tiempo para el huracán Floyd (1999).....	80
Figura 4.23	Perfil de altura de ola con respecto al tiempo para el huracán Irene (1999).....	80
Figura 5.1	Batimetría de Cancún, Quintana Roo.....	84
Figura 5.2	Trayectoria del huracán Gilberto (1988).....	85
Figura 5.3	Campo de presiones del huracán Gilberto a 600km antes de su arribo a la Costa	85
Figura 5.4	Campo de vientos generado por el huracán Gilberto antes de arribar a la costa	86

Figura 5.5	Altura del nivel del mar calculada con el modelo de marea de tormenta 2 horas antes del arribo del ojo del huracán a la línea de costa .....	87
Figura 5.6	Altura del nivel del mar calculada con el modelo de marea de tormenta justo cuando el huracán se encuentra en el punto de interés .....	87
Figura 5.7	Altura de ola calculada con el modelo 2 horas después del arribo del huracán a la línea de costa.....	88
Figura 5.8	Dirección e intensidad de corriente proporcionadas por el modelo de marea de tormenta 2 horas antes de que el huracán arribara a la línea de costa.....	89
Figura 5.9	Dirección e intensidad de la velocidad de las corrientes proporcionadas por el modelo de marea de tormenta en el momento en el que el huracán cruza la línea de costa .....	89
Figura 5.10	Dirección e intensidad de la velocidad de las corrientes proporcionadas por el modelo de marea de tormenta justo 2 horas después de que el huracán toca la línea de costa.....	90
Figura 5.11	Inicio de la inundación en las costas de Cancún, Quintana Roo, 2 horas después del arribo del huracán a la línea de costa .....	91
Figura 5.12	Inundación máxima sobre las costas de Cancún, (500m medido a partir de la línea de costa) .....	91
Figura 5.13	Secado de la costa de Cancún, Quintana Roo, después del arribo del huracán a la costa.....	92
Figura 5.14	Variación de la presión, viento ciclostrofico, marea de tormenta e intensidad de corriente para dos puntos sobre la línea de costa .....	93
A1	Número de avisos registrados para el Atlántico por categoría para el período de 1949 a 2000 .....	100
A2	Número de avisos registrados para el Pacífico por categoría para el período de 1949 a 2000 .....	100
A3	Número de avisos registrados para al Atlántico para cada una de las tres zonas	101
A4	Número de avisos registrados para el Pacífico para cada una de las tres zonas	102
A5	Número de eventos registrados por mes para cada década para la zona Atlántico 1	103
A6	Número de eventos registrados por mes para cada década para la zona Atlántico 2	103
A7	Número de eventos registrados por mes para cada década para la zona Atlántico 3	104
A8	Número de eventos registrados por mes para cada década para la zona Pacífico 1	104
A9	Número de eventos registrados por mes para cada década para la zona Pacífico 2	105
A10	Número de eventos registrados por mes para cada década para la zona Pacífico 3	105
A11	Total de horas acumuladas por categoría para la zona del Atlántico .....	106
A12	Total de horas acumuladas por categoría para la zona del Pacífico .....	106

## LISTA DE SÍMBOLOS

$P_o$	Presión en el centro del huracán [mb]
$P_r$	Presión a una distancia radial $r$ desde el centro [mb]
$P_{\infty}$	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
$a$	Constante de Holland
$b$	Constante de Holland
$A$	Constante de Holland
$B$	Constante de Holland
$\rho\alpha$	Densidad del aire
$r \frac{dp}{dr}$	Máximo gradiente de presiones.
$f$	Coeficiente de Coriolis
$\phi$	Latitud en la cual se encuentra el centro del ciclón [°]
$K_o$	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.
$\Delta\pi\alpha$	Gradiente de presión desde el centro del huracán a la presión normal [mb]
$V_f$	Velocidad de avance del ciclón [km/h]
$\beta$	Angulo entre la dirección de avance del ciclón y del viento $U_r$ .
$U_{rc}$	Velocidad del viento máxima ciclostrófica [km/h]
$U_{rk}$	Viento gradiente máximo [km/h]
$U_R$	Velocidad del viento en cualquier punto a distancia $R$ del centro, [km/h]
$\Delta\pi\alpha$	Gradiente de presión desde el centro del huracán a la presión normal [km/h]

## INTRODUCCIÓN

## INTRODUCCIÓN.

### 1. IMPORTANCIA.

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.

México es un país geográficamente delimitado por el Océano Pacífico y el Golfo de México, con lo cual crean una línea de costa de aproximadamente 11,000km de longitud, en ellos se localizan 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.

A pesar de la importancia que tiene para México sus zonas marinas es casi nula la cultura que se ha desarrollado al respecto; no se cuenta con un programa de medición de parámetros oceanográficos y meteorológicos. Como consecuencia de esto, no se tiene los elementos suficientes para caracterizar el riesgo oceanográfico y de esa manera definir los posibles usos que se deben de evitar o fomentar.

Es por ello que surge la necesidad de contar con modelos numéricos capaces de crear escenarios para describir el comportamiento físico de fenómenos como los huracanes que se aproximan a las costas mexicanas. Así como la posibilidad de desarrollar una herramienta que sea capaz de analizar históricamente las zonas de vulnerabilidad por presencia de huracanes.

### 2. ANTECEDENTES.

A través del tiempo y para varias regiones del mundo se han invertido muchos esfuerzos por encontrar algún modelo numérico que sea capaz de determinar la configuración de la presión, viento y oleaje asociados, debida a la presencia de huracanes, siendo los del tipo paramétrico los más exitosos. Sin embargo, son realmente pocos los estudios que se enfocan específicamente para 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.

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 boletines climatológicos publicados por la NOAA, *Comisión Federal de Electricidad*, *Centro Meteorológico Nacional*, entre otros, a excepción del radio ciclostrofico que propiamente nunca se reportan en dichos boletines.

### 3. OBJETIVOS.

Realizar un estudio estadístico por presencia de huracanes en las costas de la República Mexicana con el fin de sentar las bases para la implementación de una base de datos para el desarrollo de un sistema de alerta temprana.

Encontrar las expresiones que mejor representan la evolución temporal y espacial de la presión, el viento y el oleaje generado por ciclones tropicales en el Golfo de México.

Obtener una relación que evalúe el valor del radio ciclostrofico en función de parámetros que se reportan en los boletines meteorológicos.

### 4. METODOLOGÍA.

La metodología propuesta aborda a los huracanes como un fenómeno meteorológico, su génesis, crecimiento y disipación, con el objeto de realizar un análisis estadístico de ocurrencia de eventos tanto en los océanos Pacífico como Atlántico y obtener relaciones de la duración de cada evento por año e intensidad, la ocurrencia por mes, por década y el período de la temporada de huracanes.

Asimismo, se presenta el análisis y calibración de los modelos numéricos que describen el comportamiento físico de los huracanes que se aproximan a las costas mexicanas. Se muestran una serie de ecuaciones que modifican y relacionan el comportamiento de diversos parámetros propios del fenómeno del huracán, como son la presión central, la velocidad del viento, el radio de máximos vientos ciclónicos y la localización geográfica del evento.

El estudio se basa en una serie de datos históricamente recabados para diversos eventos de huracanes que se han presentado en la vertiente del Océano Atlántico. Los datos contemplados para el presente análisis incluyen información sobre la posición geográfica de cada aviso de huracán, la presión central alcanzada, las velocidades de desplazamiento y el radio ciclostrofico. Se trabajó con éstos parámetros a fin de encontrar las ecuaciones que modifican directamente a los modelos numéricos de presión, viento y oleaje para finalmente obtener la mejor aproximación de resultados. La ecuación que se encuentra en este estudio es la que relaciona al radio ciclostrofico con la presión central del huracán, al parecer no es suficiente trabajar con una relación de esta naturaleza, ya que los huracanes cambian constantemente de forma y dimensiones, dependiendo no solamente de la presión que éstos alcancen, si no también de la posición geográfica que abarcan, en especial la latitud, la velocidad de desplazamiento y el tiempo de duración del fenómeno para cada una de sus intensidades alcanzadas.

Por último se presenta el caso del huracán Gilberto (1988) con el fin de mostrar un caso de aplicación de los modelos numéricos utilizados.

## 5. LIMITACIONES Y ALCANCES DEL ESTUDIO.

El trabajo realizado es un análisis estadístico e histórico útil para estimar los posibles daños causados por la presencia de un huracán en una determinada zona. Este estudio se desarrolló en función de las intensidades de presión, viento y altura de ola que puede generar un evento ciclónico, es importante señalar que el modelo desarrollado no pronostica la trayectoria que sigue el fenómeno.

Los modelos utilizados sólo son válidos en aguas profundas, para conocer el oleaje en la línea de costa será necesario acoplar los resultados a un modelo de propagación de oleaje.

## 6. ORGANIZACIÓN.

El trabajo se encuentra dividido en cinco capítulos:

**Capítulo 1.** Descripción general del fenómeno del huracán.

Se estudia el desarrollo, crecimiento y clasificación de los ciclones tropicales; la forma en la que se clasifican, la determinación del riesgo que puede llegar a causar, y la presencia de huracanes en México.

**Capítulo 2.** Análisis histórico de Huracanes.

Se presentan la cantidad e intensidad de los huracanes que han pasado cerca del litoral mexicano en los últimos 51 años, tanto en el Océano Atlántico como en el Océano Pacífico. Así como la determinación estadística del período de huracanes en el litoral mexicano.

**Capítulo 3.** Modelos numéricos.

Descripción de los modelos de presión, viento y altura de ola empleados para la calibración.

**Capítulo 4.** Calibración de los modelos.

Determinación de la ecuación que relaciona la presión central del huracán con el parámetro conocido como radio ciclostrofico para la calibración de los modelos. Asimismo, con la ecuación del radio ciclostrofico se realiza la calibración de cada modelo; adicionalmente, se muestran las gráficas de presión, viento y oleaje obtenidas para cinco huracanes modelados.

**Capítulo 5.** Aplicación.

Aplicación de los modelos para el caso del huracán Gilberto (1988), y se muestran los resultados de marea de tormenta.



## **CAPÍTULO 1. Descripción general del fenómeno del huracán.**

# 1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL FENÓMENO.

Regiones como América del Norte y América Central son de las más propensas a los desastres naturales como terremotos, actividad volcánica, tormentas tropicales y huracanes. Es por ello que a partir del siglo XV, los huracanes han sido objeto de estudio en gran parte del continente Americano.

## 1.1 DEFINICIÓN.

En términos científicos, un huracán es una circulación meteorológica cerrada que se propaga sobre aguas tropicales. Se desarrolla en aguas cálidas, alcanza vientos que llegan a exceder los  $118\text{km/h}$  y son sistemas de baja presión.

## 1.2 CARACTERÍSTICAS.

Generalmente, los huracanes se originan en latitudes desde  $8^\circ$  y hasta  $15^\circ$  hacia el Norte y Sur del ecuador. Alcanzan periodos de vida muy variables, puede nacer y disiparse en un periodo de 24 horas o durar hasta tres semanas.

En términos generales, el 75% de los ciclones tropicales se desarrollan en el hemisferio Norte, y la dirección en que viajan depende esencialmente de la temperatura del mar, topografía y fuerza de Coriolis siendo lo más normal de Este a Oeste, caso contrario al hemisferio Sur, donde los huracanes normalmente viajan de Oeste a Este.

Los huracanes se desarrollan en zonas tropicales en donde la fuerza de Coriolis es lo suficientemente grande como para iniciar el movimiento de rotación alrededor de un sistema de baja presión con temperaturas de agua de  $27^\circ\text{C}$  o más cálidas.

## 1.3 FACTORES QUE FAVORECEN LA FORMACIÓN DE UN HURACÁN.

Son tres los factores que generalmente caracterizan una tormenta tropical: fuertes vientos, lluvias densas y sobrelevación en el nivel del mar, los cuales deben ser tomados en cuenta debido a los efectos que cada uno puedan generar por separado o de manera conjunta.

### a) VIENTOS.

Un huracán puede alcanzar velocidades de viento de  $300\text{km/h}$  en el límite del radio de máximos vientos ciclostróficos, con ráfagas que en ocasiones pueden llegar a exceder los  $360\text{km/h}$ . Uno de los factores más importantes en la velocidad del viento es la topografía del lugar, si se considera que la velocidad de viento disminuye a bajas elevaciones debido a la presencia de obstáculos. Ya sea por el impacto directo

del viento o por el arrastre de objetos, el viento es el mayor factor de destrucción, ya que se relaciona directamente a su masa y al cuadrado de la velocidad que presente.

#### b) LLUVIAS.

La lluvia generada por huracanes suele ser poco predecible; estas pueden durar por días o por el contrario disiparse en pocas horas. Factores como la topografía, humedad y velocidad de viento afectan directamente la cantidad de lluvia producida por un huracán.

La intensidad de lluvia por presencia de huracán puede ocasionar dos tipos de destrucción:

- La primera de ellas conocida como filtración, es capaz de llegar a causar daños estructurales en edificios. Dependiendo de su intensidad, las estructuras pueden colapsarse a causa del agua absorbida, también pueden ocurrir desvales debido a la sobresaturación de los suelos.
- La segunda y más importante es la inundación, ya que los daños que puede llegar a causar, no sólo se reflejan en las estructuras, sino que la población puede verse seriamente afectada.

#### c) MAREA DE TORMENTA.

La marea de tormenta es la sobrelevación momentánea del nivel del mar, debido a varios factores como son: la fuerza de arrastre generada por el viento en el cuerpo acuoso al aproximarse a la costa, el equilibrio hidrostático en el agua para equilibrar la depresión atmosférica, la superposición del oleaje y la disminución del fondo marino.

La magnitud de la marea de tormenta está en función de los vientos ciclónicos y del gradiente de presiones que se presente. La marea de tormenta ocasiona daños muy severos en las regiones afectadas.

### 1.4 FASES DE FORMACIÓN DE UN HURACÁN.

Si un grupo de fuertes tormentas se mantienen cercanas un cierto tiempo con las condiciones atmosféricas apropiadas, puede formarse una depresión tropical, en la cual comienza la circulación de vientos hacia el centro y hacia arriba del fenómeno, provocado por el efecto de Coriolis iniciándose con esto la rotación en sentido antihorario si el sistema se ubica en el hemisferio Norte. Este fenómeno alcanza vientos de hasta  $63\text{km/h}$ .

Si los vientos sostenidos sobrepasan los  $64\text{km/h}$  y no alcanzan los  $119\text{km/h}$ , el fenómeno deja de ser denominado como "depresión tropical" y se conoce ahora como "tormenta tropical", en esta etapa el movimiento de rotación es mas notable.

Cuando las presiones en el centro del fenómeno continúan descendiendo, la tormenta tropical se intensifica y puede llegar a ser considerada como huracán, el cual alcanza vientos de más de  $119\text{ km/h}$ . La rotación del sistema alrededor del centro se conoce como "ojo del huracán", en esta zona se tiene una relativa calma, pero se encuentra rodeada de fuertes vientos en donde se presenta la máxima nubosidad del sistema. De esta zona salen largas bandas nubosas y de precipitación, las cuales se conocen como espirales de lluvia.

Las depresiones tropicales que crecen y alcanzan la categoría de huracán generalmente se desarrollan bajo condiciones meteorológicas similares por lo que, de igual forma, siguen el mismo ciclo de vida. El factor principal que determina las diferencias que existen entre un evento y otro es la velocidad que cada uno puede alcanzar como se observa en la Tabla 1.1. Son tres las fases que experimenta un huracán:

EVENTO TIPO	CRITERIO.
Depresión Tropical	Vientos máximos mayores a $63\text{ km/h}$
Tormenta Tropical	Vientos máximos entre $63\text{ km/h}$ y $119\text{ km/h}$
Huracán	Vientos máximos mayores a $119\text{ km/h}$

Tabla 1.1. Clasificación del desarrollo del huracán según su intensidad de viento.

#### 1.4.1 NACIMIENTO

Las depresiones tropicales y huracanes se generan en latitudes de  $8^\circ$  a  $15^\circ$  Norte y al Sur del Ecuador, como resultado de las descargas de calor y humedad en la superficie de océanos tropicales. Estos ayudan a mantener el calor atmosférico y equilibrio de humedad entre zonas tropicales y no tropicales; de manera que si este fenómeno no se presentara en los océanos ecuatoriales el calor aumentaría continuamente.

Para que se forme un huracán se requiere contar con una temperatura de superficie del mar de cuando menos  $27^\circ\text{C}$ . En verano, en el Caribe y el Atlántico, se cuenta con temperaturas de  $29^\circ\text{C}$ , lo cual se convierte en una situación favorable para la formación de los mismos.

#### 1.4.2 CRECIMIENTO.

Mientras que el nivel de energía del fenómeno aumenta, el ciclo se mantiene y así el fenómeno comienza a tener un movimiento de traslación con velocidades de alrededor de  $32\text{ km/h}$  en su formación hasta mayores de  $119\text{ km/h}$  una vez que ha alcanzado su total desarrollo.

Se presentan zonas de mayor precipitación con máximos niveles de elevación del nivel del mar. La estructura nubosa del fenómeno, definida por una radial puede presentar una longitud de aproximadamente  $450\text{ km}$ .

#### 1.4.3 DISIPACIÓN.

Un huracán generalmente se disipa en aguas frías al seguir un modelo climatológico dominante hasta que pierde energía a causa de su decaimiento, o cuando toca tierra debido a la fricción generada entre el cuerpo nuboso y la superficie.

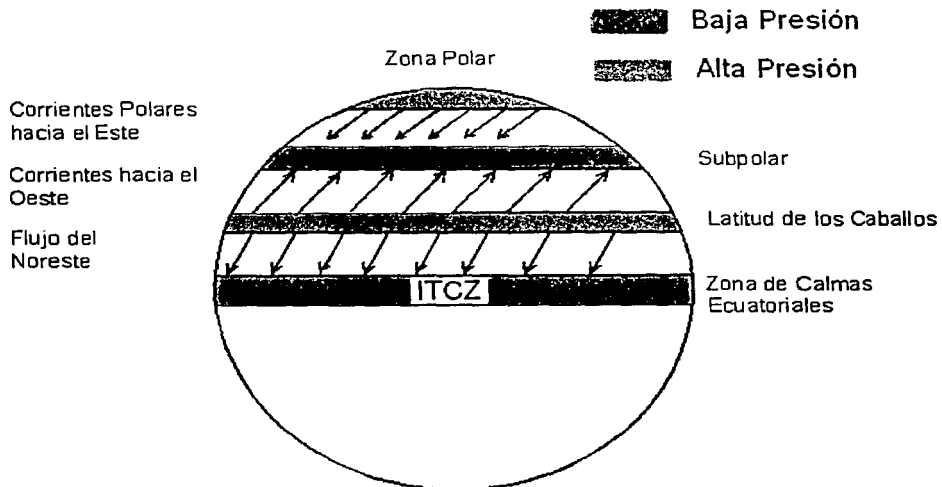
## 1.5 MOVIMIENTO DE LOS HURACANES.

En el modelo atmosférico existen tres *cinturones* principales de presión:

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

El cinturón *subpolar* de baja presión, ubicado en latitudes mayores a los 65°, se presenta principalmente un efecto térmico de mayor temperatura en el agua de los océanos que en la zona terrestre, lo cual genera una depresión con respecto a la alta presión constante sobre los casquetes polares. Los casquetes polares con bajas temperaturas y en consecuencia baja humedad, presentan una zona de baja presión todo el año.

Los vientos del Este de ambos hemisferios convergen en un área cercana al ecuador llamada "Zona Intertropical de Convergencia (ITCZ)" o zona de calmas ecuatoriales, donde debido al constante calentamiento solar presenta una región de alta convección y por lo mismo una zona de baja presión constante, produciendo una banda estrecha de nubes y tormentas que cercan las porciones del globo. (Figura 1.0)



**Figura 1.0** Sistema idealizado del comportamiento terrestre de presiones y vientos.

La trayectoria de los huracanes depende principalmente de la zona de viento en la cual está situado. Un huracán que se origina en el Atlántico Tropical del Este, por ejemplo, es conducido hacia el Oeste por los vientos comunes en las zonas tropicales.

Eventualmente, estas tormentas dan vuelta hacia el Noreste alrededor del alto subtropical y emigran en latitudes más altas. Consecuentemente, el Golfo de México y las costas del Este de los Estados Unidos están en el riesgo de experimentar uno o más huracanes cada año. (Figura 1.1)



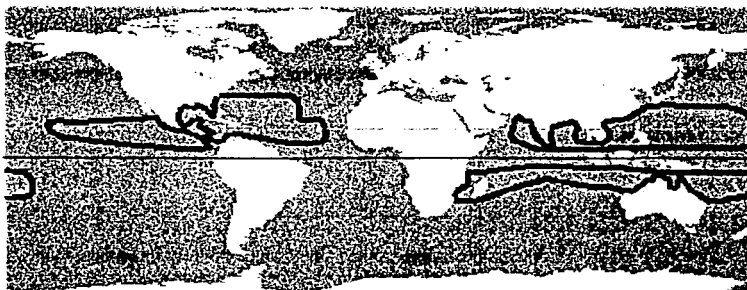
Figura 1.1 Trayectoria que siguen los huracanes.

Los huracanes se mueven en las latitudes medias y son conducidos hacia el Noroeste por los vientos del Oeste, de vez en cuando se intercambian con los sistemas atmosféricos de la latitud media. Los huracanes ganan su energía en el agua superficial caliente de las zonas tropicales, lo que explica el por qué los huracanes se disipan rápidamente una vez que llegan a agua fría.

## 1.6 ACTIVIDAD.

Aunque los huracanes que llegan a las costas Atlánticas y Pacíficas reciben mucha atención, éstos representan solamente el 25% de los ciclones tropicales a nivel mundial. Estas peligrosas tormentas pueden presentarse en cualquier océano, excepto en el Ártico. En la figura 1.2 se muestran las zonas en el planeta donde se originan este tipo de tormentas.

Anualmente se presentan aproximadamente 96 ciclones tropicales en todo el mundo. Una de las áreas más afectadas es el Noroeste del océano Pacífico que tiene en promedio 25 huracanes cada año. Otra zona de gran actividad es el océano Índico, favorecida por la cercanía a la Zona de Convergencia Intertropical y las aguas calientes del océano Índico.



*Figura 1.2 Regiones donde se originan ciclones tropicales.*

En el hemisferio Sur también se presentan ciclones tropicales pero estos se desarrollan solamente en el Oeste del océano Pacífico y en el océano Índico. Cerca del ecuador existen áreas de agua caliente que generan igualmente fuertes tormentas, pero no se pueden desarrollar a nivel de tormenta tropical o huracán ya que la fuerza de Coriolis en esa zona es casi nula.

## 1.7 SISTEMAS DE EVALUACIÓN.

Para determinar la categoría a la que pertenece cada evento se deben considerar factores como la presión mínima y las velocidades de viento sostenido que presente, además de los niveles de altura de ola, los cuales pueden ser muy variables dependiendo de las condiciones atmosféricas y batimétricas.

### 1.7.1 ESCALA SAFFIR-SIMPSON.

La escala Saffir-Simpson, es un sistema de evaluación, mostrado en la Tabla 1.2 el cual presenta cinco categorías para la clasificación de huracanes, basado en la intensidad que pueda alcanzar. Generalmente se utiliza para hacer estimaciones del daño así como la inundación que se pueda presentar a lo largo de las costas. Para este sistema la velocidad del viento es un factor determinante, al igual que la presión.

- **Categoría Uno.**  
Alcanza vientos de  $118\text{km/h}$  hasta  $154\text{km/h}$ . Generalmente la marea de tormenta oscila entre  $1\text{m}$  y  $1.8\text{m}$  sobre el nivel del mar. Los mayores daños son causados en estructuras. Existen inundaciones menores a lo largo de las costas.
- **Categoría Dos.**  
Presenta vientos de  $154\text{km/h}$  a  $178\text{km/h}$ . La marea de tormenta registrada es de  $1.8\text{m}$  a  $2.7\text{m}$  sobre el nivel del mar.
- **Categoría Tres.**  
Los vientos son de  $178\text{km/h}$  a  $210\text{km/h}$ , generan sobrelevaciones de  $2.7\text{m}$  a  $3.9\text{m}$  sobre el nivel del mar. Se presentan inundaciones considerables.

- **Categoría Cuatro.**  
Con vientos de  $210\text{ km/h}$  a  $250\text{ km/h}$ . El registro de marea de tormenta presenta un rango de  $3.9\text{ m}$  a  $5.6\text{ m}$  sobre el nivel del mar. Exhiben condiciones similares a la categoría anterior.
- **Categoría Cinco.**  
Sustenta vientos mayores a  $250\text{ km/h}$  y la marea de tormenta puede ser mayor a  $5.6\text{ m}$ .

Categoría	Velocidad de Viento ( $\text{km/h}$ )
Depresión Tropical (DT)	hasta 64
Tormenta Tropical (TT)	64 a 118
Huracán Clase 1 (H1)	118 a 154
Huracán Clase 2 (H2)	154 a 178
Huracán Clase 3 (H3)	178 a 210
Huracán Clase 4 (H4)	210 a 250
Huracán Clase 5 (H5)	más de 250

Tabla 1.2 Escala Saffir–Simpson.

## 1.8 DETERMINACIÓN DEL RIESGO.

En cualquier país expuesto al riesgo de enfrentar este fenómeno debe existir un plan de mitigación de impacto de huracanes, así como la facilidad de poder valorar cualquier situación de riesgo. Un plan de mitigación básico debe contener datos históricos de la actividad de los huracanes con registros de frecuencias, ocurrencias y la magnitud de los daños causados por éste.

El daño que un huracán puede causar en un país se mide en función de su vulnerabilidad frente a éste, en donde la vulnerabilidad abarca diferentes dimensiones: físicas, sociales, económicas y políticas.

Para poder evaluar los futuros riesgos es necesario estudiar las tendencias históricas y correlacionarlas con los probables cambios posteriores.

En las últimas tres décadas, se ha reducido el impacto que un huracán pueda llegar a causar en alguna región, debido a la tecnología que se ha desarrollado por medio de la cual se puede identificar una depresión tropical o el desarrollo de un huracán.

Estados Unidos es hoy por hoy el país que más ha contribuido a esta prevención, aunque, los más beneficiados con estos estudios han sido países en vías de desarrollo con los sistemas de alertamiento desarrollados.

El primer modelo computacional diseñado para la prevención de huracanes fue desarrollado en 1968 por el *National Hurricane Center (NHC)*, de ahí surgen varios modelos, los que varían en capacidad de predicción y metodología.



El modelo del *NHC* evalúa los datos recibidos de tormentas tropicales y huracanes en el Pacífico, por medio de este se puede predecir la intensidad del evento.

En los años sesenta también realizó un modelo llamado *LODO* el cual simulaba los efectos causados por un huracán cuando se acerca a tierra, así como los daños que se presentan por una inundación.

EL *LODO*, es un modelo informativo corrido por el *NHC*, que estima la dimensión de una tormenta, alturas de ola y velocidad en vientos; tomando en cuenta elementos como la presión, el tamaño y la trayectoria.

El modelo de *HURISK*, utiliza la información histórica de 852 huracanes registrados desde 1886, estos archivos tiene información de la posición de las tormentas, el máximo viento sostenido alcanzado y las presiones centrales, de tal manera que si el usuario proporciona datos como el radio de interés, el modelo automáticamente arroja fechas, vientos máximos y velocidades.

## 1.9 PRESENCIA DE HURACANES EN MÉXICO.

México se encuentra delimitado por dos grandes océanos, los cuales forman una línea costera de alrededor de 11,000km de longitud, con una población aproximada de 12 millones de habitantes asentados a lo largo de ésta.

Año con año se presentan alrededor de 100 depresiones tropicales o huracanes en la República Mexicana, de los cuales únicamente un promedio de 10 llegan a ser tormenta tropical, y 6 huracanes.

Considerando que el desarrollo de las zonas costeras de México ha tenido gran impulso en los últimos tiempos como en el sector comercio, zonas industriales, pesqueras y explotación de zonas petroleras, es necesario la realización de estudios de vulnerabilidad, con objeto de prever posibles daños debidos al impacto de los huracanes en mares y costas de la República Mexicana.

Debido a las grandes concentraciones humanas así como el proceso de urbanización creciente, en México se ha vuelto más evidente la magnitud de los daños en áreas expuestas a ciclones tropicales. También se ven afectados los medios de comunicación, y transportes (aéreo, terrestre, fluvial y marítimo).

En las aguas del Golfo de México y el Caribe se presenta primero el fenómeno de calentamiento, por lo tanto, generan los primeros ciclones de la temporada. La mayor parte de los huracanes que se presentan se desarrollan en el hemisferio Norte (75%) y de estos sólo uno de cada tres se desarrolla dentro del Océano Pacífico. Los huracanes que se originan en el Noreste del Pacífico son los que pueden afectar las costas de México. El Golfo de México es una vertiente del Océano Atlántico el cual es el mayor receptor de huracanes del hemisferio Norte.

La temporada de huracanes en México se supone comienza el primero de junio y termina el 30 de noviembre regularmente; el 84% de éstos se registran entre agosto y septiembre. Para México el periodo de máximo riesgo es al principio y fin de este intervalo. Ahora bien, las tormentas que se generan en el hemisferio Norte regularmente van al Oeste; en tanto que las que ocurren en el hemisferio Sur viajan al Este.

Particularmente en el caso de México se presentan un promedio de 23 ciclones o huracanes por año, de estos alrededor de cuatro se aproximan y penetran al territorio nacional. En lo que corresponde a la vertiente del Pacífico se registra una ocurrencia del 61%, mientras que para la vertiente Atlántica únicamente el 39%.

En el Océano Atlántico y Océano Pacífico se presentan seis regiones matrices o de generación de ciclones, para México son relevantes cuatro:

- a) La primera se ubica en el golfo de Tehuantepec y se activa generalmente durante la última semana de mayo. Los huracanes que surgen en esta época tienden a viajar hacia el Oeste alejándose de México; los generados de julio en adelante, describen una parábola paralela a la costa del Pacífico y a veces llegan a penetrar en tierra.
- b) La segunda región se localiza en la porción Sur del Golfo de México, en la denominada "Sonda de Campeche"; los huracanes nacidos ahí aparecen a partir de junio con ruta Norte, Noroeste, afectando a los estados de Veracruz y Tamaulipas.
- c) La tercera se encuentra en la región oriental del mar Caribe, y sus huracanes aparecen desde julio y especialmente entre agosto y octubre. Estos huracanes presentan gran intensidad y largo recorrido, afectan frecuentemente al estado de Yucatán y a la Florida en Estados Unidos.
- d) La cuarta se encuentra en la región oriental del Atlántico y se activa principalmente en agosto. Los huracanes de esta zona son de mayor potencia y recorrido, generalmente se dirigen al Oeste penetrando en el Mar Caribe, afectando también los estados de Yucatán, Tamaulipas y Veracruz, pero además tienden a llegar hacia el Norte afectando a las costas de EUA.

Basándose en los registros obtenidos se han podido determinar áreas en las que al menos ha penetrado a tierra un ciclón tropical. Detectando zonas de ingreso se puede ubicar a los estados con mayor índice de ocurrencia de penetración entre los que se encuentran: Baja California Sur, Sinaloa, Michoacán, Guerrero, Quintana Roo, y Tamaulipas.

La tabla 1.3 muestra los estados costeros de la República y el número de eventos que han recibido en los últimos tiempos.

<b>CICLONES TROPICALES QUE PENETRARON EN LOS ESTADOS COSTEROS</b>	
Baja California	7
Baja California Sur	38
Campeche	37
Colima	7
Chiapas	2
Guerrero	19
Jalisco	9
Michoacán	19
Nayarit	4
Oaxaca	9
Quintana Roo	85
Sinaloa	36
Sonora	12
Tabasco	10
Tamaulipas	48
Veracruz	43
Yucatán	38

*Tabla 1.3. Eventos registrados en los estados costeros.*

## **CAPÍTULO 2. Análisis histórico de huracanes.**

## 2 ANÁLISIS HISTÓRICO DE HURACANES

Con el objeto de realizar un análisis estadístico de los huracanes que han tenido influencia en la República Mexicana a lo largo de los últimos cincuenta años, se utilizó la base de datos generada en el Instituto de Ingeniería por Silva y Díaz (2001). Esta base se generó a partir del registro de los boletines meteorológicos publicados por la *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)* y cuenta con los datos más significativos de cada huracán, como son: localización geográfica del ojo del huracán, presión mínima, fecha (mes, día y hora) e intensidad. Esta base de datos tiene cada aviso con un espaciamiento temporal de seis horas.

### 2.1 DELIMITACIÓN DE ÁREAS

El estudio consistió en identificar de la base de datos los huracanes que incidieron sobre las costas de la República. Para obtener resultados con mayor resolución, se trabajó con dos zonas, la primera que corresponde al Océano Pacífico y la segunda abarca el Océano Atlántico, mismas que a su vez, cada una de las zonas se dividieron en subzonas.

#### 2.1.1 ZONA DEL ATLÁNTICO

El área de estudio sobre el Océano Atlántico mexicano, la conforman las tres subzonas o regiones, que se denominaron: A1, A2, A3, las cuales se muestran en la Figura 2.1.

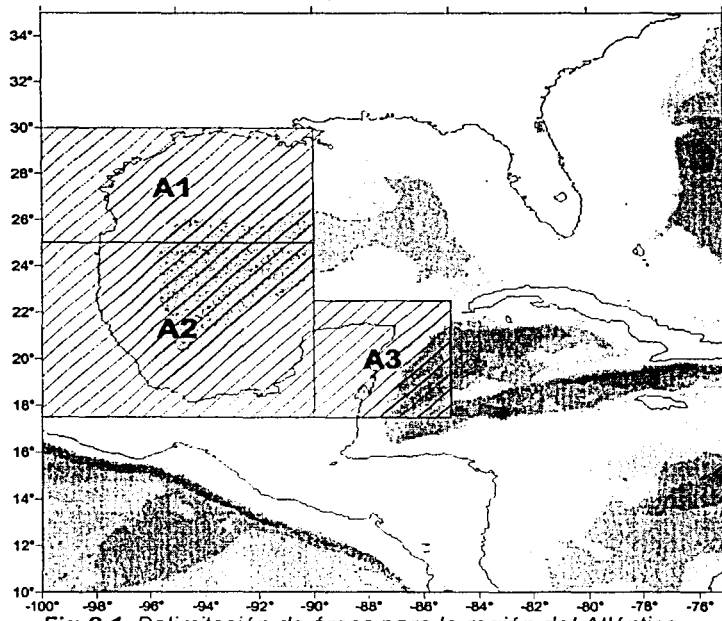


Fig. 2.1. Delimitación de áreas para la región del Atlántico.

A continuación se muestran las coordenadas que delimitan a cada región.

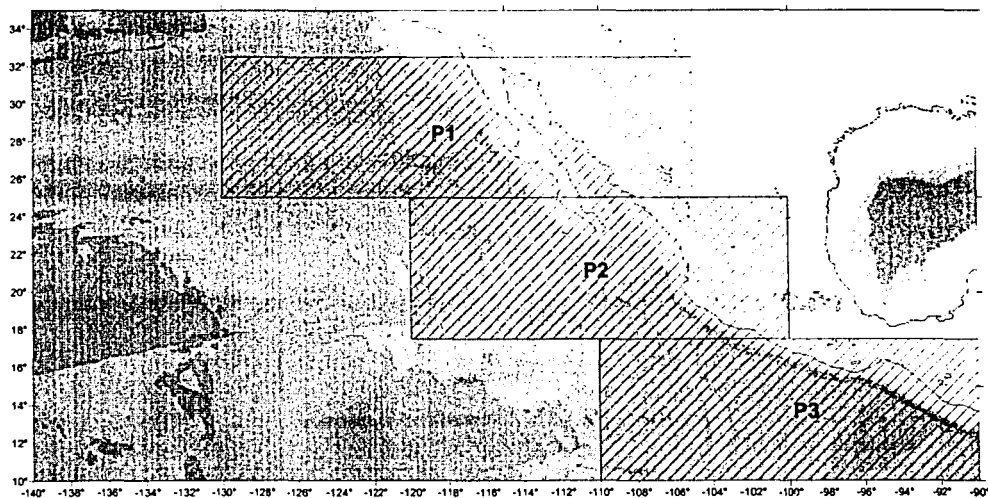
Región A1:  $(-100W, 30N), (-90W, 30N)$   
 $(-100W, 25N), (-90W, 25N)$

Región A2:  $(-100W, 25N), (-90W, 25N)$   
 $(-100W, 17.5N), (-90W, 17.5N)$

Región A3:  $(-90W, 22.5N), (-85W, 22.5N)$   
 $(-90W, 17.5N), (-85W, 17.5N)$

### 2.1.2 ZONA DEL PACÍFICO

En el caso del Océano Pacífico, se delimitaron las áreas de estudio de la siguiente manera, P1, P2, P3 son las zonas de Pacífico 1, Pacífico 2 y Pacífico 3, respectivamente, como se muestra en la Figura 2.2.



*Fig.2.2 Delimitación de áreas para la región del Pacífico.*

Las coordenadas que delimitan a las tres regiones que conforman la zona del Pacífico son:

Región P1:  $(-130W, 32.5N), (-105W, 32.5N)$   
 $(-130W, 25N), (-105W, 25N)$

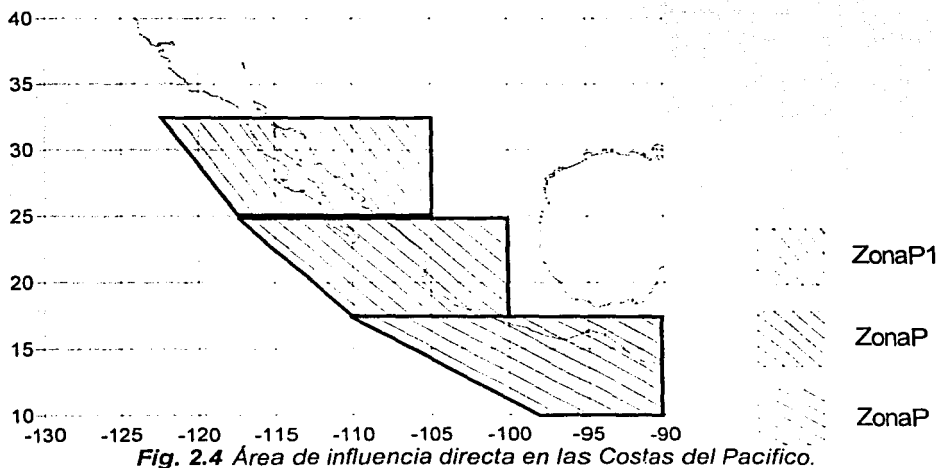
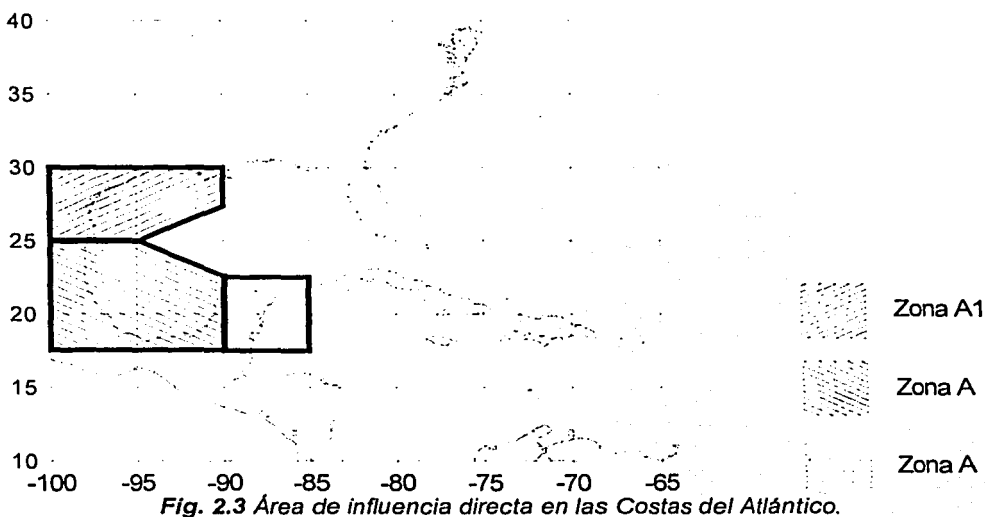
Región P2:  $(-120W, 25N), (-100W, 25N)$   
 $(-120W, 17.5N), (-100W, 17.5N)$

Región P3:  $(-110W, 17.5N), (-90W, 17.5N)$   
 $(-110W, 10N), (-90W, 10N)$

## 2.2 METODOLOGÍA

Para cada una de las regiones, de ambos litorales, se trazó una recta paralela a la línea de costa, a una distancia aproximada de dos grados, con el fin de evitar trabajar con información no relevante a cada área. Por tal motivo, se realizó un filtro en los datos de cada zona, reduciendo significativamente la cantidad de estos. Este filtro consistió en seleccionar únicamente los datos que se encontraran a partir de la recta hacia adentro de las costas de la República y al límite de la región seleccionada.

De este modo se seleccionaron los datos de los eventos que tienen influencia directa en las costas de la República Mexicana, siendo estos los que se encuentran contenidos dentro de la nueva área de estudio. La nueva delimitación para cada zona se muestra en las Figuras 2.3 y 2.4.



Como se mencionó anteriormente, los datos registrados en la NOAA contienen información sobre la localización geográfica exacta del centro del huracán en cada aviso, longitud y latitud. Conociendo la localización de cada aviso se puede ubicar fácilmente en cual de las tres regiones se encuentra, asumiendo que si no está dentro de una de las tres regiones ese dato no será útil para el análisis. Después de realizar la selección de datos y tener la ubicación de cada uno de éstos, se logró tener un archivo de datos para cada región, generando seis bases de datos (P1, P2, P3, A1, A2, A3).

## 2.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Al concluir este proceso, se realizó por separado el análisis estadístico, el cual consistió en los siguientes pasos:

- **SELECCIÓN DE AVISOS DE ACUERDO A LA CATEGORÍA A LA QUE PERTENECEN**

Una vez seleccionados los avisos que se han registrado en cada una de las zonas, se procedió a clasificarlos según su intensidad, para ello se utilizó la escala *Saffir – Simpson*.

- **DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE AVISOS REGISTRADOS POR AÑO Y POR INTENSIDAD PARA CADA ÁREA**

Una vez realizada la selección de categorías en cada zona, el siguiente paso fue el de contabilizar el total de avisos registrados por año y por categoría, para lo cual se generó una tabla que contiene el registro por año y aviso; misma que se presentará en la sección de resultados.

- **EVALUACIÓN DEL NÚMERO TOTAL DE HORAS DE AFECTACIÓN POR CATEGORÍA**

La base de datos utilizada tiene registrados los avisos de cada evento en intervalos de 6 horas, por lo que la evaluación del número de horas y por categoría que fue afectada cada una de las regiones se realizó de forma directa; número de avisos por categoría multiplicado por seis horas.

- **REGISTRO DE LA CANTIDAD DE EVENTOS OBTENIDOS POR DÉCADA E INTENSIDAD**

Con el objeto de determinar la persistencia por mes y por década, se cuantificaron con este criterio el número de eventos según su categoría para cada una de las regiones.

Cabe mencionar, que el primer intervalo incluye un período de 11 años; de 1949 a 1960, debido a que la base de datos cuenta con registros correspondientes a 51 años, de 1949 a 2000.



- **COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR MES EN LAS DÉCADAS**

Una vez realizada la clasificación anterior, se procedió a comparar los resultados obtenidos, mismos que se presentan al final del presente capítulo.

## 2.4 RESULTADOS OBTENIDOS

### 2.4.1 REGIÓN DEL ATLÁNTICO

#### 2.4.1.1 SELECCIÓN DE AVISOS DE ACUERDO A LA CATEGORÍA

En la Tabla 2.1 se presentan los resultados de número de avisos que afectaron cada una de las zonas en el período de estudio, 1949 a 2000, por categoría.

CATEGORÍA	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Depresión Tropical	107	153	127
Tormenta Tropical	195	242	77
Clase 1	64	85	8
Clase 2	12	36	14
Clase 3	17	18	17
Clase 4	21	16	7
Clase 5	6	4	8
<b>Total</b>	<b>422</b>	<b>554</b>	<b>258</b>

*Tabla. 2.1. Determinación del número de avisos según sus categorías en las distintas zonas del Atlántico.*

En la tabla anterior se puede observar que en la Zona 2 se han registrado un mayor número de avisos, 554, mientras que en las zonas 1 y 3, han tenido 422 y 258 avisos, respectivamente. De la misma tabla, también se puede observar que el mayor número de avisos corresponde a tormentas tropicales, seguido por depresiones tropicales, es decir eventos aparentemente de poca intensidad.

En lo que respecta a eventos de clase 5, se puede apreciar que sólo representa alrededor del 1.5% del total. Podría parecer poco significativo si únicamente se habla de ocurrencia de eventos, pero no debe olvidarse que se deben de tomar en cuenta otros aspectos para poder determinar la importancia de cada categoría.

### 2.4.1.2 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE AVISOS REGISTRADOS POR AÑO Y POR INTENSIDAD PARA CADA ÁREA

AÑO	ZONA 1	ZONA2	ZONA3
1949	14	26	0
1950	9	14	1
1951	0	20	10
1952	0	0	3
1953	0	6	7
1954	12	12	0
1955	0	31	7
1956	3	20	5
1957	10	7	0
1958	6	5	0
1959	17	14	1
1960	10	8	0
1961	9	15	10
1962	0	0	0
1963	13	0	0
1964	16	0	26
1965	1	5	10
1966	0	22	3
1967	10	22	6
1968	2	4	5
1969	2	10	10
1970	9	20	14
1971	32	14	18
1972	0	0	15
1973	11	7	10
1974	4	15	6

AÑO	ZONA 1	ZONA2	ZONA3
1975	3	13	9
1976	9	0	0
1977	0	4	3
1978	11	8	0
1979	18	29	5
1980	27	9	9
1981	9	0	0
1982	0	0	2
1983	19	0	0
1984	0	7	0
1985	16	0	1
1986	5	0	0
1987	4	0	0
1988	0	24	9
1989	21	7	6
1990	0	9	3
1991	0	0	2
1992	2	0	0
1993	8	16	2
1994	0	0	4
1995	6	58	22
1996	0	16	5
1997	7	0	0
1998	46	8	3
1999	21	43	6
2000		6	0
	422	554	258

*Tabla 2.2 Total de eventos registrados por año en las tres zonas del Atlántico.*

De la tabla 2.2, se puede apreciar que la zona denominada Atlántico 1 alcanzó el máximo número de avisos en el año de 1998, con 46, mientras que la zona Atlántico 2 tuvo 58 en 1995 y la zona Atlántico 3 se registraron 26 en 1964.

Descartando los años en que no se registró algún evento, se tiene que uno es el número menor de avisos registrados en las tres zonas del Atlántico. En general se tiene que el mayor número de eventos registrados por año es 58 en la zona Atlántico 2 y el mínimo fue de 1.

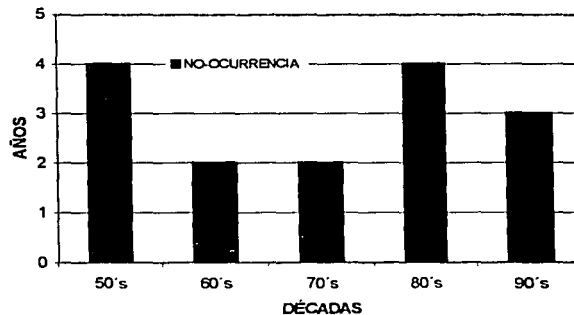
Un dato relevante y que debe ser considerado es el número de años en que no se presentó algún evento en cada zona; de donde tenemos la siguiente tabla.

ZONA	NO OCURRENCIA AÑOS
Atlántico 1	15
Atlántico 2	16
Atlántico 3	17

*Tabla 2.3. Total de eventos de no-ocurrencia por zona.*

Si de la tabla 2.3 se analiza los años de no-ocurrencia y además se divide el intervalo por décadas, se tiene como resultado las gráficas siguientes.

De la Figura 2.5 se puede observar que la zona de Atlántico 1 tiene cuatro eventos para la década de los cincuentas y ochentas, dos para los sesentas y setentas y finalmente, tres en los ochentas. De la misma figura si se observa la tendencia del número de presentaciones por década parece que habrá una disminución de la no-ocurrencia de eventos en la década actual.



*Fig. 2.5 No-ocurrencia de eventos para la zona Atlántico 1.*

Para la zona Atlántico 2, en la Figura 2.6, se puede ver que para las primeras tres décadas se tienen pocos años de no-ocurrencia y para las últimas dos décadas se incrementó el registro de no-ocurrencia, siendo notoria la tendencia hacia la disminución de la no-ocurrencia. Puede observarse que en la década de los sesenta existen registros de tres años consecutivos de no-ocurrencia, los cuales se presentaron a principios de la misma; en la siguiente década se tienen únicamente dos años que presentó este fenómeno. Para la década de los ochenta la situación se duplicó ya que se presentaron 6 años de no-ocurrencia, los cuales se encuentran en dos intervalos de tres años cada uno, siendo el primero a principios de la década, como ocurrió en los sesenta, y el segundo a mitad de la misma, para la década de los noventa se tiene registro de cuatro años de no-ocurrencia.

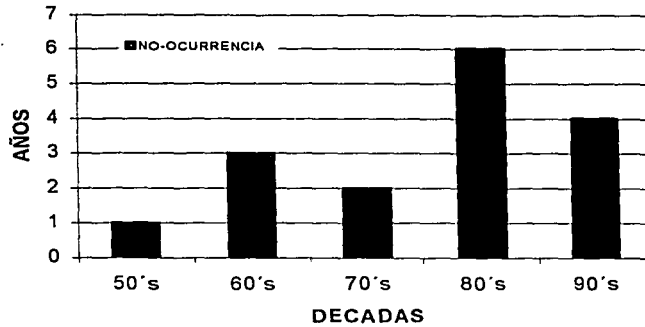


Fig. 2.6 . No-ocurrencia de eventos para la zona Atlántico 2.

Para el Atlántico 3, se tienen 5 eventos para los cincuentas y los ochentas, 2 eventos para los sesentas y setentas y 3 para los noventas. Como se puede ver en la figura 2.7.

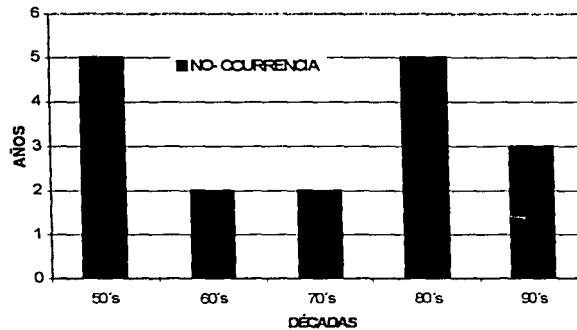


Fig. 2.7. No-ocurrencia de eventos para la zona Atlántico 3.

En las gráficas anteriores se puede apreciar la gran similitud en las tablas de la zona Atlántico 1 y Atlántico 3, debido a que presentan la misma tendencia, lo cual es más que lógico si se toma en cuenta que la mayoría de las veces la trayectoria que siguen los huracanes que azotan al golfo de México entra por la zona Atlántico 3 y sale por Atlántico 1.

Por otro lado, de estas gráficas se puede suponer la tendencia probable para las siguientes décadas, lo cual representa una disminución en la no-ocurrencia de eventos o que existe una tendencia a la ocurrencia de cuando menos 1 evento por año.

Con respecto a Atlántico 2, tiene una situación particular debido a que la tendencia de no-ocurrencia en esta zona es completamente diferente a las otras dos. Para esta zona, se tiene una marcada tendencia hacia la baja, es decir tendería a disminuir la no-ocurrencia.

### 2.4.1.3 EVALUACIÓN DEL NUMERO DE HORAS DE AFECTACIÓN POR CATEGORÍA

Como se mencionó, se realizó un conteo del total de horas que se registraron en cada categoría, obteniéndose los resultados que se muestran a continuación:

Atlántico 1		Atlántico 2		Atlántico 3	
Categoría	Horas	Categoría	Horas	Categoría	Horas
DT	600	DT	897	DT	792
TT	1085	TT	1413	TT	462
C-1	376	C-1	498	C-1	48
C-2	72	C-2	216	C-2	84
C-3	99	C-3	108	C-3	72
C-4	112	C-4	96	C-4	43
C-5	36	C-5	24	C-5	48
<b>Total</b>	<b>2380</b>	<b>Total</b>	<b>3252</b>	<b>Total</b>	<b>1549</b>

*Tabla 2.4. Duración en horas por categoría en las tres zonas del Atlántico.*

De la tabla 2.4 se puede ver que la zona que presentó la mayor duración fue Atlántico 2, con un porcentaje de 45.29%. Es importante resaltar que esta zona es la transición entre la parte que entran los huracanes (zona 3) y la zona por la que salen (zona 1). Cabe mencionar que para la zona del Atlántico en general la categoría con mayor incidencia fue la denominada "Tormenta Tropical", la cual alcanzó un total de 2960 horas y que además alcanzó su máximo en la zona Atlántico 2.

Con respecto a la zona Atlántico 3, aun cuando no presentó el mayor número de horas en general, si es la que tiene el mayor número de horas en la categoría 5, con un total de 48 horas. En lo que respecta a la categoría 4, la zona 1 tuvo mayor incidencia con 112 horas en el intervalo.

A continuación se presentan en forma de gráficas los resultados obtenidos para cada región en que se dividió al Atlántico.

ATLÁNTICO 1

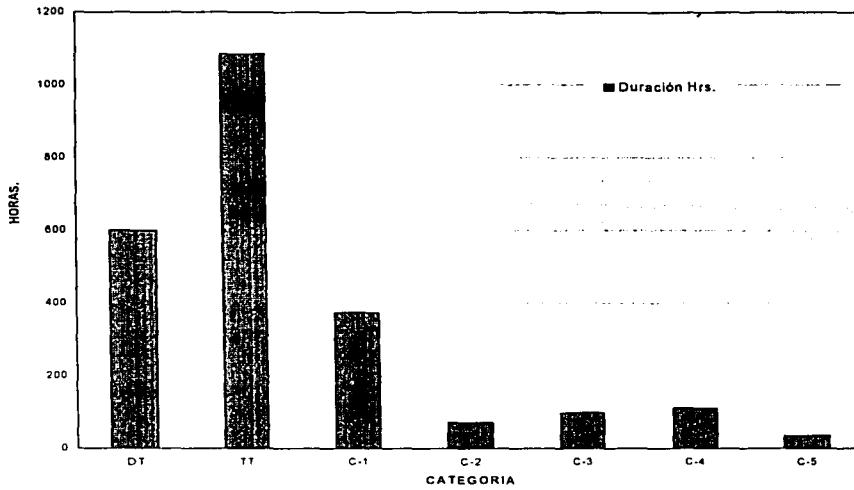


Fig. 2.8. Tiempo en horas vs Categoría para Atlántico 1.

ATLÁNTICO 2

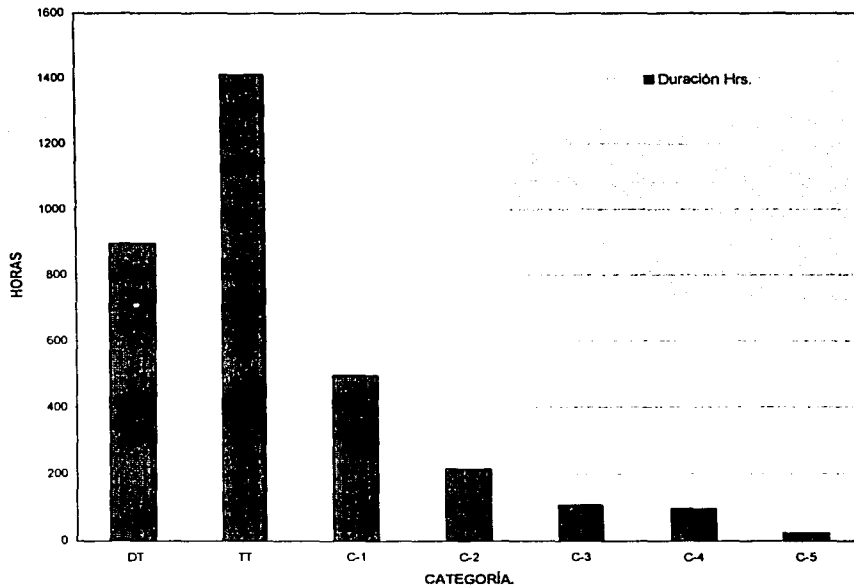


Fig. 2.9. Tiempo en horas Vs Categoría para Atlántico 2.

ATLÁNTICO 3

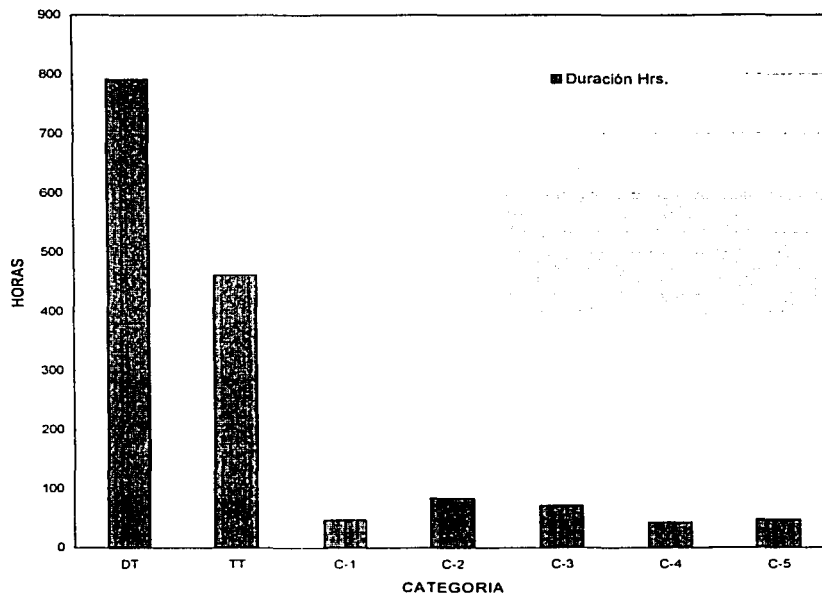


Fig. 2.10. Tiempo en horas vs Categoría para Atlántico 3.

### 2.4.1.4 REGISTRO DE LA CANTIDAD DE EVENTOS OBTENIDOS POR DÉCADA E INTENSIDAD

Como se mencionó en la descripción del procedimiento, de las tablas obtenidas para cada zona se realizó una serie de comparaciones entre ellas, determinándose aspectos característicos de la región del Atlántico. Para cada década de las tres subzonas, se elaboraron las tablas y gráficas que determinan el valor del total de eventos registrados para cada mes

#### ATLÁNTICO UNO

1949-1960								1961-1970									
Categoría								Categoría									
DT	TT	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5		DT	TT	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5			
Mayo	1	5					6	Mayo							0		
Junio	9	8		1		2	20	Junio		2					2		
Julio	5	10	5				20	Julio							0		
Agosto		4					4	Agosto	7	4	2	1	1		15		
Septiembre	1	17	1				19	Septiembre	7	10	8	2	1	4	5		
Octubre		5	4		2	1	12	Octubre	2			1	4	1	8		
Noviembre							0	Noviembre							0		
	16	49	10	1	2	3	0	81		16	16	10	4	6	5	5	62
1971-1980								1981-1990									
Categoría								Categoría									
DT	TT	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5		DT	TT	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5			
Mayo							0	Mayo							0		
Junio							0	Junio	8	6	4				18		
Julio	2	9	2				13	Julio		1					1		
Agosto	4	8	1	1	2	1	18	Agosto	3	11	13	2	1		30		
Septiembre	22	35	12	3	2	2	76	Septiembre	4	5					9		
Octubre							0	Octubre		7	9				16		
Noviembre	3	5					8	Noviembre							0		
	31	57	15	4	4	3	1	115		15	30	26	2	1	0	0	74
1990-2000																	
Categoría																	
DT	TT	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5											
Mayo							0										
Junio	4	4					8										
Julio	8	5					13										
Agosto	3	10	3	1	4	9	30										
Septiembre	14	24					38										
Octubre							0										
Noviembre							0										
	29	43	3	1	4	9	0	89									

Tabla 2.5 Registros del total de eventos por década por mes para la zona Atlántico 1.



Se puede observar, de la tabla 2.5, que la década que presentó mayor incidencia de eventos en la zona Atlántico 1 es la de los setentas, con 115 eventos, la década anterior con 62 eventos es la de menor presencia de huracanes.

El mes de septiembre, en la década de los setentas presenta el mayor registro de datos, con un total de 76 eventos, en la década de los ochenta se tuvo el menor registro con 9 eventos registrados.

El mes de mayo no se puede considerar como representativo para la temporada de huracanes debido a que sólo en la década de los cincuenta presento 6 eventos y en las demás no mostró ningún registro. Algo similar se tiene para noviembre, el último mes de registro de la temporada, ya que únicamente para la década de los setenta registró ocho eventos

## ATLÁNTICO DOS

1949-1960		Categoría							
	DT	TT	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5		
Mayo									
Junio	8	21	6	1				36	
Julio	3	4	2					9	
Agosto	1	2	1	6	2	1		13	
Septiembre	6	44	11	14	4			79	
Octubre	3	13	6	4				26	
Noviembre								0	
	21	84	26	25	6	1	0	163	

1961-1970		Categoría							
	DT	TT	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5		
Mayo									
Junio		9							9
Julio									0
Agosto									0
Septiembre	2	6	4	4	5	1	2	24	
Octubre	26	6	6		2	10		50	
Noviembre		15						15	
	37	27	10	4	7	11	2	98	

1971-1980		Categoría							
	DT	TT	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5		
Mayo									
Junio								0	
Julio		3	1					4	
Agosto	3	15	7	1	2			28	
Septiembre	15	40	9			1	2	67	
Octubre								0	
Noviembre								0	
	21	56	16	1	2	1	2	99	

1981-1990		Categoría							
	DT	TT	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5		
Mayo									
Junio									0
Julio									0
Agosto	1	6	2	1				10	
Septiembre	11	9	3	3	2	2		30	
Octubre	2	5						7	
Noviembre								0	
	14	20	5	4	2	2	0	47	

1991-2000		Categoría							
	DT	TT	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5		
Mayo	1	2	3	4	5	6	7	0	
Junio		12						12	
Julio		2						2	
Agosto	10	24	6	1	1	1		43	
Septiembre	12	9	3	1				25	
Octubre	24	20	19					63	
Noviembre		2						2	
	60	55	28	2	1	1	0	147	

Tabla 2.6 Registros del total de eventos por década en cada mes para la zona Atlántico 2.

En la tabla 2.6 se aprecia que la zona de Atlántico 2 en la década de los cincuenta se tuvo mayor incidencia, con 163 eventos, y la década con menos registros es la de los ochenta, con 47 eventos.

En la década de los cincuenta se registro un total de 79 eventos en el mes de septiembre, siendo el mes de mayor actividad. En el mes de julio y de noviembre de la década de los noventa, solo se tienen 2 eventos, siendo los meses de menor actividad.

Para esta zona, se podría tomar en cuenta el mes de mayo dentro del intervalo de la temporada de huracanes, dado que en dos de las décadas se presentaron registros significativos (la de los 50's con 36 y la de los 60's con 9). En relación al mes de noviembre, sigue sin tener gran relevancia en cuanto eventos registrados por década, pero no hay que olvidar que para esta zona, Atlántico 2, se tuvo incidencia en la década de los sesenta y en la de los noventa, aunque en esta última su actividad fue casi nula (2 eventos).

## ATLÁNTICO TRES

1949-1960		Categoría							1961-1970		Categoría							
	DT	TT	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5		DT	TT	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5			
Mayo									Mayo									
Junio								0	Junio	16						16		
Julio								0	Julio	4						4		
Agosto					5	2		7	Agosto							0		
Septiembre	9	1	1	5	1	1	1	19	Septiembre	15	2	4	6	3		30		
Octubre		6						6	Octubre	23	2	3			3	31		
Noviembre								0	Noviembre	3						3		
	9	7	1	5	6	3	1	32		61	4	7	6	3	0	3	84	
1971-1980		Categoría							1981-1990		Categoría							
	DT	TT	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5			DT	TT	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5		
Mayo									Junio									
Junio	8	7						15	Julio	2							0	
Julio								0	Agosto	1	3						4	
Agosto	10	6					2	18	Septiembre					1	1	2	4	
Septiembre	9	12		1		3		25	Octubre								0	
Octubre	3							3	Noviembre	3	5						8	
Noviembre		14						14	Diciembre		3						3	
	30	39	0	1	0	3	2	75		6	11	0	0	1	1	2	21	
1991-2000		Categoría																
	DT	TT	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5			DT	TT	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5		
Mayo	1	2	3	4	5	6	7	0										
Junio	1	3						4										
Julio	3							3										
Agosto		4	1					5										
Septiembre	12	3						15										
Octubre	4	1	2	2	1			10										
Noviembre	5	2						7										
	25	13	3	2	1	0	0	44										

Tabla 2.7 Registros del total de eventos por década en cada mes para la zona Atlántico 3.

Como se puede apreciar en la tabla 2.7, la década de los sesenta fue la que tuvo mayor registro, con 84 eventos registrados, y la década de los ochenta la menor con 21 registros.

Para la zona Atlántico 3, en la década de los sesenta, se tuvo el mayor registro de eventos en el mes de octubre, con 31; en esta zona existen varios meses en diferentes

décadas para los cuales se presentaron 3 eventos, lo cual determinan el menor número de huracanes en la zona.

Para la zona Atlántico 2 se presentó la misma situación que en la zona Atlántico 3. Para el mes de mayo se tienen dos décadas con registros; la de los sesenta y setenta. Con respecto al mes de noviembre debe de considerarse dado que únicamente para la década de los cincuenta no se tuvo registro.

#### 2.4.1.5 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR MES

Sumando el total de eventos por mes en las tres décadas, se encontró que existían registros desde el mes de mayo hasta el mes de diciembre. En la base de datos que se utilizó, se tienen registros de eventos para meses que no se encuentran dentro de la temporada de huracanes, diciembre, por lo que el total de eventos registrados en esta tabla no coincide con el total de eventos registrados en general.

Con el total de la suma de datos de las tres regiones de estudio para el Atlántico, se obtuvo el porcentaje que representa cada mes., Tabla 8.

Mes	eventos	%
Mayo	6	0.488
Junio	140	11.391
Julio	69	5.614
Agosto	225	18.308
Septiembre	497	40.439
Octubre	232	18.877
Noviembre	57	4.638
Diciembre	3	0.244

*Tabla 2.8 Registro del total de eventos en las tres zonas del Atlántico.*

De la tabla anterior se puede deducir que el mes de mayo tiene poca importancia dentro de la temporada de huracanes para la zona del Atlántico. La situación para los meses de noviembre y diciembre es similar. El mes de Septiembre el que presenta mayor incidencia de eventos. Los meses de agosto y octubre tienen casi el mismo porcentaje de incidencia.

## 2.4.2 REGIÓN DEL PACÍFICO

### 2.4.2.1 SELECCIÓN DE AVISOS DE ACUERDO A LA CATEGORÍA

El total de avisos que se tienen contabilizados en la zona del Pacífico, de acuerdo a la base de datos generada, es la que se muestra en la tabla 2.9.

CATEGORÍA	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Depresión Tropical	107	153	787
Tormenta Tropical	126	242	1070
Clase 1	62	85	474
Clase 2	1	36	99
Clase 3	1	18	48
Clase 4	1	16	33
Clase 5	0	4	0
<b>Total</b>	<b>298</b>	<b>554</b>	<b>2511</b>

*Tabla. 2.9 Determinación de Categorías en las distintas zonas del Pacífico.*

La zona del Pacífico tuvo un total de 3363 avisos registrados en las tres áreas que la conforman dentro del período correspondiente a los años de 1949 a 2000.

Mientras que la zona Pacífico 3 representa el 74.7% de la totalidad de eventos, las zonas P2 y P1 únicamente contribuyen con el 16.5% y 8.9% respectivamente. De las trayectorias que han seguido todos los huracanes, se puede preciar que los huracanes que entran a esta región llegan por la zona tres y se disipan hacia la zona dos alcanzando solo en algunas ocasiones la zona uno.

La única zona que tuvo registro de avisos con categoría cinco es Pacífico 2, con cuatro registros. El primer evento de esta intensidad del que se tiene registro se presentó en el año de 1959, el cual no tiene nombre asignado, después sólo se han presentado Max en 1987, Hernán en 1990 y Linda en 1997. Lo que referido a porcentaje de ocurrencia resulto ser del 0.12% del total de 3363 eventos.

La Tormenta Tropical alcanzó un total de 1438 registros en la región del Pacífico, siendo la zona P3 la que alojó la mayor parte de estos, con un 42.76% del total de eventos en esta categoría.

De los eventos que llegan a alcanzar la categoría cuatro en la zona P3, no todos suelen llegar a la zona P2 con la misma intensidad, lo que representa una disminución de registros, cuando llegan a la zona P1 ya no alcanzan esta intensidad.

De hecho la mayoría de los eventos llegan a la zona P1 con categorías poco significativas como son huracán clase uno, Tormenta y Depresión Tropical.

### 2.4.2.2 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE AVISOS REGISTRADOS POR AÑO Y POR INTENSIDAD PARA CADA ÁREA

AÑO	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3
1949	10	42	6
1950	0	18	16
1951	8	39	43
1952	0	36	12
1953	0	34	6
1954	6	44	76
1955	2	29	10
1956	0	13	17
1957	9	33	15
1958	9	50	43
1959	8	54	29
1960	4	42	63
1961	5	14	32
1962	16	39	8
1963	3	23	16
1964	2	15	1
1965	19	30	26
1966	16	18	40
1967	16	40	35
1968	14	39	74
1969	4	55	27
1970	3	81	54
1971	8	67	116
1972	11	22	26
1973	5	24	77
1974	1	32	38
1975	0	16	85
1976	9	23	82
1977	14	26	0
1978	9	42	59
1979	0	32	49
1980	0	13	21
1981	2	66	41
1982	3	12	75
1983	10	49	71
1984	13	74	129
1985	0	27	60
1986	5	39	53
1987	0	21	69
1988	0	31	74
1989	8	64	92
1990	2	48	85
1991	1	31	82
1992	6	43	77
1993	8	56	66
1994	2	28	12
1995	3	45	34
1996	3	66	68
1997	5	11	117
1998	14	82	59
1999	2	54	9
2000	0	22	36
	298	1954	2511

Tabla 2.10. Total de avisos registrados por año en las tres zonas del Pacífico.

Observando los resultados en la tabla 2.10 para la zona del Pacífico, se aprecia que la zona Pacífico 3, resultó con mayor número de eventos registrados de las tres, lo cual representa un 53% del total de eventos; seguida de la zona Pacífico 2 que registro 41 % de ocurrencia mientras que la zona Pacífico 1 con solo el 6% de ocurrencia.

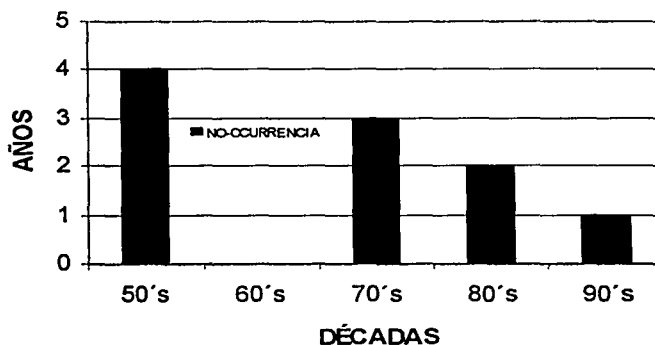
Según los registros, el año de 1984 fue el de mayor actividad con 129 eventos registrados en la zona 3, lo que lo coloca como el año en que más registros se tuvieron dentro de la zona del Pacífico. Caso contrario, la zona 1, con 19 eventos registrados como número máximo de eventos, lo cual representa un 15% de lo obtenido para la zona P3.

El número mínimo de registros por zona es de la siguiente manera, despreciando los años en que no se tiene ocurrencia: la zona P1 y la P3 tuvieron uno, como número mínimo de registro y la zona 2 con 11 registros en su menor valor de ocurrencia.



El número mínimo de registros por zona es de la siguiente manera, despreciando los años en que no se tiene ocurrencia: la zona P1 y la P3 tuvieron uno, como número mínimo de registro y la zona 2 con 11 registros en su menor valor de ocurrencia.

Con respecto a la no-ocurrencia de eventos en la zona pacífico 1, y recordando que el estudio se dividió en décadas, se observa que la tendencia a la no-ocurrencia de eventos disminuye prácticamente de forma lineal, por lo que se puede suponer que para la siguiente década no se tendrá registro alguno de no-ocurrencia. Lo que llevaría a tener al menos un registro de evento por año para la siguiente década.



*Fig. 2.11. No-ocurrencia de eventos para la zona Pacífico 1.*

En tanto que la segunda zona de estudio, P2, no presenta el fenómeno de la no-ocurrencia, mientras en la zona Pacífico 3, únicamente para el año de 1977 se registro el fenómeno de la no-ocurrencia.

Analizando los resultados de las tres áreas, parece que el fenómeno de la no-ocurrencia tiende a desaparecer, ya que en la zona P1 la tendencia es a tener cero eventos registrados de no-ocurrencia, al menos para la siguiente década. Con respecto a la zona 2 no hubo registro, en tanto que la zona 3 únicamente presenta un registro, lo cual no es representativo.

Con base en la tendencia marcada, se puede esperar que en la zona del Pacífico cada vez se incrementará el índice de ocurrencia de eventos, lo que deberá estar ligado a medidas de prevención y otros aspectos importantes.

## 2.4.2.3 EVALUACIÓN DEL NUMERO DE HORAS DE AFECTACIÓN POR CATEGORÍA

La tabla 2.11 muestra los resultados del total de horas que se registraron por categoría en cada zona del Pacífico.

Pacífico 1		Pacífico 2		Pacífico 3	
Categoría	Horas	Categoría	Horas	Categoría	Horas
DT	642	DT	2341	DT	4701
TT	756	TT	5127	TT	6396
C-1	372	C-1	2871	C-1	2817
C-2	6	C-2	630	C-2	543
C-3	6	C-3	312	C-3	288
C-4	6	C-4	198	C-4	198
C-5	0	C-5	54	C-5	0
<b>Total</b>	<b>1788</b>	<b>Total</b>	<b>11533</b>	<b>Total</b>	<b>14943</b>

*Tabla 2.11. Duración en horas por categoría en las tres zonas del Pacífico.*

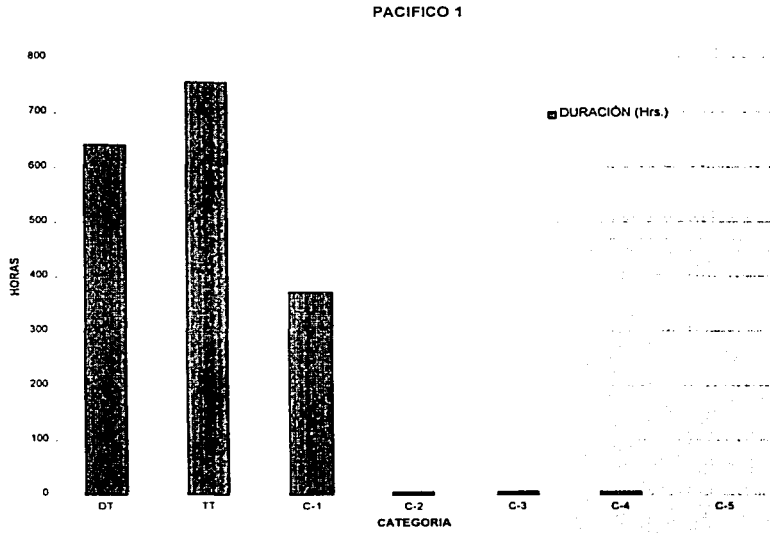
El total de horas de ocurrencia fue de 28,264, equivalentes a 3.22 años de afectación en 51 años.

La zona Pacífico 3, registró 14,943 horas, Pacífico 2, 11,533 y Pacífico 1 únicamente 1,788 eventos. Al igual que para la región del Atlántico la "Tormenta Tropical" fue la categoría que tuvo mayor número de presentaciones, seguida de la "Depresión Tropical" y de la Clase 1 respectivamente.

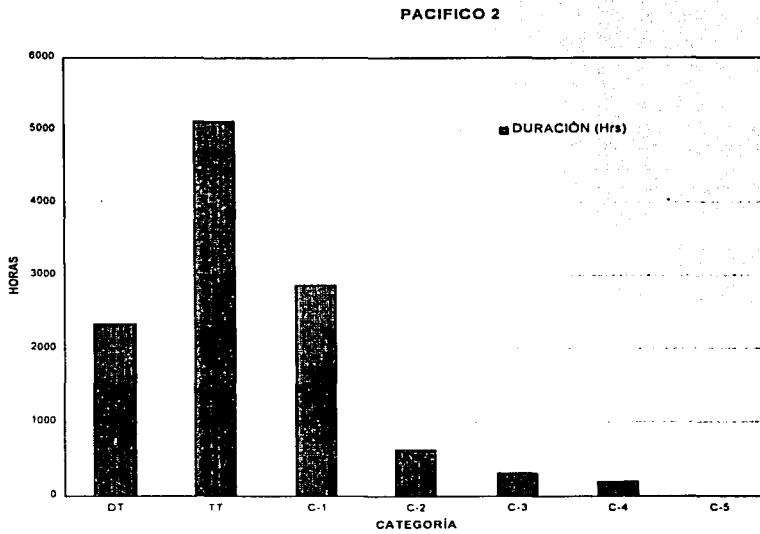
Un aspecto importante es que para la zona del Pacífico se tienen únicamente 54 horas de registro en la categoría 5, lo que sería equivalente a 2 días y seis horas.

La comparación entre las horas que registró la zona P3 con respecto a la zona P1, para la categoría de Depresión Tropical, resulta que la zona P1 representa el 13.66% de la zona P3 mientras que para la categoría cuatro, es solo el 3%.

A continuación se muestran las gráficas correspondientes a cada zona



*Fig. 2.12. Tiempo en horas Vs. Categoría para Pacifico 1.*



*Fig. 2.13. Tiempo en horas Vs. Categoría para Pacifico 2.*

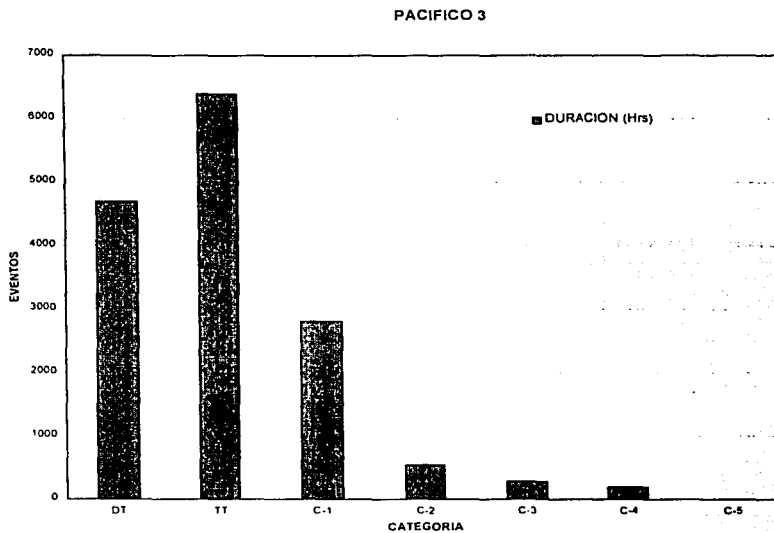


Fig. 2.14. Tiempo en horas Vs, categoría para pacifico 3.

### 2.4.2.4 REGISTRO DE LA CANTIDAD DE EVENTOS OBTENIDOS POR DÉCADA E INTENSIDAD

En la región del Pacífico, se tienen los siguientes resultados para el estudio realizado por década en las zonas.

1949-1960									1961-1970									
Categoría									Categoría									
DT	TT	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5			DT	TT	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5			
Mayo		3							3	Mayo								0
Junio		1	2						3	Junio		1						1
Julio	2	6	4						12	Julio		2						2
Agosto		14	7						21	Agosto	8	2						10
Septiembre	1	2	14						17	Septiembre	31	35	7					73
Octubre									0	Octubre	3	4	6					13
Noviembre									0	Noviembre								0
	3	26	27	0	0	0	0	56		42	43	14	0	0	0	0	99	
1971-1980									1981-1990									
Categoría									Categoría									
DT	TT	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5			DT	TT	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5			
Mayo								0	Mayo									0
Junio								0	Junio									0
Julio								0	Julio									0
Agosto	5	6	1					12	Agosto	3	3							6
Septiembre	19	7	1					27	Septiembre	13	5	8	1					27
Octubre	5	9	1		1	1		17	Octubre	3	6	1						10
Noviembre								0	Noviembre									0
	29	22	3	0	1	1	0	56		19	14	9	1	0	0	0	43	
1990-2000																		
Categoría																		
DT	TT	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5												
Mayo								0										
Junio								0										
Julio								0										
Agosto	10	13	2					25										
Septiembre	4	8	7					19										
Octubre								0										
Noviembre								0										
	14	21	9	0	0	0	0	44										

Tabla 2.12 Registros del total de eventos por década en cada mes para la zona Pacífico 1.

En lo que concierne a la zona 1 del Pacífico, es la década de los sesenta la que presentó mayor número de eventos con 99, mientras que la década de los ochenta con 43 eventos es la de menor número de registros.

En general, el mes de septiembre es el que presenta mayor cantidad de eventos registrados, con un total de 163, siendo 73 el número máximo de eventos registrados en la década de los sesenta y en los años cincuenta sólo se tienen 21 registros.

Aunque para este conteo se tomaron en cuenta meses como mayo y noviembre, al hacer el recuento se puede apreciar que no deben considerarse dentro del período de huracanes, al menos en lo que respecta a esta zona Pacífico 1, ya que para Mayo únicamente se tiene registro en una década, la de los cincuenta, la cual tiene tres eventos registrados, mientras que para el mes de noviembre no se tiene ningún evento.

## PACIFICO DOS

1949-1960		Categoría							1961-1970		Categoría								
	DT	TT	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5			DT	TT	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5			
Mayo		4						4	Mayo										0
Junio	5	40	25					70	Junio	7	13	20							40
Julio		24	31					55	Julio	9	38	1							48
Agosto		19	9					28	Agosto	11	29	9							49
Septiembre		115	69					184	Septiembre	29	107	11							147
Octubre	7	29	42			7	1	86	Octubre	6	14	29							49
Noviembre		7						7	Noviembre	8	11	2							21
	12	238	176	0	0	7	1	434		70	212	72	0	0	0	0			354
1971-1980		Categoría							1981-1990		Categoría								
	DT	TT	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5			1	2	3	4	5	6	7			
Mayo	9	8	1					18	Mayo		5								5
Junio	28	7	2					37	Junio	14	11	5							30
Julio	4	17	5	1				27	Julio	41	38	21	12	5					117
Agosto	5	19	17	3				44	Agosto	51	47	10	2	3					113
Septiembre	24	34	16	16	4	8		102	Septiembre	8	28	23	16	9	8				92
Octubre	19	22	19	4	3	1		68	Octubre	10	20	20	13	11	1				75
Noviembre								0	Noviembre										0
	89	107	60	24	7	9	0	296		124	149	79	43	28	9	0			432
1991-2000		Categoría																	
	1	2	3	4	5	6	7												
Mayo								0											
Junio	17	14	12	7	2			52											
Julio	7	13		4				24											
Agosto	14	46	16	7	4	4		91											
Septiembre	31	62	41	13	10	4		161											
Octubre	26	38	29	7	1			101											
Noviembre	3							3											
	98	173	98	38	17	8	0	432											

Tabla 2.13 Registros del total de eventos por década en cada mes para la zona Pacifico 2.

En la tabla 2.13, la zona Pacifico 2 es la tiene mas eventos registrados de entre las áreas que conforman el Pacifico.

La década de los cincuenta es la que tuvo más registros de eventos. con un total de 434, siendo la década de los setenta resultado ser la que menos eventos alojó con 296 datos.

Al igual que en el caso anterior, septiembre cuenta con más registros que cualquier otro mes de los que conforman la temporada de huracanes en esta zona. Para la década de los cincuenta se tiene el máximo número de eventos registrados, 184 eventos, en los años ochenta se presentó el mínimo registro de datos, 92 eventos.

Para los meses de agosto y octubre, se tiene que el total de eventos registrados en esta zona es de alrededor de la mitad del total de los eventos que se tuvieron en el mes de septiembre.

Con respecto al mes de mayo se podría decir que la situación es muy similar a la que se tiene en la zona uno, porque aun cuando se tienen más registros que en el caso anterior estos únicamente representan el 1.39%, al igual que el mes de noviembre con 1.59%.



## PACIFICO TRES

1949-1960		Categoría							
DT	TT	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5			
Mayo		2					2		
Junio		71	47				118		
Julio		22	17				39		
Agosto		11	17				28		
Septiembre	1	11	63				75		
Octubre		10	41		4	1	56		
Noviembre		6					6		
	1	133	185	0	4	1	0	324	

1961-1970		Categoría							
DT	TT	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5			
Mayo		2					2		
Junio		13	23	17			53		
Julio		20	49		4		73		
Agosto		26	17				43		
Septiembre		38	37				75		
Octubre		15	29	7			51		
Noviembre		5	2	9			16		
	117	159	33	4	0	0	0	313	

1971-1980		Categoría							
DT	TT	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5			
Mayo		1	13	8	1		23		
Junio		49	56	22	6	1	4	138	
Julio		39	32	8	1	8	1	89	
Agosto		39	42	13				94	
Septiembre		41	45	24	1	1		112	
Octubre		20	27	9	7	5	5	73	
Noviembre		15	9					24	
	204	224	84	16	15	10	0	553	

1981-1990		Categoría								
DT	TT	1	2	3	4	5	6	7		
Mayo		17	40	4					61	
Junio		69	57	13	2				141	
Julio		58	57	12	7	1			135	
Agosto		46	65	18	3				132	
Septiembre		75	51	19	7	3	7		162	
Octubre		33	42	24	3	2			104	
Noviembre			2						2	
Diciembre		2	6	4					12	
	300	320	94	22	6	7	0	749		

1991-2000		Categoría								
DT	TT	1	2	3	4	5	6	7		
Mayo		5	5						10	
Junio		46	82	15	9	4	5		161	
Julio		19	26	12	7	2			66	
Agosto		28	33	12					73	
Septiembre		35	42	12	12	5	7		113	
Octubre		31	31	23	28	12	3		128	
Noviembre		1	3	4	1				9	
	165	222	78	57	23	15	0	560		

Tabla 2.14 Registros del total de eventos por década en cada mes para la zona Pacifico 3.

De la tabla 2.14, se observa que la zona Pacifico 3 se tiene 749 registros como máximo en la década de los ochenta y en la década de los sesenta el mínimo número con 313 eventos.

Como en las dos zonas anteriores el mes de septiembre es que obtuvo mayor número de datos (537), siendo en la década de los ochenta cuando se presentó el máximo número de datos, 162.

El mes de noviembre fue el que presentó menor número de eventos (2.28%), lo cual indica que existe poca incidencia. El mes de diciembre no se considera en el estudio ya que regularmente existe ocurrencia de ciclones (0.48%).

#### 2.4.2.5 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR MES

Una vez generadas las tablas para cada zona, se puede apreciar que existe registro de datos que van del mes de mayo a diciembre. La máxima actividad de huracanes comprende a los meses de junio a octubre, tabla 2.15.

Mes	eventos	%
Mayo	128	2.6975764
Junio	844	17.787144
Julio	687	14.478398
Agosto	769	16.206533
Septiembre	1386	29.209694
Octubre	831	17.513172
Noviembre	88	1.8545838
Diciembre	12	0.2528978

*Tabla 2.15. Registro del total de eventos en las tres zonas del Pacífico.*

## 2.5 RESUMEN

### 2.5.1 REGIÓN DEL ATLÁNTICO

Se observa que la zona que registró más número de eventos fue la zona Atlántico 2, tanto del total como por década. De hecho también esta zona fue la que presentó el año con el máximo de registros, con un total de 58 eventos, en el año de 1995, y por ende fue la zona que tuvo más horas de afectación.

Por otro lado, el fenómeno de la no-ocurrencia tiende a disminuir en los registros que se tienen, quizás debido a que actualmente se les da mayor seguimiento a este tipo de fenómenos. Por otro lado, el mes en el que se tiene mayor número de registros de eventos es el mes de septiembre.

### 2.5.2 REGIÓN DEL PACÍFICO

Para la región del Pacífico, la zona que presentó mayor incidencia de eventos fue la 3, mientras que la zona 1 obtuvo un número muy inferior de registros en comparación con la 3. La zona Pacífico 3 registró el número máximo de eventos por año, con un total de 129 eventos en el año de 1984. La zona que más horas de registro tuvo también fue la zona 3.

En la región del Pacífico predominan los eventos denominados Tormenta y Depresión tropical.

En la zona 2 fue en la única que se tuvo registro de un huracán clase 5.

Para Pacífico 1 no se presentó el fenómeno de la no-ocurrencia de eventos, mientras que para la zona Pacífico 3 únicamente se tuvo un registro. La zona Pacífico 2 si presentó el fenómeno de la no-ocurrencia, caso curioso es que el fenómeno decrece por década en forma lineal, al menos para las últimas tres décadas de estudio.

## **CAPÍTULO 3. Modelos Numéricos.**

### 3 MODELOS NUMÉRICOS.

#### 3.1 ANTECEDENTES

En este capítulo se presentan los modelos numéricos que describen el comportamiento físico de los huracanes que se aproximan a las costas mexicanas. Se muestran una serie de ecuaciones que modifican y relacionan el comportamiento de los diversos parámetros propios del fenómeno del huracán, como son la presión central, la velocidad del viento, el radio de máximos vientos ciclónicos, así como la localización geográfica del evento.

Como se sabe, y a pesar de lo trascendente que es para México, no se cuenta con un sistema de mediciones que permitan caracterizar las condiciones oceano meteorológicas generadas por ciclones tropicales, lo que hace necesario el adaptar o desarrollar modelos de tipo numérico que sean capaces, con cierto grado de certidumbre, poder representar este tipo de fenómenos y de esta forma poder contar con los elementos suficientes para sistemas de alertamiento temprano o caracterización del riesgo en alguna zona de interés.

#### 3.2 MODELOS

En este trabajo se utilizarán modelos de tipo paramétrico, dado que con ellos es posible evaluar los campos de presión, viento y oleaje significativo con su periodo asociado en aguas profundas en función de muy pocos parámetros, como: el radio ciclostrofico, localización geográfica del ojo del huracán y presión central mínima. Esta información normalmente viene reportada en boletines climatológicos publicados por diferentes organizaciones.

##### 3.2.1 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DE PRESIÓN

La principal característica de los modelos de presión es que generan círculos concéntricos de igual valor de presión o isobaras, es decir el campo de presiones es el mismo en todas las direcciones del cuadrante medido desde el centro. La pendiente del perfil de presiones depende del radio ciclostrofico, presión mínima, 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), mostrado en la ecuación (1), y el Hydromet, mostrado en la ecuación (2), presentado originalmente por Bretchneider (1990).

Fórmulas matemáticas de los perfiles de presiones:

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

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

donde

- $P_o$  presión en el centro del huracán en *mb*.  
 $P_r$  presión a una distancia radial *r*, en *mb*  
 $P_\infty$  presión a una distancia infinita (primera isobara cerrada), en *mb*  
 $R_c$  radio de máximos vientos ciclostróficos, en *km*  
*r* distancia del centro de huracán a un punto dado *km*

Con respecto a los parámetros *A*, *B*, *a* y *b*, de las expresiones matemáticas (1) y (2) se deben de satisfacer las expresiones siguientes:

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

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

En la primera ecuación, presentada por Holland, si se cumple la condición de que  $A = B^{-1} = 1$  se llega al modelo Bret-X.

Para  $a = b^{-1} = 2$  el modelo se transforma en el modelo Fujita.

Para poder determinar que modelo se asemeja mejor al fenómeno meteorológico, se utiliza un número adimensional denominado número de Rankin-Vortex, el cual se muestra en la ecuación (3).

$$N_c = \frac{fR_c}{V_{cr}} = \frac{0.5822R_c(\text{sen}\phi)}{K\Delta P_o^{1/2}} \quad (3)$$

donde

- f* coeficiente de Coriolis  
 $\phi$  latitud en grados  
 $\Delta P_o$  gradiente de presiones ( $P_\infty - P_o$ ), en *mb*  
*K* constante que depende de la densidad del aire y varía entre 11.3 a 11.7.  
 $V_{cr}$  velocidad ciclostrófica, en *km/h*

De acuerdo al número de Rankin - Vortex obtenido, se sugieren una serie de valores para los parámetros *A*, *B*, *a* y *b* aplicados en los modelos, la cual se muestra en la tabla 3.1.

$0.00 < N_{CR} < 0.05$	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 3.1 Valores de las constantes del número de Rankin-Vortex

Se utilizan cuatro modelos de presión, los cuales se enlistan a continuación, recordando que estos modelos se basan en la relaciones entre el radio ciclostrófico, la distancia radial medida desde el centro del huracán hasta un punto dado y el gradiente de presiones.

Modelo Hydromet HM 
$$P_r = P_o + (P_x - P_o)e^{-Rc/r} \quad (4)$$

Modelo NOAA I 
$$P_r = P_o + (P_x - P_o)\left(\frac{2}{\pi}\right)\tan^{-1}\left(\frac{r}{R_c}\right) \quad (5)$$

Modelo Fujita J 
$$P_r = P_o + \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 2(r/R_c)^2}}\right)(P_x - P_o) \quad (6)$$

Modelo Bret X 
$$P_r = P_o + \left(\frac{(r/R_c)^2}{1 + (r/R_c)^2}\right)(P_x - P_o) \quad (7)$$

### 3.2.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE VIENTO

El campo de viento debido a la presencia de un huracán presenta en la mayoría de los casos una asimetría con respecto al eje imaginario que cruza el centro del huracán. Esta asimetría es causada por una serie de procesos como son el movimiento del fenómeno, su localización y la estructura de los cuerpos nubosos que se encuentran alrededor de este, el cual incluye las bandas de nubes en espiral y la influencia externa de los sistemas meteorológicos colindantes.

Para incluir los efectos de movimiento del fenómeno en la modelación, se debe añadir el vector de traslación para todo el campo de viento. Por otro lado, se sabe que al interactuar un huracán en movimiento con la superficie en donde este se mueve se genera un cambio en la asimetría del huracán, siendo esta la razón por la cual los vientos máximos no se localizan directamente en la dirección principal de movimiento del huracán.

El procedimiento para poder estimar el valor del viento local, en cualquier punto de análisis alrededor del centro del huracán, comienza con el cálculo y obtención de la máxima velocidad del viento ciclostrófico a partir de la ecuación (8), a la que se le debe proporcionar información como el máximo gradiente de presiones obtenido con los modelos presentados en la sección anterior.

$$U_{Rr} = K\sqrt{\Delta P} \quad (8)$$

Una vez que se tiene la máxima velocidad del viento ciclostrófico, se puede calcular la velocidad de viento producida por el máximo gradiente en función del radio ciclostrófico y del coeficiente de Coriolis.

$$U_{Rg} = U_{Rc} - 0.5fR_c \quad (9)$$

Para poder evaluar la velocidad del viento en cualquier punto existen dos posibles alternativas: el uso del nomograma presentado en la figura 3.1 (Bretschneider, 1990) y el uso de la relación mostrada en la ecuación (10).

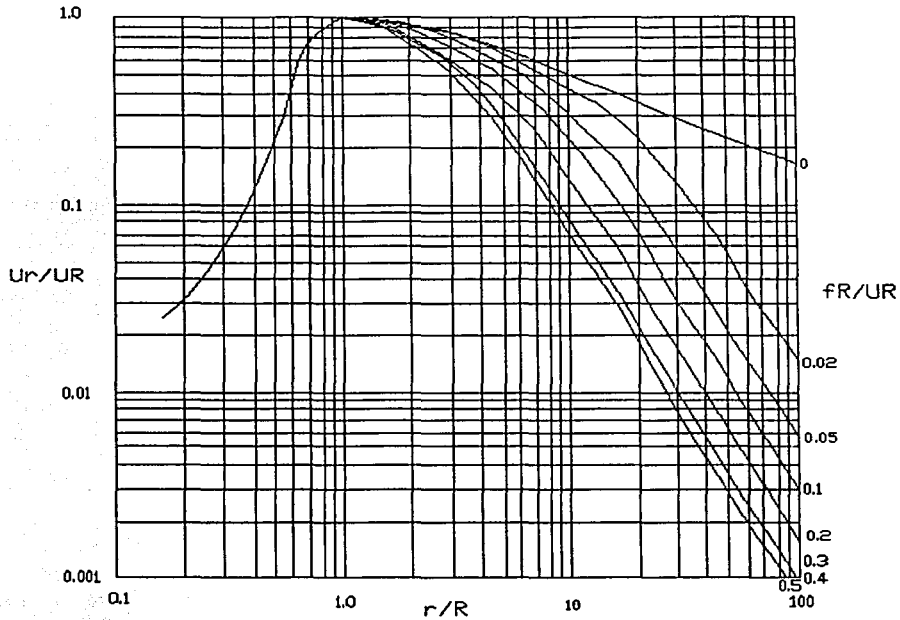


Figura 3.1. Relación de los factores para el cálculo del viento ciclónico.

$$U_p = F_v U_{Rg} \quad (10)$$

para el cual  $F_v$  representa el factor de amortiguamiento, el cual se obtiene con la expresión siguiente:

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

en donde  $N$  es el parámetro que relaciona el coeficiente de Coriolis,  $f$ , con el radio ciclostrófico y el gradiente de velocidades de viento máximas, definido como:

$$N = \frac{fR_c}{U_{Rg}} \quad (12)$$

Para la ecuación (11), los parámetros  $B_i$  y  $Y_i$  representan la forma del perfil del viento en función del radio ciclostrófico, y sus valores se muestran en las Tablas 3.2 y 3.3.



	$B_1$	$B_2$
$N > 0.5$	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 3.2 Valores de las constantes  $B_1$  y  $B_2$

$B_i$ ( $i=1$ o $2$ )	$S=r/Rc$	$Y_i$ ( $i=1$ o $2$ )
0.5	$S < 10$	$1.406 - 0.467S + 0.0679S^2 - 0.00489S^3 + 0.00016S^4 - 1.891 \times 10^{-6}S^5$
	$S \geq 10$	$e^{-1.902 \ln(S)+1.703}$
0.4	$S < 9$	$1.440 - 0.551S + 0.128S^2 - 0.0179S^3 + .00042S^4 + .00025S^5 - .000031S^6 + .0000011S^7$
	$S \geq 9$	$e^{-1.92 \ln(S)+1.915}$
0.3	$S < 10$	$1.303 - 0.327S + 0.0319S^2 - 0.0011S^3$
	$S \geq 10$	$e^{-1.949 \ln(S)+2.265}$
0.2	$S < 10$	$1.24 - 0.253S + 0.016S^2 + 0.00032S^3 - 0.000049S^4$
	$S \geq 10$	$e^{-1.952 \ln(S)+2.568}$
0.1	$S > 8$	$0.479 + 1.267S - 1.074S^2 + 0.4S^3 - 0.081S^4 + 0.0093S^5 - 0.00056S^6 + 0.000014S^7$
	$8 \leq S < 12$	$0.980 - 0.125S + 0.005S^2$
	$S \geq 12$	$e^{-1.912 \ln(S)+3.030}$
0.05	$S < 10$	$1.14957 - 0.1427S + 0.00604S^2$
	$10 \leq S < 40$	$0.64 - 0.04S + 6.9 \times 10^{-4}S^2 + 9.5 \times 10^{-6}S^3 - 5.4 \times 10^{-7}S^4 + 8.3 \times 10^{-9}S^5 - 5.7 \times 10^{-11}S^6 + 1.5 \times 10^{-13}S^7$
	$S \geq 40$	$e^{-1.806 \ln(S)+3.239}$
0.2	$S < 10$	$1.108 - 0.119S + 0.0052S^2$
	$10 \leq S < 60$	$0.783 - 0.0464S + 0.0013S^2 - 1.819 \times 10^{-5}S^3 + 1.341 \times 10^{-7}S^4 - 3.949 \times 10^{-10}S^5$
	$S \geq 60$	$e^{-1.534 \ln(S)+2.990}$
0	$S < 10$	$1.086 - 0.1007S + 0.00428S^2$
	$S \geq 10$	$e^{-0.470 \ln(S)+0.405}$

Tabla 3.3 Valores de las constantes  $Y_1$  y  $Y_2$  para el modelo de viento

Para poder incorporar el efecto del desplazamiento del huracán a la asimetría del campo de viento, se debe realizar la corrección siguiente:

$$W = 1.613225(U_p + 0.5V_p \cdot \cos(\beta)) \quad (13)$$

donde

- $V_F$  velocidad de desplazamiento del huracán, en  $km/h$ .  
 $\beta$  ángulo total entre  $V_F$  y  $U_p$  en grados.  
 $U_p$  velocidad del viento en  $km/h$

### 3.2.3 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE OLAJE

Los diversos factores naturales y meteorológicos que afectan la superficie del mar son: 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.

Al verse expuesta la superficie del océano a cambios meteorológicos extremos, ésta puede cambiar. Un cambio notorio en la superficie del océano se puede apreciar cuando se presenta un huracán, los cuales producen vientos extraordinarios alrededor de su centro y generan esfuerzos cortantes.

El viento generado por un huracán es particularmente el factor más importante en la formación del oleaje extraordinario. La relación más adecuada para determinar la magnitud del oleaje bajo la influencia de un huracán se muestra en la ecuación (14).

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

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

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

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

Una vez que se tiene la altura significativa para un huracán estacionario, se evalúan los parámetros de altura de ola puntual y velocidad de viento puntual, los cuales se muestran en las ecuaciones (17) y (18), respectivamente.

$$Hp = H_{RST-A} (factH) \quad (17)$$

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

Donde  $U_{Rg}$  es el la máxima velocidad del viento ciclotrónico, obtenido en la ecuación (9), y los factores de agrupamiento horizontales y verticales  $factH$  y  $factV$ , que dependen de los parámetros  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $Y_1$  y  $Y_2$  se definen como sigue.

$$factH = Y_1 + (N - A_1) \frac{(Y_2 - Y_1)}{A_2 - A_1} \quad (19)$$

$$factV = Y_1 + (N - B_1) \frac{(Y_2 - Y_1)}{B_2 - B_1} \quad (20)$$

Cabe mencionar que el factor  $N$  es el mismo que se tiene en la ecuación (11) y el  $factH$  y  $factV$  se pueden obtener con las ecuaciones (19) y (20), respectivamente, o bien con los nomogramas mostrados en las figuras 3.2 y 3.4, respectivamente.

La tabla 3.4 muestra los valores de las constantes  $A_1$  y  $A_2$  relacionadas con el parámetro  $N$ , mientras que en la tabla 3.5 se presenta el criterio para seleccionar los parámetros  $Y_i$  de la ecuación (20). La figura 3.2.1 muestra el nomograma de cálculo original presentado por Bretschneider (1990).

	$A_1$	$A_2$
$N > 0.02$	0.00	0.02
$0.04 > N > 0.02$	0.02	0.04
$0.06 > N > 0.04$	0.04	0.06
$0.10 > N > 0.06$	0.06	0.10
$0.16 > N > 0.10$	0.10	0.16
$0.20 > N > 0.16$	0.16	0.20
$0.30 > N > 0.20$	0.20	0.30
$N > 0.30$	0.30	0.50

**Tabla 3.4.** Valores de las constantes  $A_1$  y  $A_2$ .

$A_i$ ( $i=1$ o $2$ )	$S=r/Rc$	$Y_i$ ( $i=1$ o $2$ )
0	$S < 4$	$0.752 + 0.369S - 0.140S^2 + 0.0148S^3$
	$4 < S < 10$	$0.438 + 0.580S - 0.217S^2 + 0.0356S^3 - 0.00281S^4 + 0.000085S^5$
	$S > 10$	$0.66e^{(10-S)/20}$
0.02	$S < 4$	$0.781 + 0.338S - 0.134S^2 + 0.0141S^3$
	$4 < S < 10$	$0.389 + 0.607S - 0.228S^2 + 0.037S^3 - 0.0029S^4 + 0.00009S^5$
	$S > 10$	$0.53e^{(10-S)/10}$
0.04	$S < 4$	$0.857 + 0.231S - 0.0957S^2 + 0.0092S^3$
	$4 < S < 10$	$3.653 + 1.909S - 0.521S^2 + 0.072S^3 - 0.0049S^4 + 0.00013S^5$
	$S > 10$	$0.39e^{(10-S)/10}$
0.06	$S < 4$	$0.840 + 0.266S - 0.118S^2 + 0.011S^3$
	$4 < S < 10$	$-0.856 + 1.582S - 0.539S^2 + 0.083S^3 - 0.00632S^4 + 0.00018S^5$
	$S > 10$	$0.335e^{(9-S)/5}$
0.1	$S < 1$	1.0
	$1 < S < 4$	$0.914 + 0.183S - 0.107S^2 + 0.0115S^3$
	$4 < S < 10$	$3.472 - 1.828S + 0.495S^2 - 0.071S^3 + 0.0052S^4 - 0.00014S^5$
	$S > 10$	$0.15e^{(10-S)/5}$
0.16	$S < 1$	1.0
	$1 < S < 4$	$1.0102 + 0.0508S - 0.0644S^2 + 0.0059S^3$
	$4 < S < 10$	$3.465 - 1.722S + 0.409S^2 - 0.0521S^3 + 0.0033S^4 - 0.000085S^5$
	$S > 10$	$0.08e^{(10-S)/7}$
0.2	$S < 1$	0.93
	$1 < S < 4$	$0.938 + 0.189S - 0.146S^2 + 0.017S^3$
	$4 < S < 10$	$1.735 - 0.564S + 0.104S^2 - 0.0145S^3 + 0.00102S^4 - 0.0000415S^5$
	$S > 10$	$0.077e^{(9-S)/5}$
0.3	$S < 1$	0.97
	$1 < S < 4$	$1.053 + 0.0342S - 0.0991S^2 + 0.017S^3$
	$4 < S < 10$	$4.581 - 2.78S + 0.693S^2 - 0.0901S^3 + 0.0058S^4 - 0.00015S^5$
	$10 < S < 15$	0.02
0.5	$S < 1$	0.6
	$1 < S < 5$	$0.484 + 1.475S - 1.34S^2 + 0.453S^3 + 0.0692S^4 - 0.00402S^5$
	$5 < S < 10$	$3.881 - 2.35S + 0.594S^2 - 0.0762S^3 + 0.0048S^4 - 0.000124S^5$
	$10 < S < 15$	0.01

Tabla 3.5 Valores de las constantes  $Y_1$  y  $Y_2$  para el modelo de oleaje.

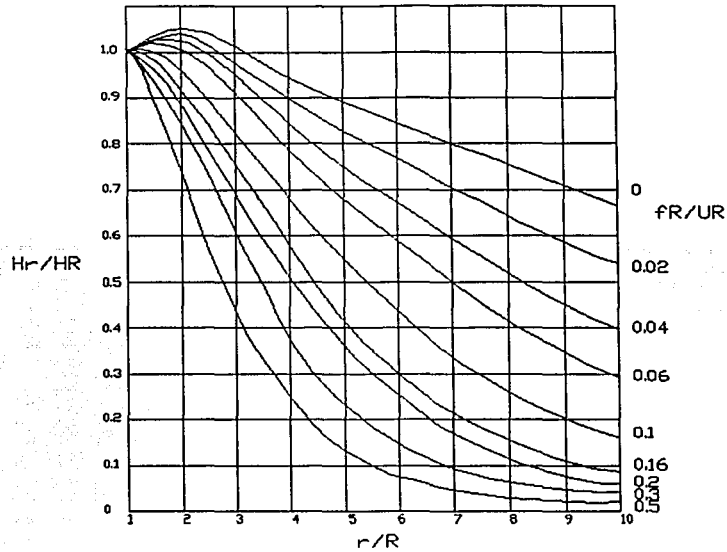


Figura 3.2. Relación de los factores para el cálculo del oleaje.

Sánchez et al. (1998), corroboran con datos experimentales que la corrección propuesta por Bretschneider (1990) es válida para caracterizar la influencia de un huracán en desplazamiento en el golfo de México:

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

donde

- $HH$  altura de ola en  $m$ .
- $V_F$  velocidad de desplazamiento del huracán, en  $km/h$ .
- $\beta$  ángulo total entre  $V_F$  y  $U_p$  en grados.
- $U_p$  velocidad del viento en  $km/h$

## **CAPÍTULO 4. Calibración de los modelos para el Atlántico**

## 4 CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS PARA EL ATLÁNTICO.

### 4.1 SELECCIÓN DE LAS BOYAS OCEANOGRÁFICAS

Las boyas oceanográficas tienen como misión la captura y 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 las boyas del *National Data Buoy Center NDBC*. La selección de las boyas se realizó tomando en cuenta la ubicación geográfica de éstas, tratando en todo los casos de considerar las más cercanas a los litorales de la República mexicana.

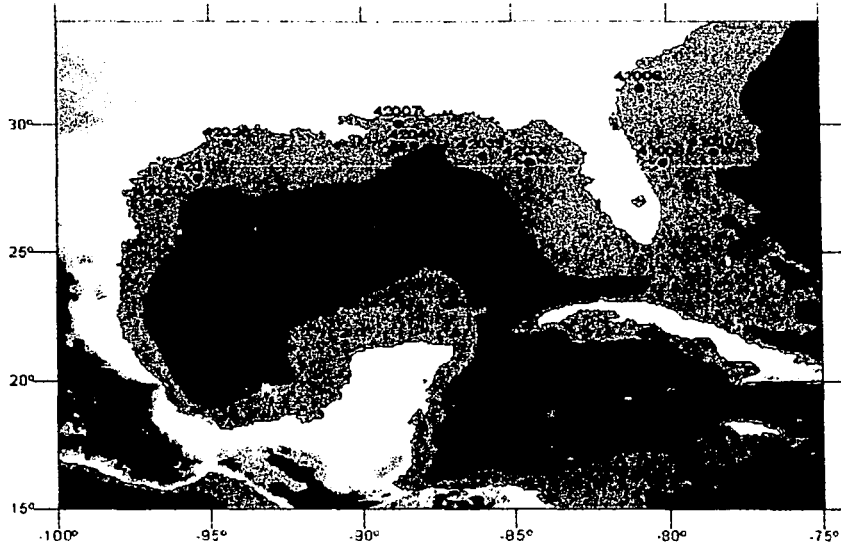
El tipo de boyas consultadas miden y transmiten la presión barométrica, la dirección del viento, la velocidad del viento, la temperatura del mar y la energía espectral del oleaje (de la cual se derivan la altura de ola significativa), el periodo dominante del oleaje, el periodo promedio del oleaje y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

Para cada boya, se determinó un radio de influencia que abarcaría 2°. Una vez que se tuvo este radio, utilizando el programa "Filtro", se seleccionaron los huracanes que pasaron dentro de la zona de influencia de cada boya, con lo cual se determinó qué huracán pasó cerca de cada una de las boyas.

Para la región del Atlántico se tomaron las boyas ubicadas en la parte sur de la Florida y Noreste del Golfo de México, a continuación se muestran en la Tabla 4.1 y Figura 4.1, el número de identificación y ubicación de cada una de las boyas.

BOYA	LATITUD	LONGITUD
B41009	28.50	-80.18
B41010	28.89	-78.52
B42001	25.92	-89.68
B42002	25.90	-93.59
B42003	25.88	-89.95
B42007	30.09	-88.77
B42019	27.92	-95.36
B42020	26.95	-96.70
B42035	29.25	-94.41
B42036	28.51	-84.51
B42039	28.80	-86.06
B42040	29.21	-88.20
B42041	27.22	-90.42
B42054	26.00	-87.73

**Tabla 4.1** Localización de las Boyas Oceanográficas en la región del Atlántico.



**Figura 4.1** Localización de las boyas utilizadas para la calibración en el Atlántico.

En la tabla 4.2, se muestra el total de eventos que afectaron cada una de las posiciones donde actualmente se ubican las boyas, de acuerdo a su localización, de donde se puede observar que en la región del Atlántico son 743 los eventos registrados en el periodo de 1949 al 2000. Aquí resulta conveniente mencionar que no todos los eventos fueron registrados por las boyas, entre otras razones, porque en dicho periodo parcialmente las boyas no estaban en operación.

BOYA	Número de Huracanes
B41009	61
B41010	64
B42001	58
B42002	114
B42003	58
B42007	39
B42019	34
B42020	30
B42035	36
B42036	47
B42039	42
B42040	42
B42041	58
B42054	60

**Tabla 4.2.** Número de Huracanes que afectaron cada una de las boyas localizadas en el Atlántico.



## 4.2 DETERMINACIÓN DEL RADIO CICLOSTRÓFICO.

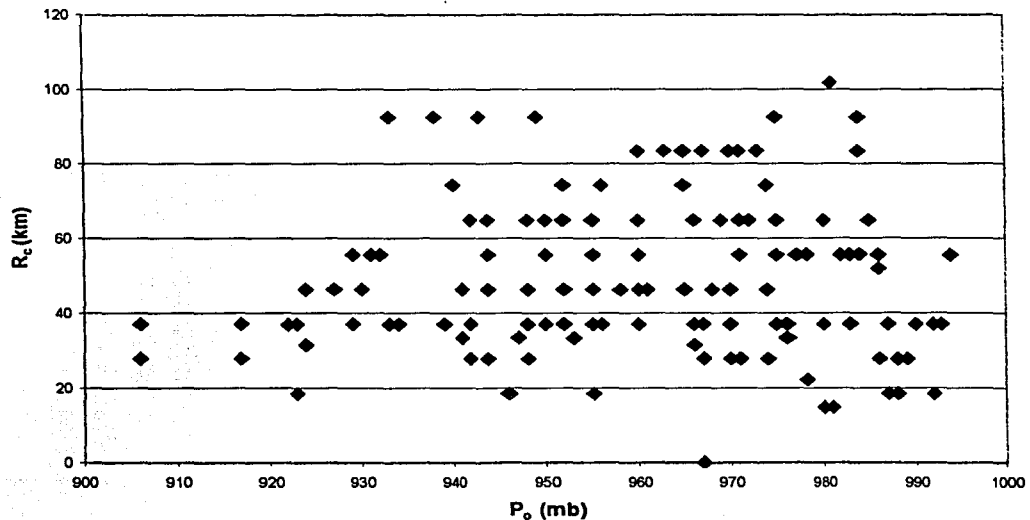
Los modelos de presión, viento y oleaje, descritos en el capítulo anterior, dependen principalmente de varios parámetros físicos, de los cuales todos son reportados normalmente en los boletines meteorológicos a excepción del radio ciclostrófico.

Hasta ahora, no se ha podido determinar una relación adecuada entre el radio ciclostrófico y la presión en el centro del huracán. Recientemente se han realizado estudios para poder determinar la correlación que pudiera existir, pero en la mayoría de los casos se ha llegado a una pobre correlación entre estos parámetros, por lo que se genera una gran incertidumbre a cerca del comportamiento real de dicho parámetro.

Como se mencionó, los datos que se utilizan en este trabajo se obtuvieron de los boletines publicados por el *National Hurricane Center (NHC)*, entre los años de 1999 y 2000. Con la limitante que el radio ciclostrófico no siempre es reportado, por lo que fue necesario determinar una relación que ayude a estimar dicho valor en función de los datos que se tienen reportados en los boletines.

En este trabajo, para poder realizar la calibración de los cuatro modelos descritos, se propone una ecuación para determinar el radio ciclostrófico en función de la presión central en el huracán en la región de estudio.

Una vez obtenidos los datos, se realizó el primer análisis entre la presión en el centro del huracán y el radio ciclostrófico, de donde se encontró que existía una pobre correlación entre ambos parámetros; como se puede observar en la Figura 4.2.



**Figura 4.2** Dispersión de datos de presión central contra radio ciclostrófico.

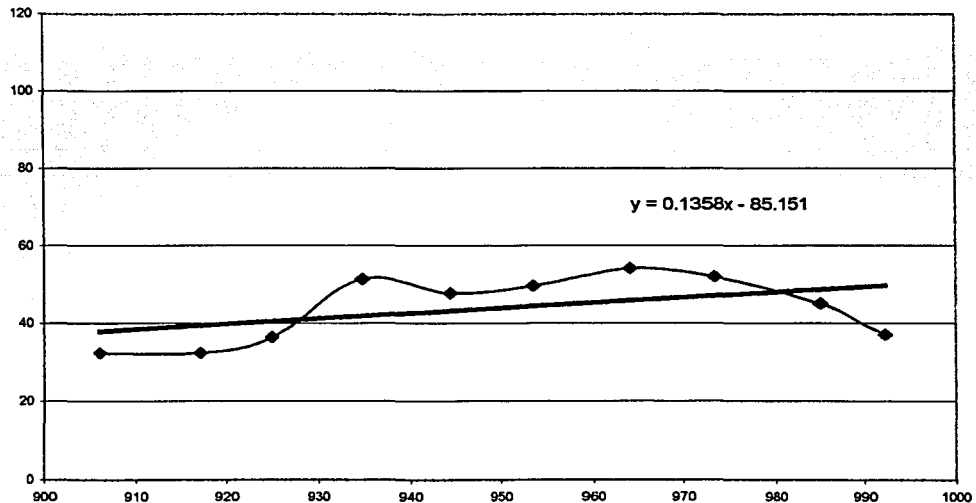
Debido a los resultados obtenidos, se decidió dividir el rango de presión central a cada 10mb, desde los 900 hasta los 1000mb y trabajarlos por separado, por lo que para cada intervalo de presiones se calculó el valor del radio ciclostrofico medio encontrando con esto el promedio de la muestra. Los resultados se muestran en la Tabla 4.3.

$P_o$ (mb)	$R_c$ (km)
900-910	32.41
910-920	32.41
920-930	36.42
930-940	51.35
940-950	47.77
950-960	49.65
960-970	54.17
970-980	52.00
980-990	45.07
990-1000	37.04

**Tabla 4.3** Rangos de presión central contra radio ciclostrofico

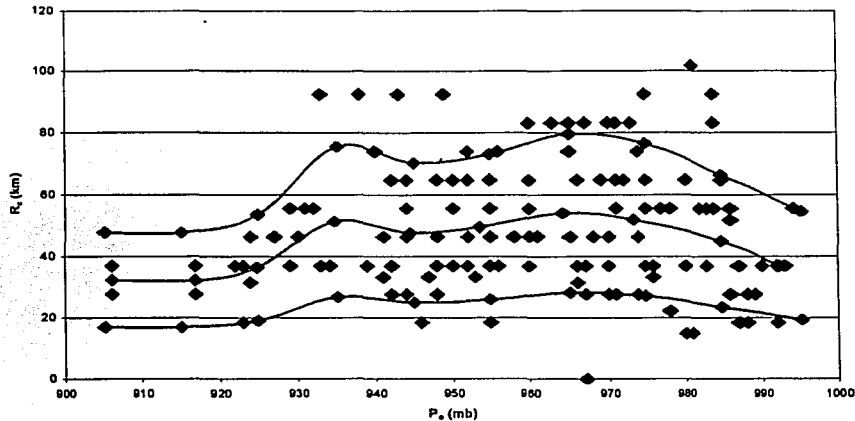
Con la media de la muestra, se obtuvo un ajuste a una ecuación de primer grado, la cual corresponde a una recta y se muestra a continuación. Esta ecuación relaciona el radio ciclostrofico con la presión central del huracán, tal y como se presenta en la Figura 4.3.

$$R_c = 0.1358P_o - 85.151 \quad (4.1)$$



**Figura 4.3** Relación de  $P_o$  vs.  $R_c$  para todo el rango de aplicación del huracán en el Atlántico.

Con el fin de asegurar que la ecuación (4.1) se aplica para todo el rango de presiones que un huracán puede presentar en la región del Atlántico, se calculó el intervalo de confianza de la muestra del 95%, el cual se muestra en la Figura 4.4.



*Figura 4.4 Intervalo de confianza al 95% de la muestra.*

### 4.3 VERIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE PRESIÓN, VIENTO Y ALTURA DE OLA.

Para determinar que modelo de presión, viento y altura de ola representa mejor el perfil, se consideran los cuatro modelos descritos en el capítulo tres: el Hydromet Model, el NOAA Model, el Bret Model X y el Fujita Model.

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 ecuaciones encontradas para la región de estudio.

Se verificó que los huracanes seleccionados pasaran dentro del radio de influencia determinado para las boyas oceanográficas.

Se realizó una comparación entre los datos medidos por las boyas oceanográficas y los resultados obtenidos a través de los modelos paramétricos, para los cuales posteriormente se mostraron las graficas obtenidas.

A continuación se muestran cinco de los huracanes que se utilizaron para la verificación de la calibración de los modelos de presión, viento y altura de ola en la zona del Atlántico: Allison, Floyd, Fran, Irene y Opal

En la figura 4.5 se ilustran las trayectorias que siguieron los huracanes con los que se verificó la calibración, de donde se puede observar que todos pasan muy cerca de la zona en donde se encuentran localizadas las boyas oceanográficas de la NDBC.

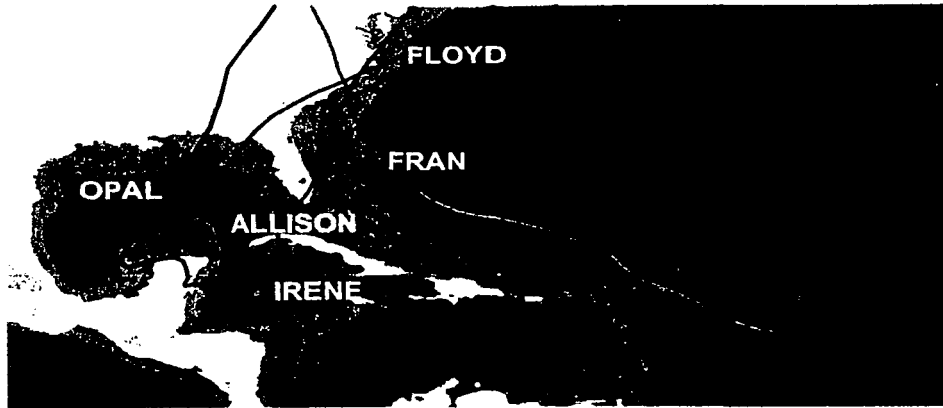


Figura 4.5 Trayectorias de los cinco huracanes con los que se verificó la calibración de los modelos.

### 4.3.1 VERIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE PRESIÓN.

En las siguientes cinco gráficas se observan los resultados obtenidos para cada uno de los huracanes seleccionados.

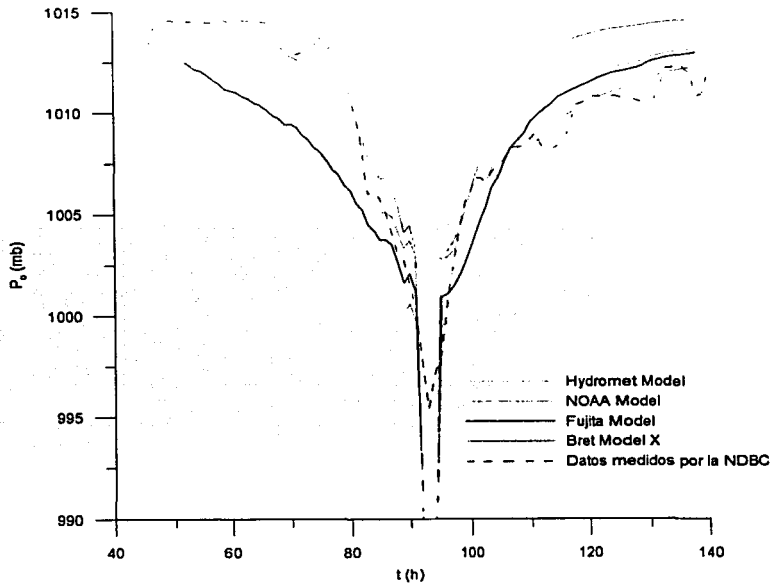


Figura 4.6. Perfil de presiones con respecto al tiempo para el huracán Allison (1995).

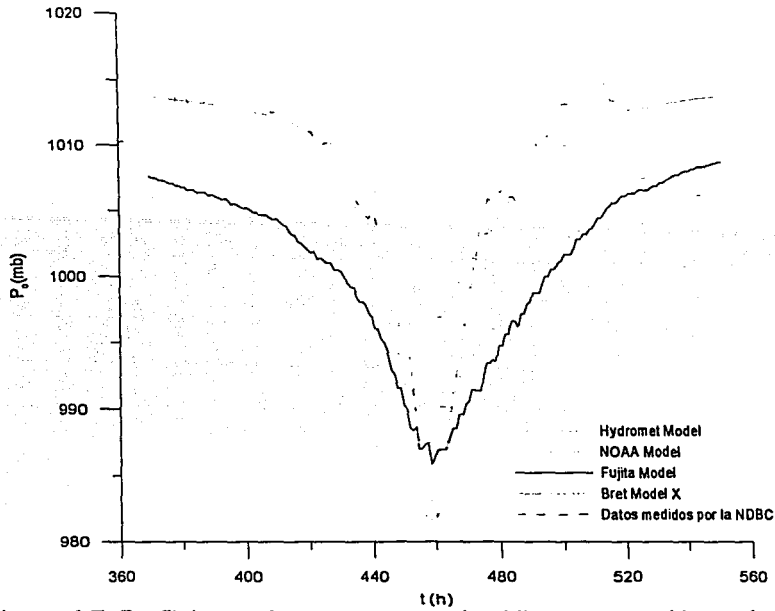


Figura 4.7. Perfil de presiones con respecto al tiempo para el huracán Floyd(1999).

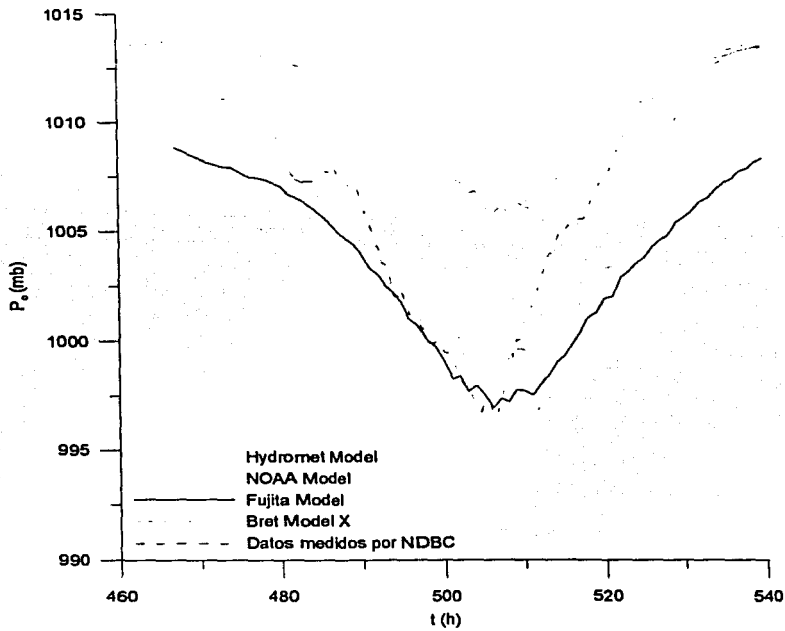


Figura 4.8. Perfil de presiones con respecto al tiempo para el huracán Fran (1996).

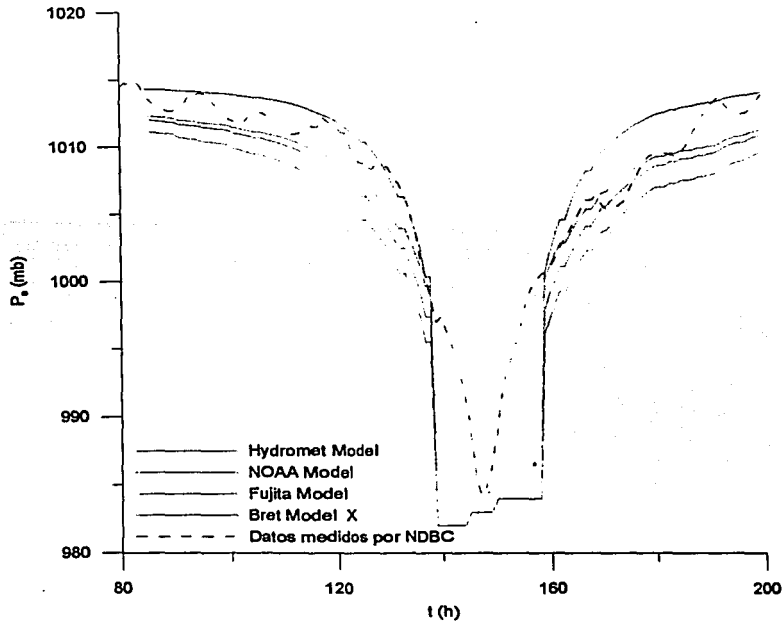


Figura 4.9. Perfil de presiones con respecto al tiempo para el huracán Irene (1999).

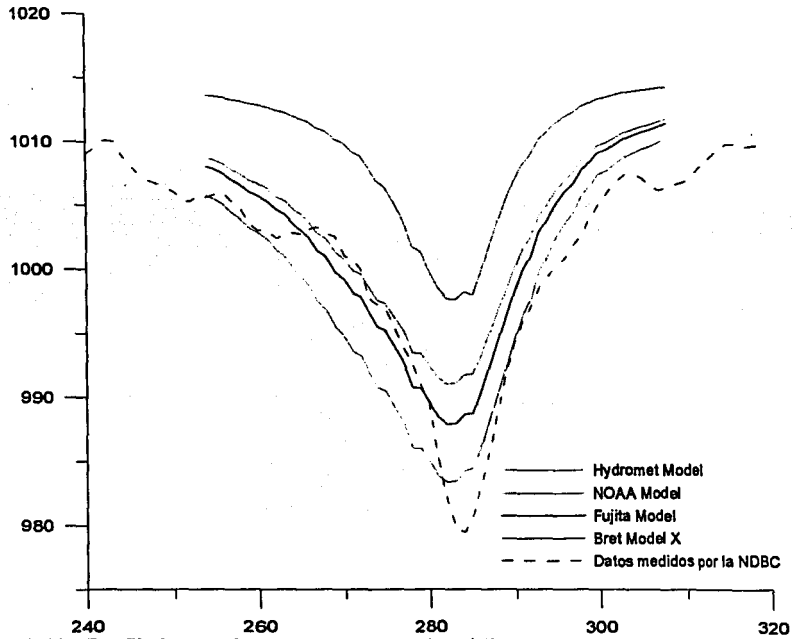
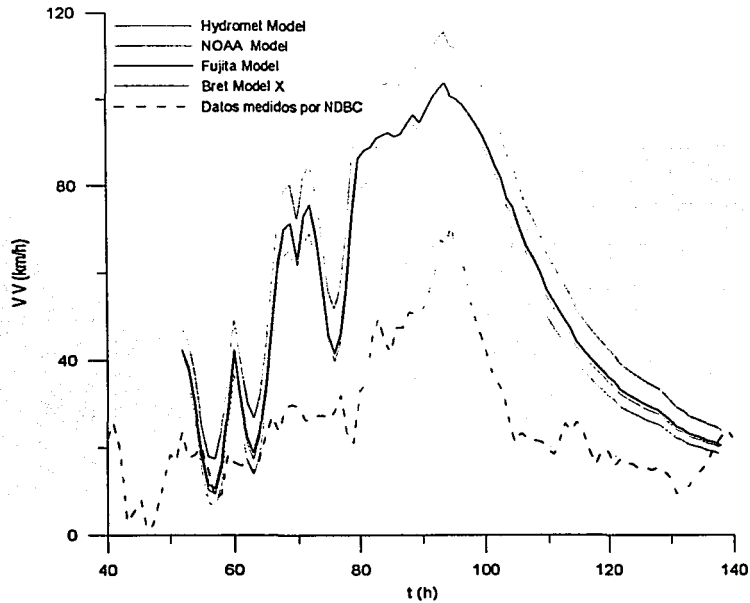


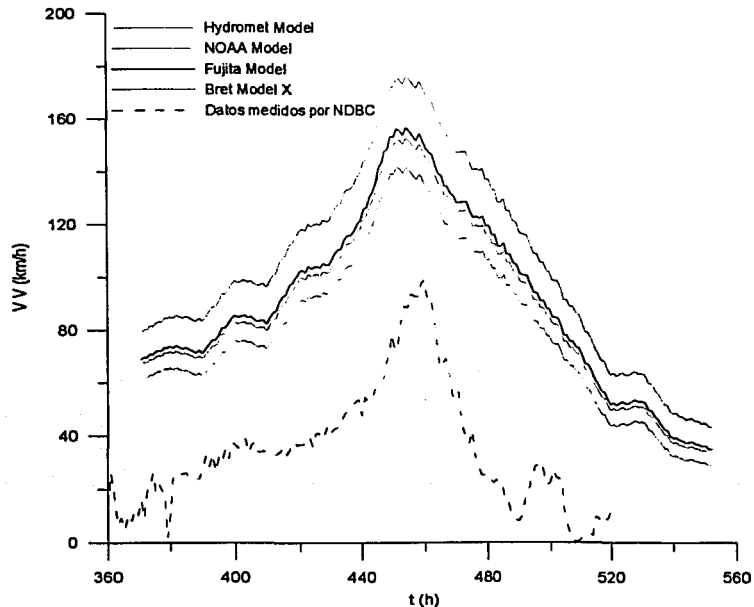
Figura 4.10. Perfil de presiones con respecto al tiempo para el huracán Opal (1995).

### 4.3.2 VERIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE VIENTO

Gráficas de velocidad de viento obtenidas para los 5 huracanes.



**Figura 4.11.** Perfil de Velocidad de viento para el huracán Allison (1995)



**Figura 4.12.** Perfil de velocidad de viento para el huracán Floyd (1999).

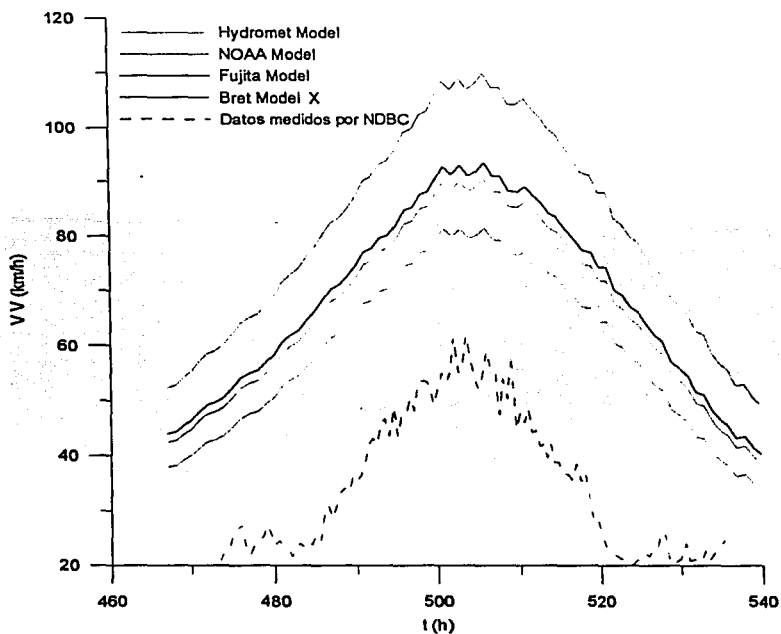


Figura 4.13. Perfil de velocidad de viento con respecto al tiempo para el huracán Fran (1996)

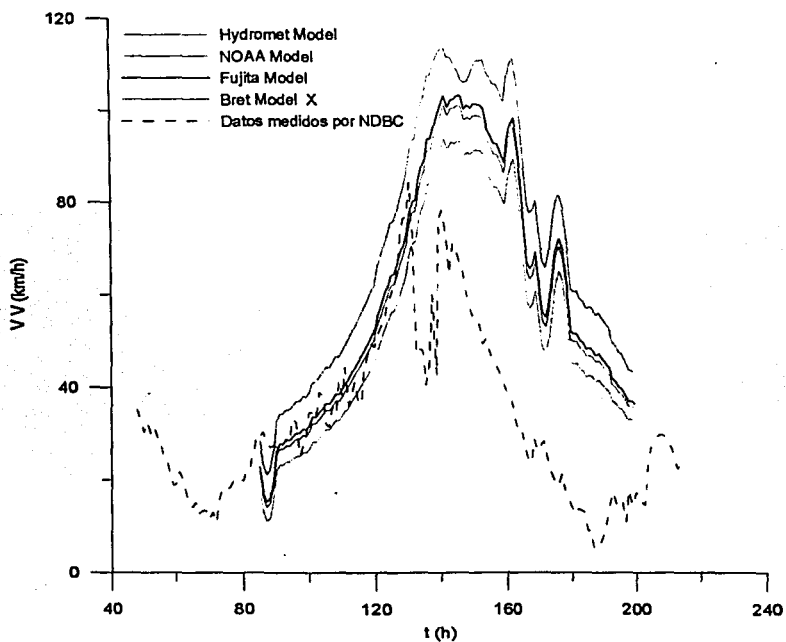


Figura 4.14. Perfil de velocidad de viento con respecto al tiempo para el huracán Irene (1999)



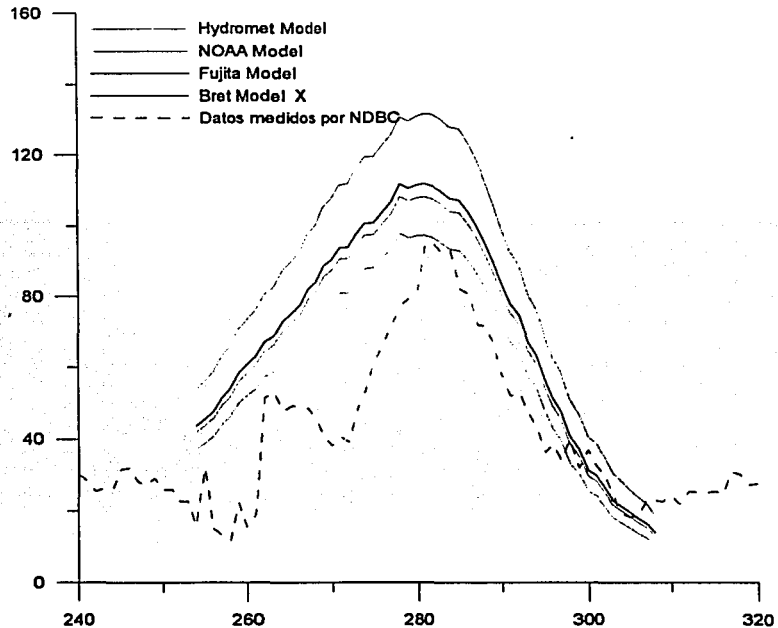


Figura 4.15. Perfil de velocidad de viento con respecto al tiempo para el huracán Opal (1995)

#### 4.3.2.1 FACTOR DE CORRECCIÓN DE VELOCIDAD DE VIENTO.

Como se observa en las figuras 2.16 a la 2.20, el ajuste para el parámetro de velocidad de viento no resulta ser muy bueno, ya que la trayectoria que siguen los modelos coincide con la trayectoria descrita por los datos de la boya pero los modelos sobrestiman los valores medidos, por lo que se tuvo que encontrar un factor de corrección.

Para cada huracán se calculó el factor de corrección de cada modelo, el cual se presenta en la Tabla 4.4. Una vez que se tuvo este factor, se obtuvo un factor promedio para cada modelo, el cual se puede observar en la misma tabla.

Huracán	Hydromet model	NOAA model.	Bret model X	Fujita model
ALLISON	0.5514	0.6161	0.5331	0.4497
FLOYD	0.3707	0.4042	0.3608	0.3134
FRAN	0.5180	0.5779	0.5011	0.4233
IRENE	0.7916	0.8865	0.7645	0.6436
OPAL	0.7437	0.8518	0.7142	0.5809
Promedio	0.5951	0.6673	0.5747	0.4822

Tabla 4.4. Factor de corrección de velocidad de viento para la calibración de los modelos.

Para trabajar únicamente con un factor de corrección y no tener uno diferente para cada modelo, se obtuvo el valor promedio de los cuatro modelos, de donde se tiene que  $f_c = 0.58$  es el factor de corrección general y se aplicó a los cuatro modelos utilizados para poder ajustar el parámetro de la velocidad de viento.

A continuación se muestran las gráficas obtenidas de velocidad de viento al aplicarle el factor de corrección general a cada modelo.

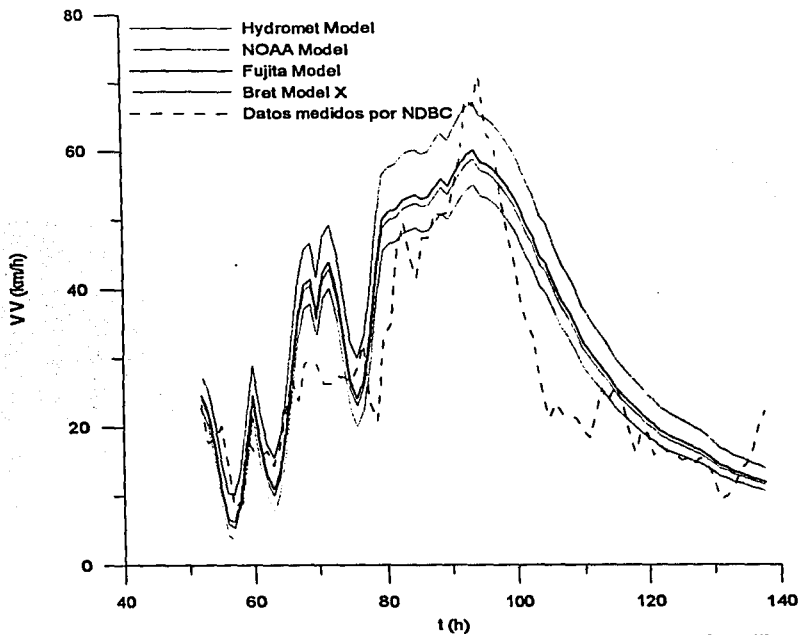


Figura 4.16. Perfil de velocidad de viento corregido para el huracán Allison (1995)

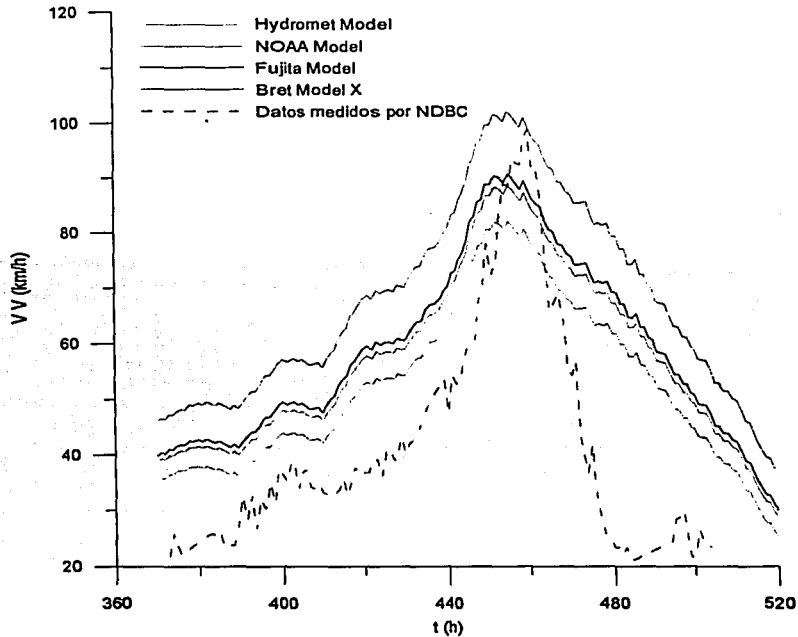


Figura 4.17. Perfil de velocidad de viento corregido para el huracán Floyd (1999)

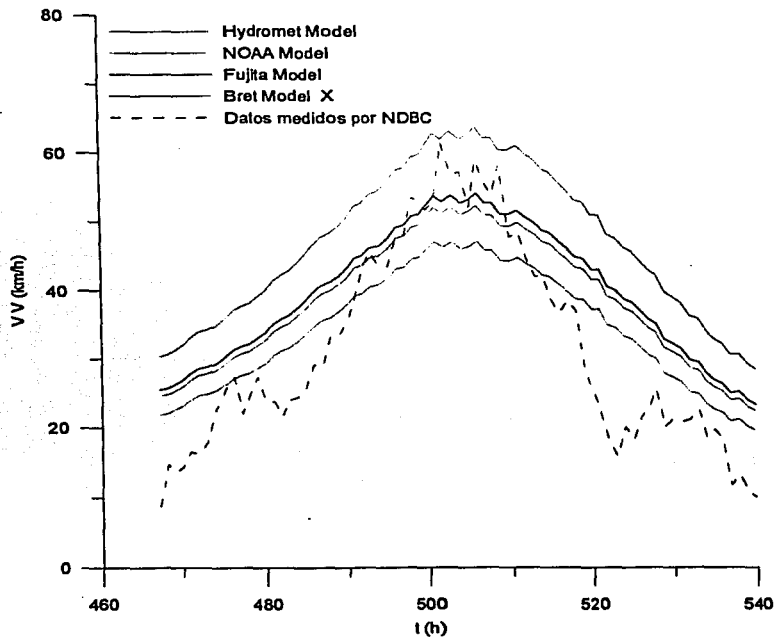


Figura 4.18. Perfil de velocidad de viento corregido para el huracán Fran (1996)

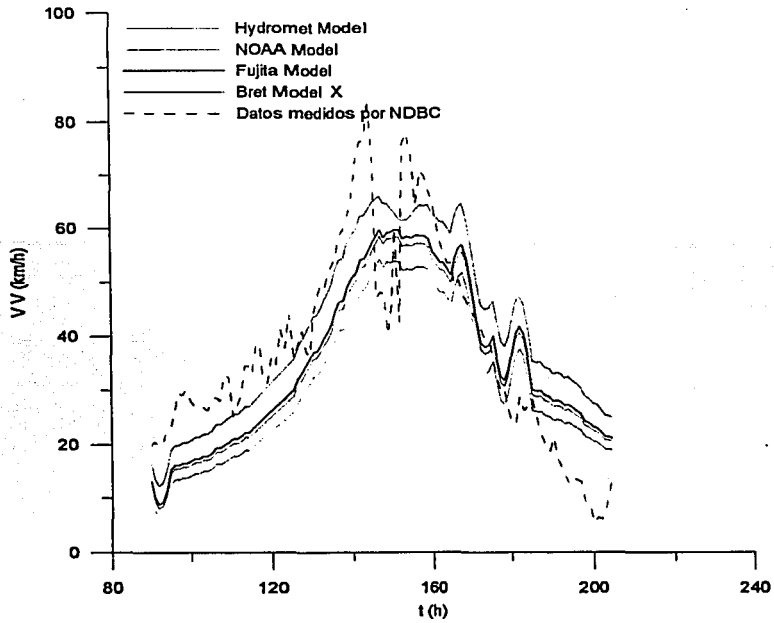


Figura 4.19. Perfil de velocidad de viento corregido para el huracán Irene (1999)

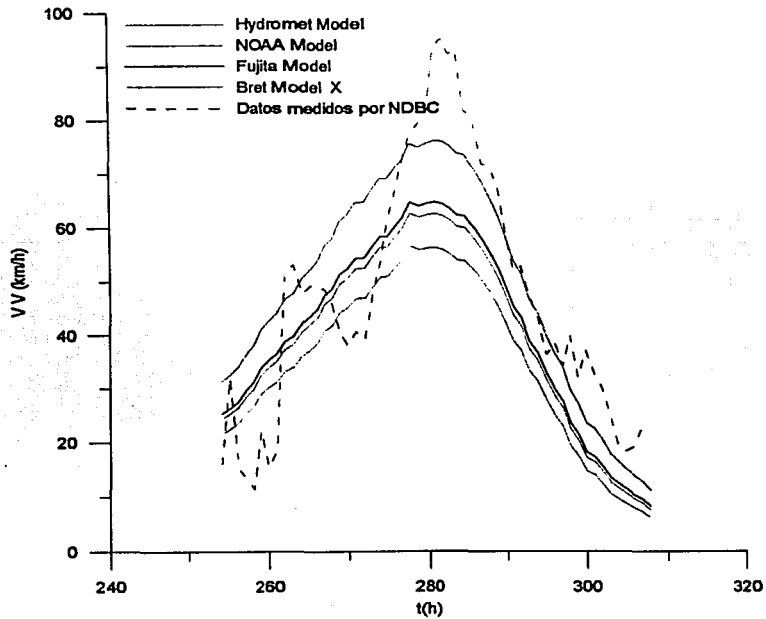


Figura 4.20. Perfil de velocidad de viento corregida para el huracán Opal (1995)

### 4.3.3 VERIFICACIÓN DE ALTURA DE OLA

Para la mayoría de las boyas del Atlántico, no se tiene registro de altura de ola, por lo que únicamente se muestran las gráficas obtenidas de los tres huracanes que registraron este parámetro.

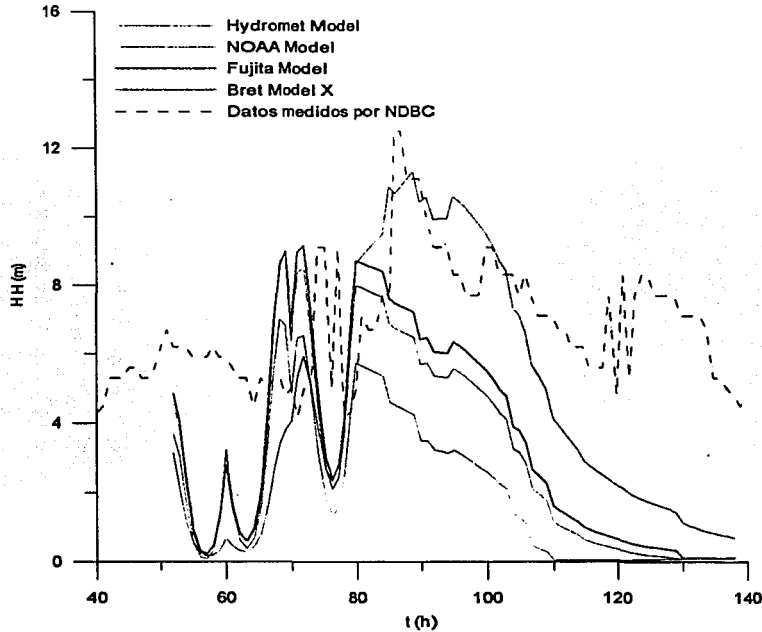


Figura 4.21. Perfil de altura de ola con respecto al tiempo para el huracán Allison (1995)

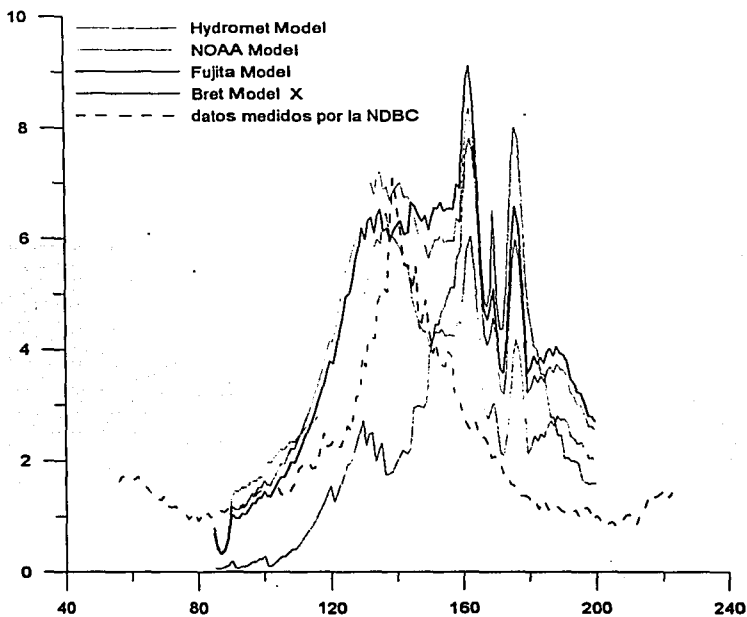


Figura 4.22. Perfil de altura de ola con respecto al tiempo para el huracán Floyd (1999)

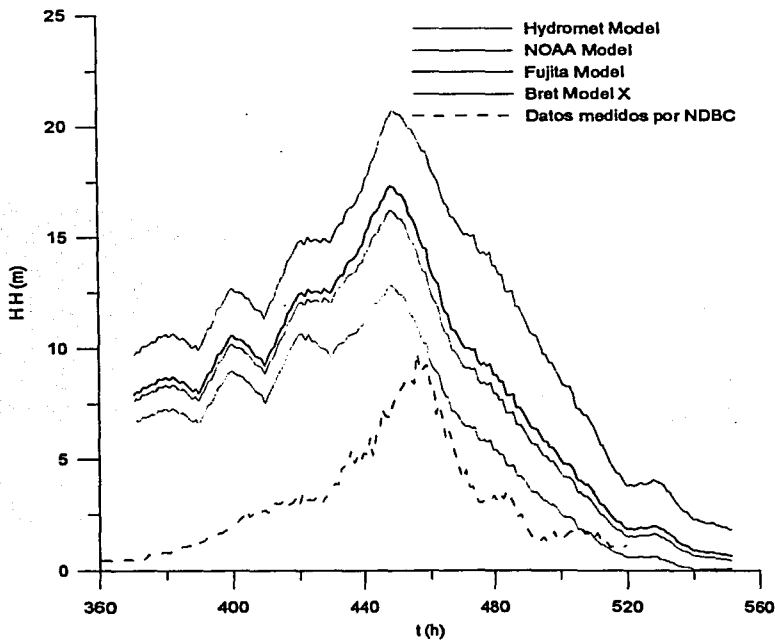


Figura 4.23. Perfil de altura de ola con respecto al tiempo para el huracán Irene (1999)

#### 4.4 RESULTADOS

- En términos generales todos los modelos representan bien la tendencia del perfil de presiones.
- Con respecto a la velocidad de viento, los modelos presentaron un incremento con respecto a los datos medidos, por lo que fue necesario calcular un factor de corrección.
- Las diferencias más importantes, que se encontraron entre los modelos y los datos medidos, se presentan cuando el ojo del huracán está más alejado de las boyas oceanográficas.
- El error medio calculado para cada modelo con respecto al valor leído por la boya se muestra en la Tabla 4.5.

	HYDROMET	NOAA	FUJITA	BRET
PRESIÓN	5.621272	3.796872	4.129261	4.459391
VIENTO	11.92153	11.37771	12.21504	15.10325
ALT. DE OLA	4.419915	3.755616	4.571048	5.249012
ERROR	7.320906	6.310066	6.971784	8.27055

*Tabla 4.5. Error calculado para cada modelo.*

De la tabla anterior, se puede observar que los modelos que mejor ajuste presentaron fueron el NOAA Model y el Fujita Model.

## **CAPÍTULO 5. Aplicación de los modelos**



## 5 APLICACIÓN DE LOS MODELOS

Una de las aplicaciones más importantes que se le puede dar a los modelos de presión y viento es para estimar niveles de marea de tormenta. Los modelos hidrodinámicos convencionales resuelven las ecuaciones no-lineales de cantidad de movimiento y la ecuación de continuidad, promediadas en la vertical, por ejemplo el modelo presentado por Bautista (2001). Este modelo permite estudiar las implicaciones que pueden experimentar zonas geográficas potencialmente vulnerables a la presencia de huracanes, siendo importantes como herramienta de predicción, caracterización o simplemente para el estudio de escenarios ficticios o potenciales, pero su utilidad más relevante es que pueden proporcionar elementos para el desarrollo de estrategias de prevención de desastres.

El termino marea de tormenta describe el incremento del nivel medio del mar causado por fuertes perturbaciones atmosféricas, como vientos fuertes y cambios súbitos en presión atmosférica.

La combinación de los factores que caracterizan a los ciclones tropicales, tales como oleaje intenso, incremento en el nivel medio del mar, los fuertes vientos y las corrientes generadas por el oleaje y el viento son causas de peligro para los asentamientos humanos que se encuentran sobre la costa.

### 5.1 APLICACIÓN

Con el fin de mostrar una de las aplicaciones que tienen los modelos de presión y viento se presenta el estudio de marea de tormenta generada por el huracán Gilberto(1988). Se eligió este evento dado que ha sido el huracán con mayor intensidad que ha azotado las costas mexicanas, el cual presentó una presión mínima de  $888mb$  y rachas de vientos sostenidos con velocidades superiores a  $300km/h$  sobre la ciudad de Cancún, Quintana Roo. El fenómeno provocó la evacuación de alrededor de 75,000 personas, el cierre de puertos y modificaciones morfológicas importantes en las playas.

El modelo de marea de tormenta fue conducido a través de una malla de alta resolución, con anchos de celda de 500 m, para el cual se necesita conocer la batimetría, condiciones atmosféricas y tipo de fondo. En la Figura 1 se muestra la batimetría utilizada para el modelo hidrodinámico, la escala que se muestra en los ejes está dada en metros. La zona geográfica analizada cuenta con un área de  $6375 km^2$ , el punto (0,0), corresponde a las coordenadas geográficas Longitud Oeste  $87^\circ$  y Latitud  $20.745^\circ$ . El tiempo necesario para modelar  $650km$  de recorrido del huracán Gilberto fue de 1 hora 30 minutos, lo cual significa un avance muy importante, si se desea utilizar el modelo como una herramienta de predicción.

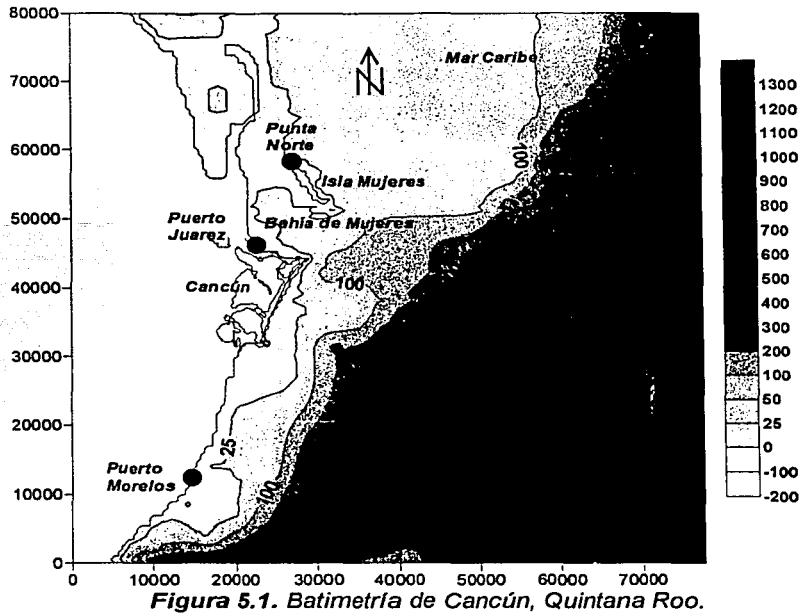
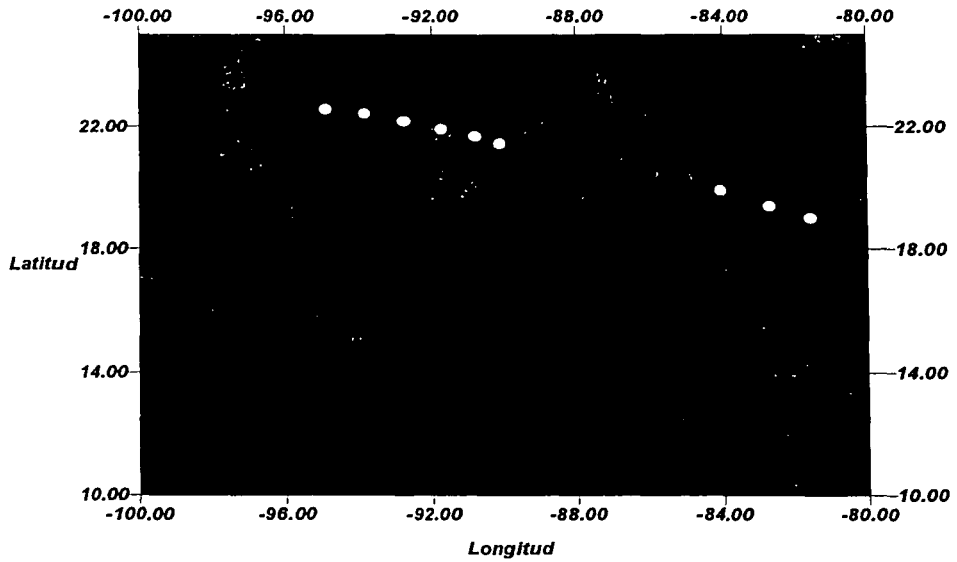


Figura 5.1. Batimetría de Cancún, Quintana Roo.

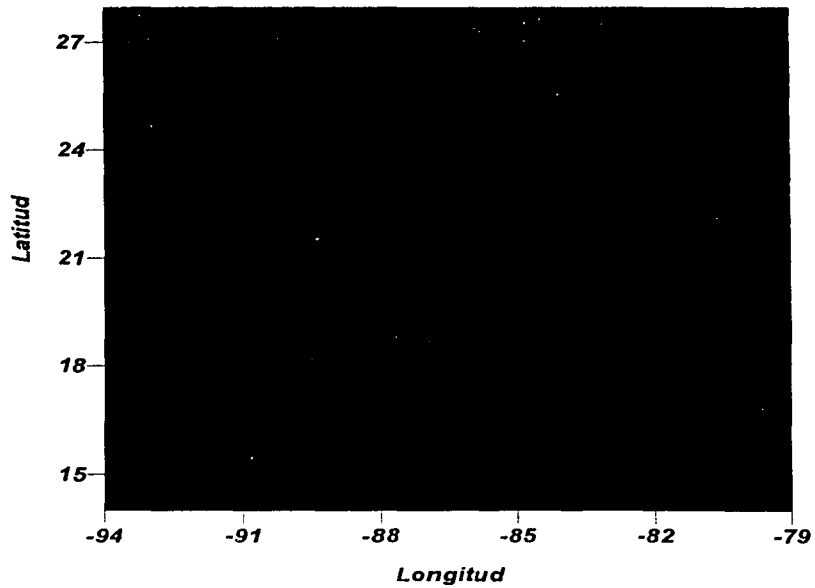
En la Tabla 5.1 y Figura 5.2 se muestra la trayectoria que presentó el huracán Gilberto de acuerdo con los datos del Servicio meteorológico Nacional.

Fecha	Hora	Longitud	Latitud	presión central mb
9-13-88	06:00	-79.7	18.5	952
9-13-88	12:00	-81.1	18.8	934
9-13-88	18:00	-82.5	19.4	905
9-14-88	00:00	-83.8	19.7	888
9-14-88	06:00	-85.3	19.9	889
9-14-88	12:00	-86.5	20.4	892
9-14-88	18:00	-87.8	20.9	925

Tabla 5.1. Trayectoria real del huracán Gilberto (1988)

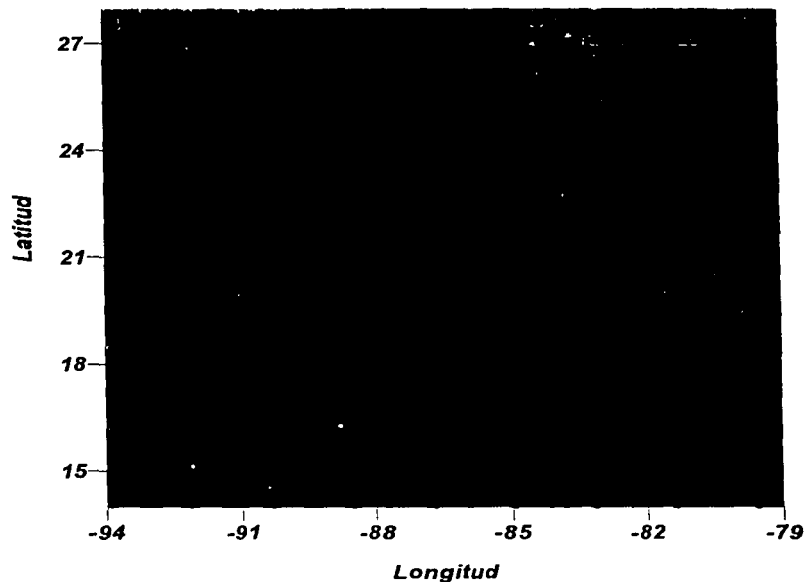


• **Trayectoria de modelado**  
**Figura 5.2.** Trayectoria del Huracán Gilberto (1988)



**Figura 5.3.** Campo de presiones del huracán Gilberto a 600km antes de su arribo a la costa.

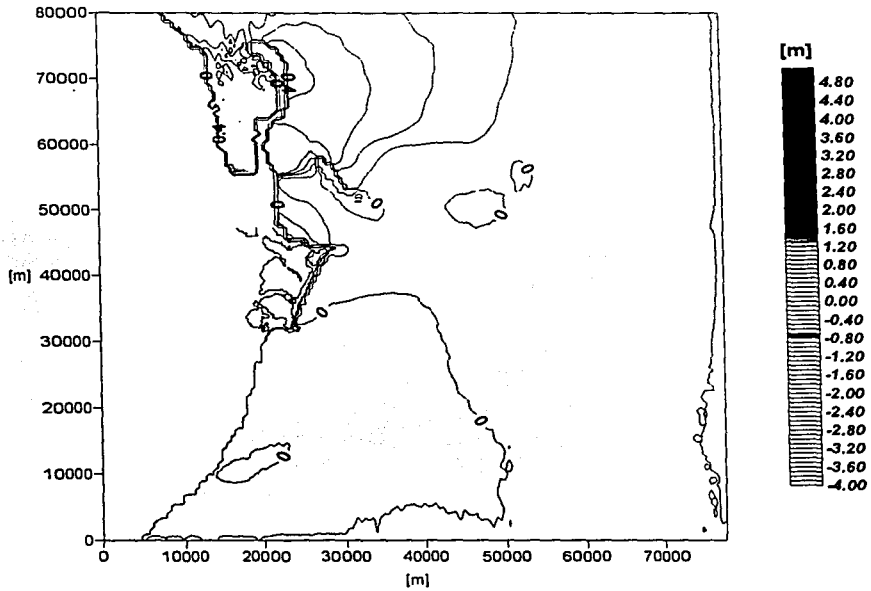
A partir de la aplicación de los modelos de presión y viento se generaron los campos de presión y viento que alimentaron al modelo hidrodinámico. Como ejemplo, en la Figura 5.3 se muestra un mapa de isobaras en el momento en el que el huracán se encontraba a  $600\text{km}$  antes de su arribo a la costa, y en la cual se observa que se tiene un gradiente de presiones muy pronunciado en las cercanías del ojo del huracán a causa de su gran intensidad. En la figura 5.4 se muestra el campo de viento para la posición mencionada, con una separación de líneas de igual intensidad de viento de  $20\text{km/h}$ ; de donde se puede apreciar que las líneas de igual intensidad de viento no forman círculos concéntricos, debido a que existe una deformación por efecto del giro y desplazamiento del huracán. Los vientos máximos proporcionados por el modelo alcanzaron una intensidad de  $320\text{km/h}$ , por lo que al comparar con los datos del Servicio Meteorológico Nacional se encuentra concordancia entre los datos obtenidos y los medidos.



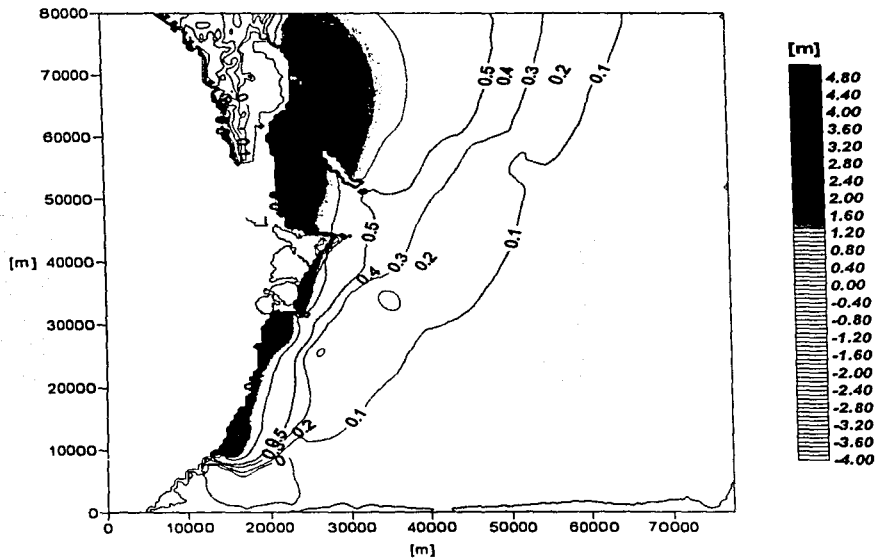
**Figura 5.4.** Campo de vientos generado por el huracán Gilberto antes de arribar a la costa.

El nivel máximo registrado por la marea de tormenta en la ciudad de Cancún, osciló entre los 3 y 4m por encima del nivel medio del mar durante el evento. El modelo de inundación proporcionó resultados similares. A continuación se presenta el desarrollo de la marea de tormenta para tres tiempo distintos.

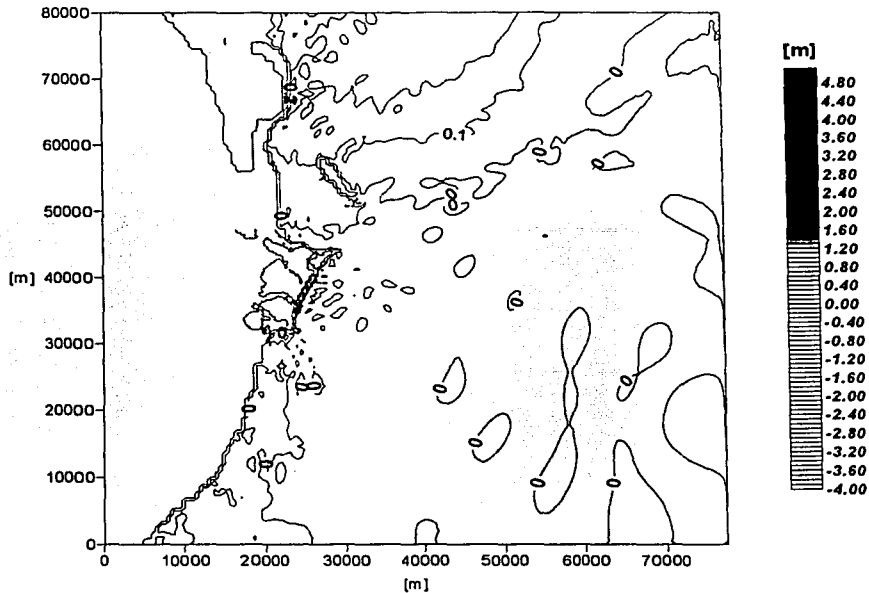
La Figura 5.5 muestra la marea generada 2 horas antes del arribo del ojo del huracán a la línea de costa, la Figura 5.6 representa la marea de tormenta generado para el momento en que el evento se encuentra en el área de interés, por último la Figura 5.7 representa la marea de tormenta justo 2 horas de que el huracán cruza la línea de costa.



**Figura 5.5.** Altura del nivel del mar calculada con el modelo de marea de tormenta 2 horas antes del arribo del ojo del huracán a la línea de costa.



**Figura 5.6.** Altura del nivel del mar calculada con el modelo de marea de tormenta justo cuando el huracán se encuentra en el punto de interés.

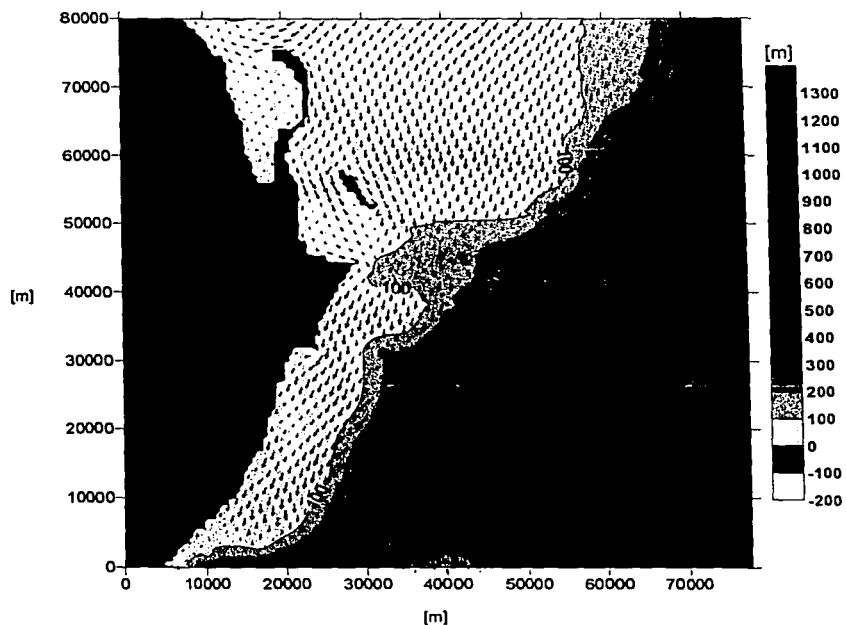


**Figura 5.7.** Altura de ola calculada con el modelo 2 horas después del arribo del huracán a la línea de costa.

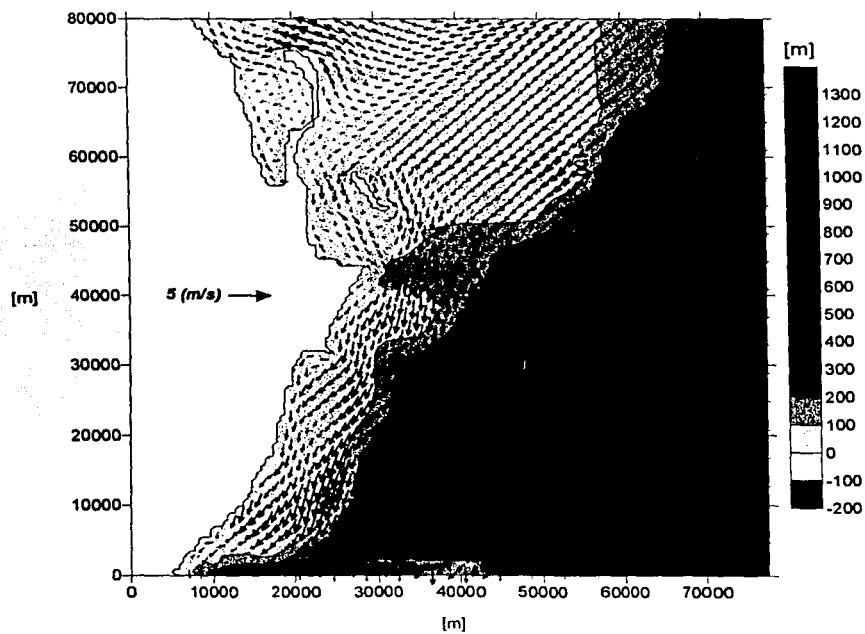
El modelo puede calcular la dirección de las corrientes producidas por el viento; las siguientes tres figuras muestran la dirección e intensidad de las corrientes correspondientes al mismo caso presentado en las figuras anteriores. Se puede apreciar que estas tienden hacia una dirección similar a la del viento ciclostrofico.

Para las Figuras 5.8, 5.9 y 5.10 mostradas a continuación, se tiene que las velocidades con máxima intensidad se encuentran en aguas intermedias y someras, siendo en las aguas profundas en donde se tienen las mínimas velocidades.

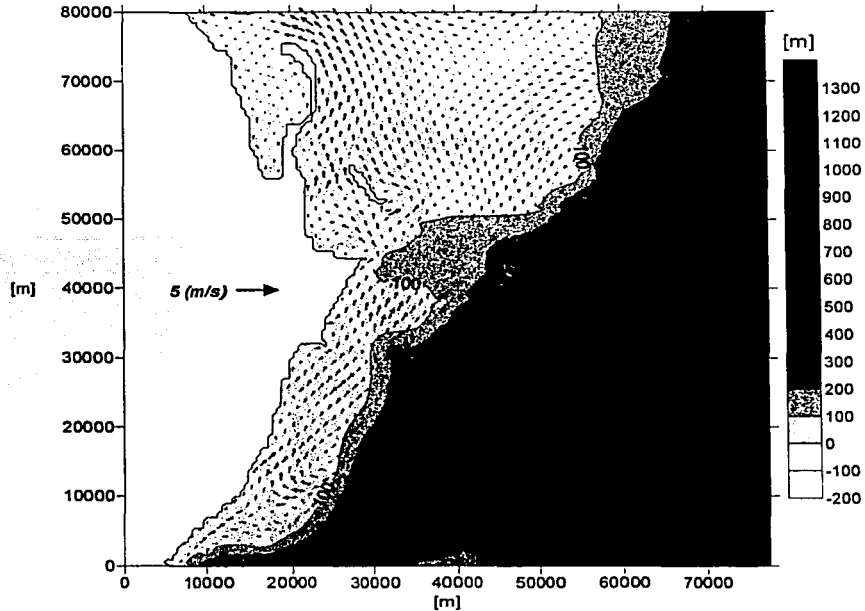
En la Figura 5.10 correspondiente a 2 horas después de que el huracán arribó a la línea de costa se puede observar que existe un cambio en la dirección de las corrientes, esto por efecto del cambio en la dirección del viento ciclostrofico cuando el huracán cruza la línea de costa.



**Figura 5.8.** Dirección e intensidad de corriente proporcionadas por el modelo de marea de tormenta, 2 horas antes de que el huracán arribara a la línea de costa.



**Figura 5.9.** Dirección e intensidad de la velocidad de las corrientes proporcionadas por el modelo de marea de tormenta en el momento en el que el huracán cruza la línea de costa



**Figura 5.10.** Dirección e intensidad de la velocidad de las corrientes proporcionadas por el modelo de marea de tormenta justo 2 horas después de que el huracán toca la línea de costa.

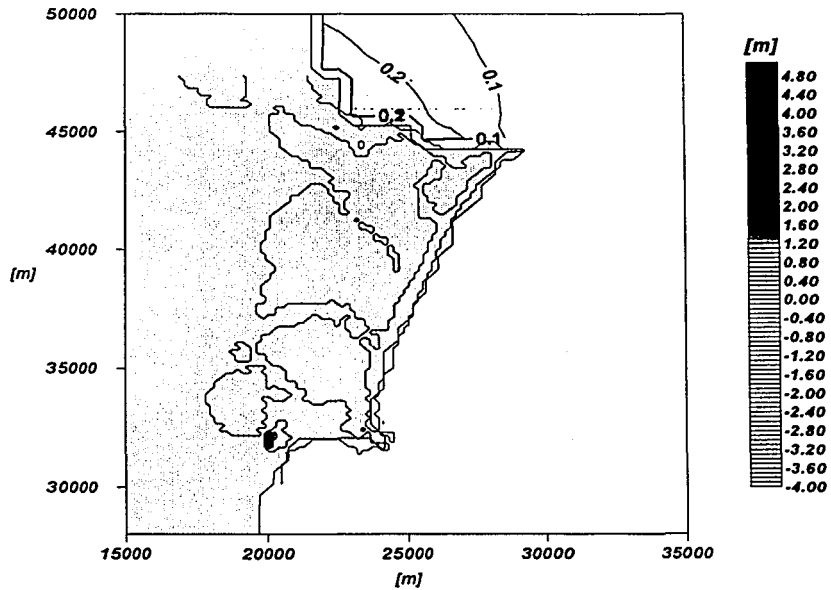
Una vez que se tienen estos datos también se puede modelar el desarrollo de la inundación generada por la marea de tormenta. La Figura 5.11 muestra el inicio de inundación de la zona turística de Cancún, considerando 2 horas después de que el huracán tocó la costa. En la Figura 5.12 se puede observar que de acuerdo con los resultados del modelo, la máxima inundación generada cubrió un área de 4 km<sup>2</sup> aproximadamente con alturas que oscilan entre los 2.5 y 3.5 m y en la Figura 5.13 se nota el secado del área inundada, después de que el ciclón ha cruzado la línea de costa.

Las variaciones de presión, intensidad de viento, marea de tormenta y dirección e intensidad de corrientes se tomaron para dos puntos ubicados en la costa de Quintana Roo, el primero corresponde a la Punta norte de isla Mujeres, y Puerto Juárez.

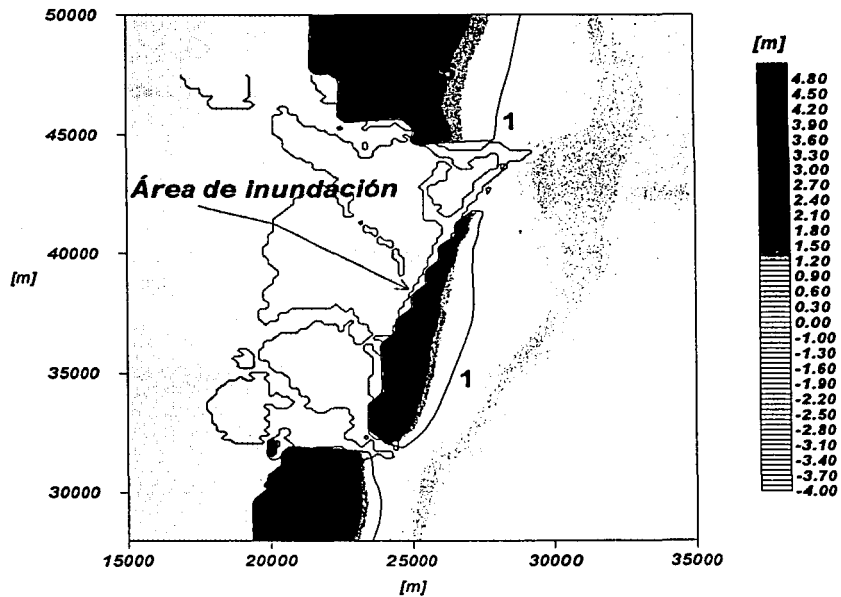
En las siguientes gráficas se puede observar que con respecto a puerto Juárez se encontraron alturas de ola de 2.2m, una máxima intensidad de viento de 130km/h y una presión atmosférica de 1005mb, como ambas gráficas son simétricas se espera que la máxima altura de ola se presenta cuando se presenten los picos de presión y viento.

Con respecto a las velocidades, se puede apreciar que la componente de la corriente en dirección vertical es hacia el norte en las primeras 10 horas a causa de un efecto de refracción de la corriente, posteriormente cambia hacia el sur formando un vórtice, observando los mismos efectos en la zona aledaña a Punta Norte de Isla Mujeres.





**Figura 5.11.** Inicio de la inundación en las costas de Cancún, Quintana Roo, 2 horas después del arribo del huracán a la línea de costa.



**Figura 5.12.** Inundación máxima sobre las costas de Cancún, (500m medido a partir de la línea de costa)

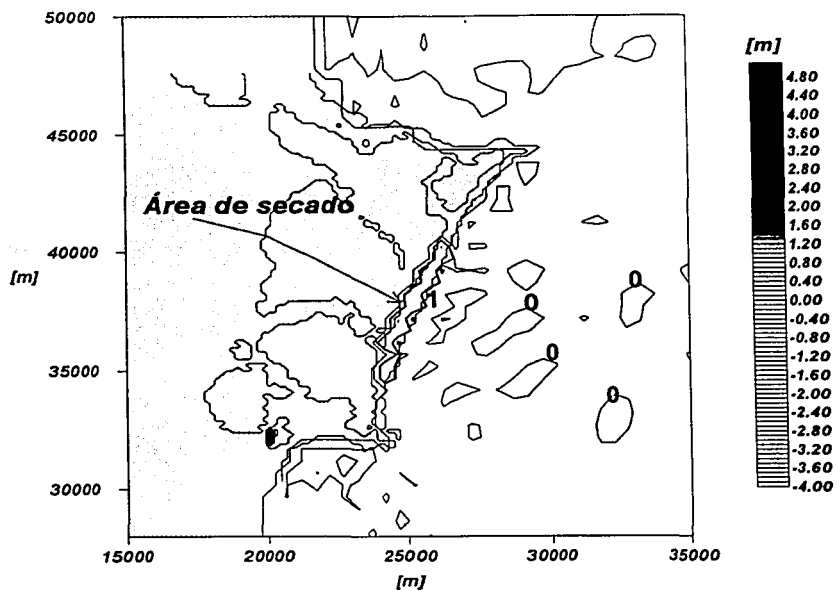
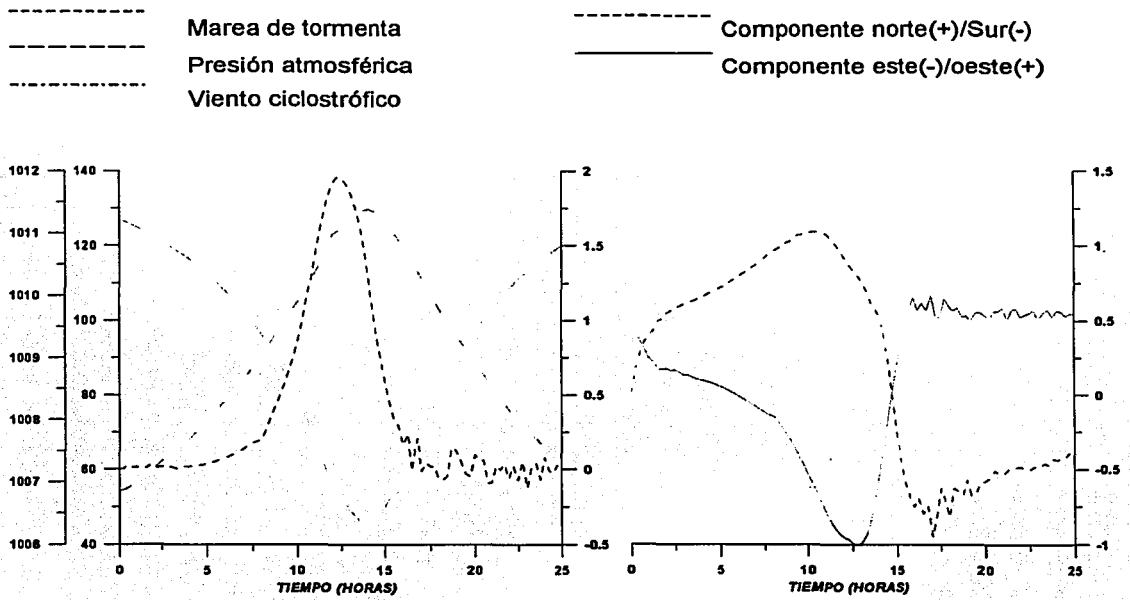


Figura 5.13. Secado de la costa de Cancún, Quintana Roo, después del arribo del huracán a la costa.

Isla Mujeres, Punta Norte.



Puerto Juárez

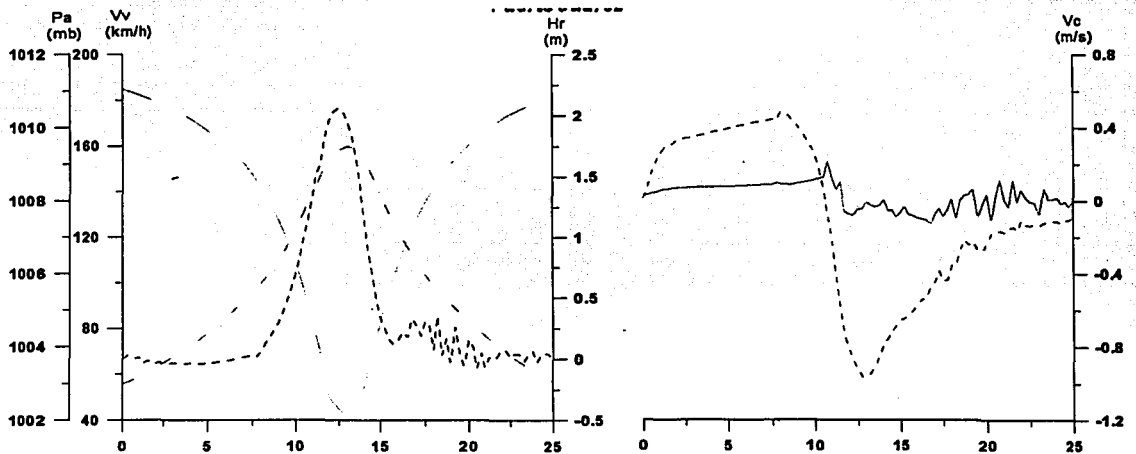


Figura 14. Variación de la presión, viento ciclotrónico marea de tormenta e intensidad de corriente para dos puntos sobre la línea de costa.

---

## CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado diversas metodologías para evaluar las características oceano meteorológicas asociadas a huracanes más importantes. En particular, la presente investigación se puede resumir y concluir a través de lo siguiente:

- Para la zona del Atlántico se obtuvo un total de 1234 avisos, de cuales se observó que la zona Atlántico 2 fue la que presentó mayor cantidad de avisos. Las categorías de Tormenta y Depresión Tropical son las que reportan mayor ocurrencia. Del análisis de no-ocurrencia realizado en la zona, se puede observar que la tendencia es a la ocurrencia de eventos en toda la zona, lo que podría indicar que para los años siguientes se tendrá al menos un evento por año.

De acuerdo al estudio realizado para cada mes, septiembre es que reportó mayor número de eventos. Por otro lado, tanto el mes de mayo como el mes de diciembre tienen poca presencia en la temporada de huracanes.

- El total de eventos registrados para la zona del Pacífico es de 3363, de las tres áreas en que se dividió esta zona, la zona 3 fue la que tuvo mayor cantidad de registros. El total de eventos registrados para Pacífico 1 y Pacífico 2 en conjunto, es mucho menor al total de eventos registrados en Pacífico 3.

Al igual que en la región del Atlántico, esta región tiene mayor cantidad de eventos en las categorías de Tormenta y Depresión tropical.

- Para la zona del Pacífico, únicamente se presentó el fenómeno de la no-ocurrencia en la zona Pacífico 1. Observando la posible tendencia de las tablas que reportan estos datos se puede suponer que se incremente la ocurrencia de eventos para los próximos años.

La temporada de huracanes para esta región puede tomarse desde el mes de mayo y hasta el mes de noviembre.

- Con respecto a ambas zonas, la región del Atlántico presenta menor número de eventos que la región del Pacífico, sin embargo el Pacífico es la región en la que se tienen mayores registros de la intensidad denominada "Huracán" clase 4 y 5; mientras que para la región del Pacífico se tienen registros de categorías menores a estas.
- Se encontró una ecuación que relaciona el radio ciclostrofico con la presión central del huracán para el rango de aplicación de 960mb a 1000mb
- Al realizar la calibración de los modelos, 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 observa que los cuatro modelos de presión (Hydromet, NOAA, Bret y Fujita) no varían significativamente uno del otro.
- Tanto el modelo propuesto por la NOAA como el Fujita fueron los modelos que mejor ajustaron en la calibración para la representación del fenómeno.

## FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

- En función del radio ciclostrofico y de la presión central, realizar la calibración de la ecuación propuesta para el Océano Pacífico, comparándola con la información tomada en campo a través de boyas oceanográficas.
- Poder encontrar una ecuación que represente las características del fenómeno tomando en cuenta además del radio ciclostrofico otros parámetros como la velocidad de desplazamiento, latitud y longitud.
- Realizar un análisis de vulnerabilidad histórica, para la zona del Atlántico mexicano y el Pacífico, a lo largo de los 11000km de costa.
- Elaborar un Atlas de vulnerabilidad por huracanes para así encontrar zonas de riesgo y vulnerabilidad en la República.

---

**BIBLIOGRAFÍA**

- Bretschneider, C. (1990) Tropical cyclones. Gulf Publishing. Handbook on Ocean Engineering, Chapter 6.
- CDMP/CIMH (1999) Storm Hazard Atlas Introductory Text, Unit of Sustainable Development and Environment for the USAID Office of Foreign Disaster Assistance and the Caribbean Regional Program.
- Contreras A (1999) Pronostico de trayectoria de ciclones utilizando datos estadísticos y sistemas de percepción remota en tiempo real. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Contreras A (2000) Estudio océano meteorológico del riesgo generado por ciclones tropicales en el litoral mexicano Tesis para obtener el título de Maestro en Ingeniero Civil, DEPMI, UNAM.
- Dean R.G., Chiu T. Y., Wang S. Y. (1995) Combined total storm tide frequency analysis for Pinellas County, Florida. Florida State University.
- Díaz G (2000) Análisis de vulnerabilidad por presencia de huracanes en el litoral de la Península de Yucatán. Tesis para obtener el título de Maestro en Ingeniero Civil, DEPMI, UNAM.
- Díaz G, Contreras A, Pedrozo A, Silva R. (2000) "Sistema para la evaluación de riesgos oceanográficos generados por ciclones tropicales" AMH, XVI Congreso Nacional de Hidráulica, Morelia, México.
- Inter-American Development Bank Newsletter (1989) "Emergency Plan for the Yucatan". Washington, D.C.: Inter-American Development Bank.
- Jacob S. D. (1998) Upper Ocean Report to Tropical Cyclone Wind Asymmetries. RSMAS, Miami Florida.
- Pan K. (1996) A parametric Wind field model for Hurricane Risk Assessment. ASCE.
- Sánchez, C. et al. (1998) Comparison of 4 wave prediction models. 5<sup>th</sup> International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting. Melbourne Fl. Pp. 134-145.
- Silva R, Díaz G., Contreras A., Bautista G. & Sánchez C. (2000) "Determination of oceanographic risk for hurricanes on the Mexican coast", 6th international Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, pg 137-160.
- 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.

- Silva R, Contreras A, Bautista G, Díaz G (2000) "Determinación del Riesgo Oceanográfico en el Litoral Mexicano", XI Congreso Panamericano de Ingeniería Oceánica y Costera. Panamá.
- UNDRO News. (1989). "Hurricanes Gilbert and Joan: Implications for the Caribbean Housing Sector" (Geneva: UNDRO, 1989).
- Van Gelder, P.H.A.J.M. (1999). Statistical Methods for the Risk-Based Design of Civil Structures. T.U. Delft. Ne.

ANEXO



---

## ANEXO

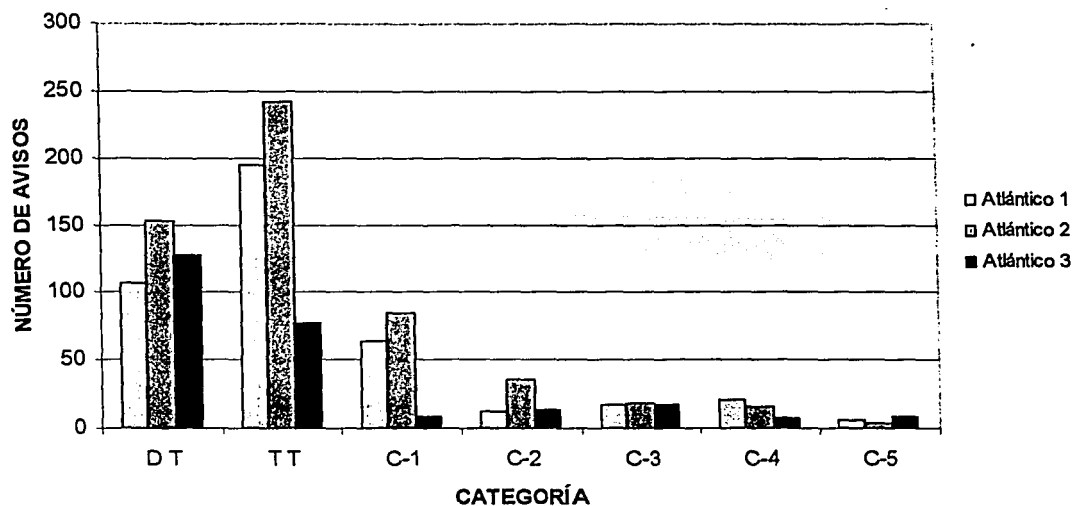
A partir del análisis estadístico de la base de datos del océano Pacífico y Atlántico se generaron las siguientes gráficas:

Las figuras A1 y A2 representan el número de avisos registrados por categoría para cada una de las tres zonas en las que se dividió al Atlántico y al Pacífico.

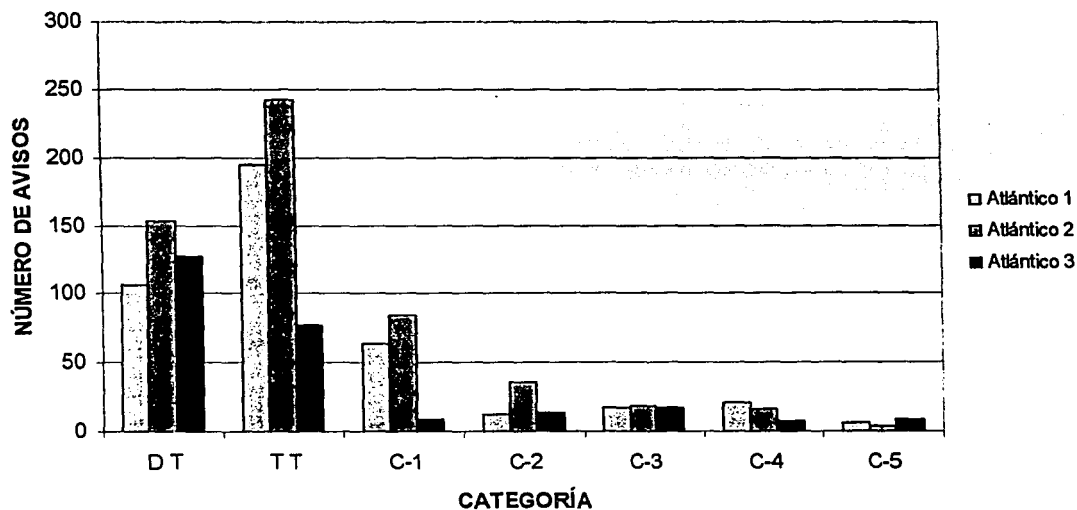
Tanto la figura A3 como A4, muestran el total de avisos contabilizados para el Atlántico y el Pacífico en cada año del intervalo de estudio, para cada una de las tres zonas de cada región.

Para cada mes que se registró dentro del intervalo de estudio se muestra el total de eventos registrados de acuerdo a la categoría a la que pertenecen para cada una de las décadas, de donde las figuras A5, A6 Y A7 son para las zonas Atlántico1 Atlántico 2 y Atlántico 3, y las figuras A8, A9 Y A10 representan al Pacífico 1, Pacífico 2 y Pacífico 3.

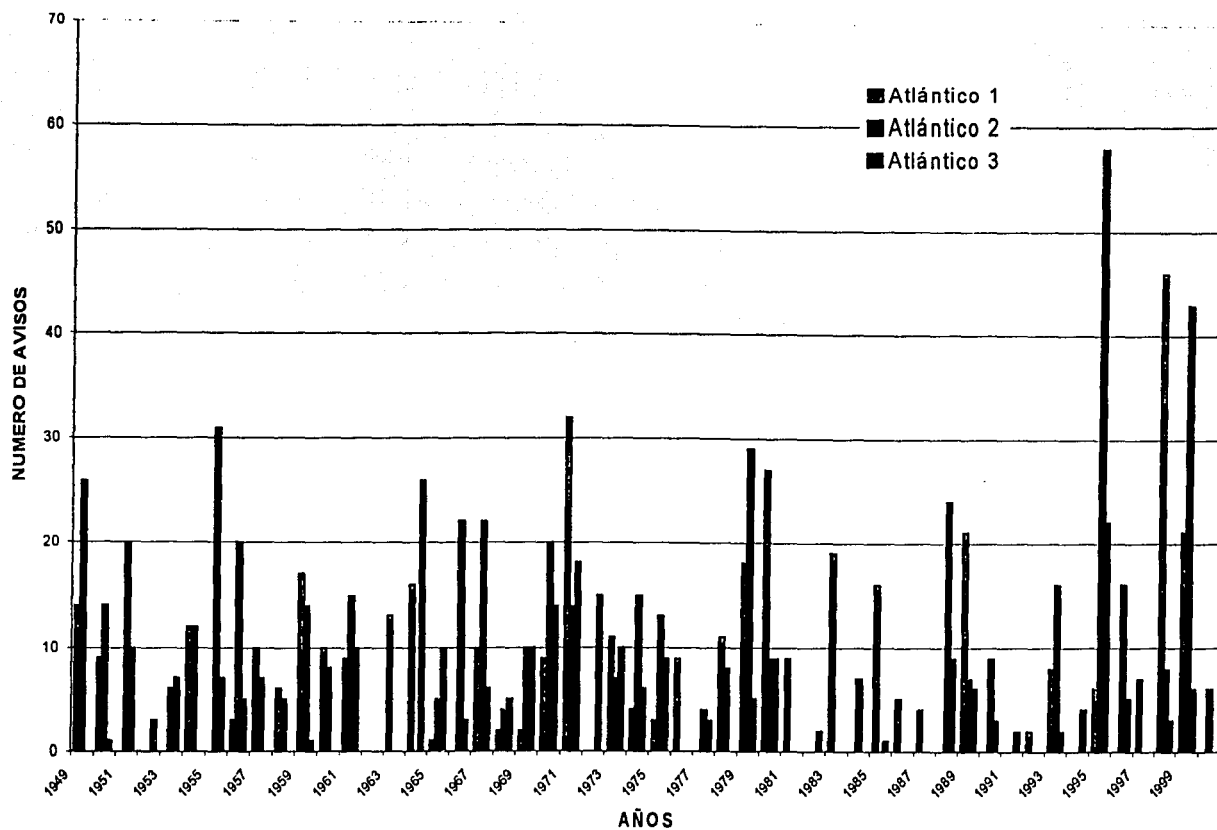
En las figuras A11 y A12 se puede observar el total de horas acumuladas para cada categoría en el intervalo de tiempo.

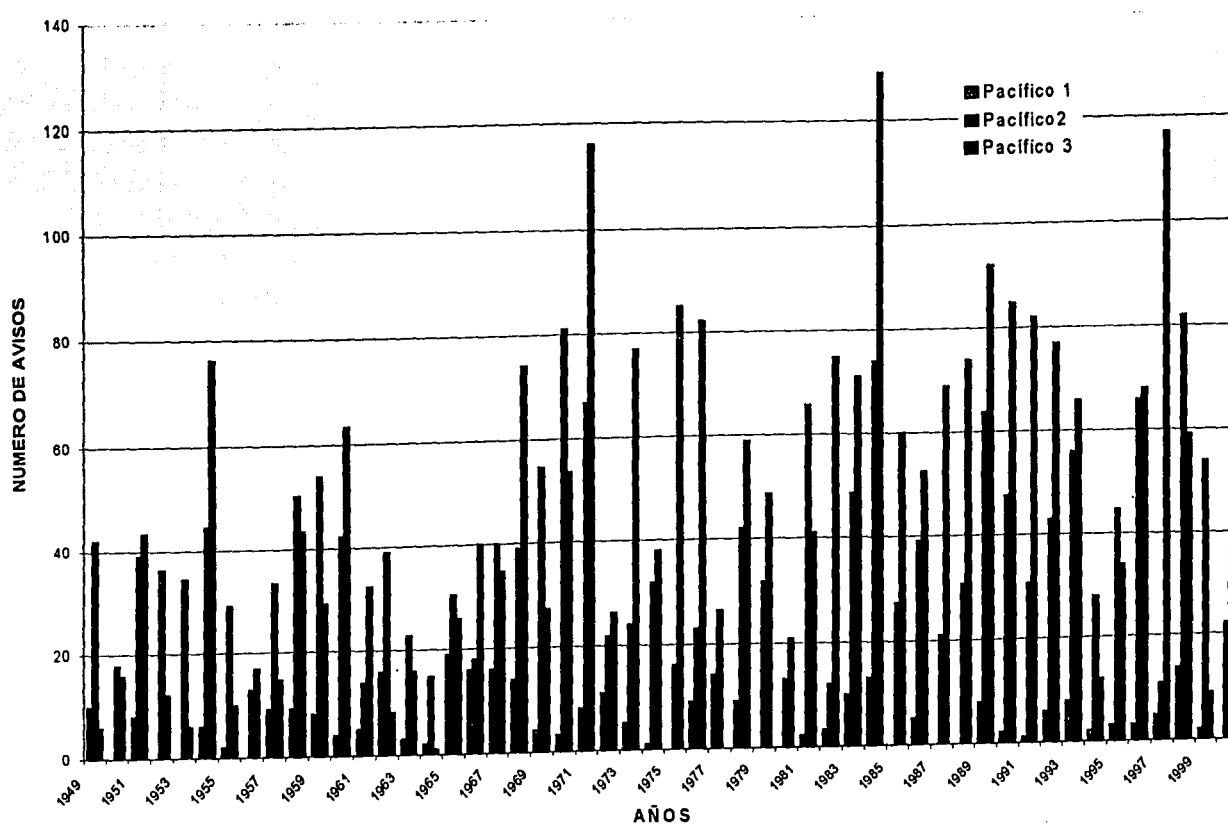


A1. Número de avisos registrados para el Atlántico por categoría para el período de 1949 a 2000.

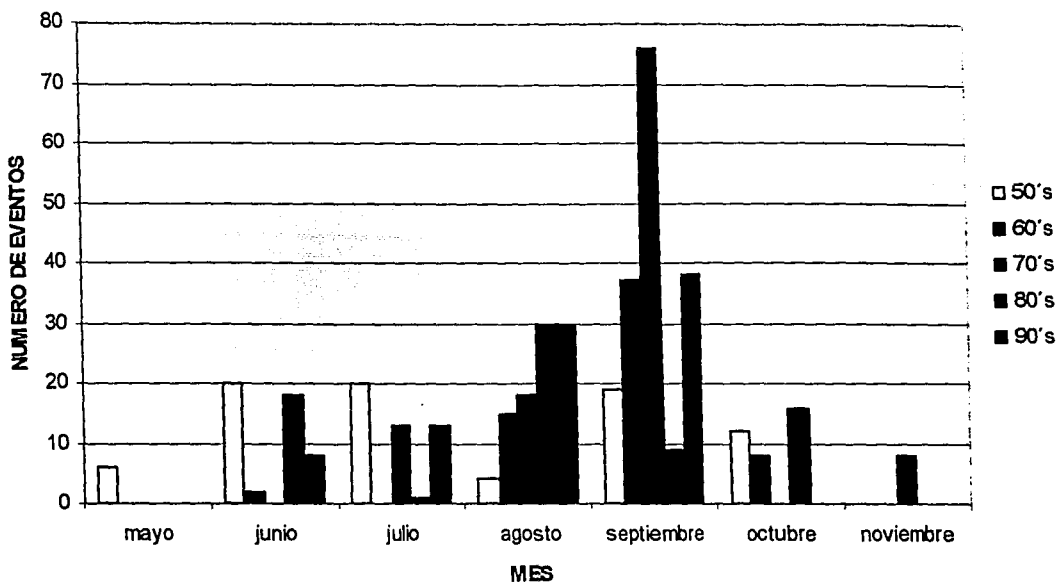


A2. Número de avisos registrados para el Pacífico por categoría para el período de 1949 a 2000.

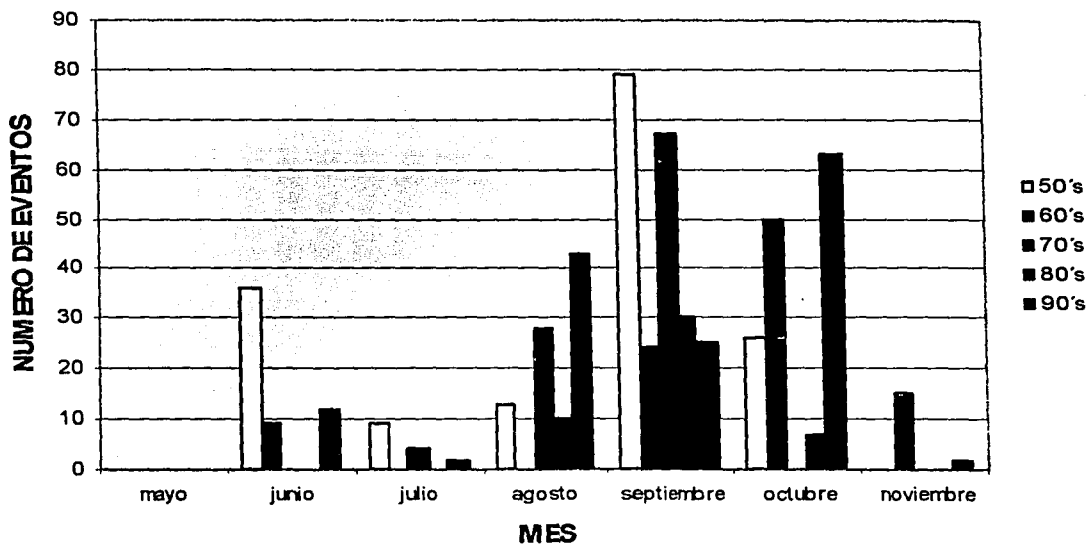




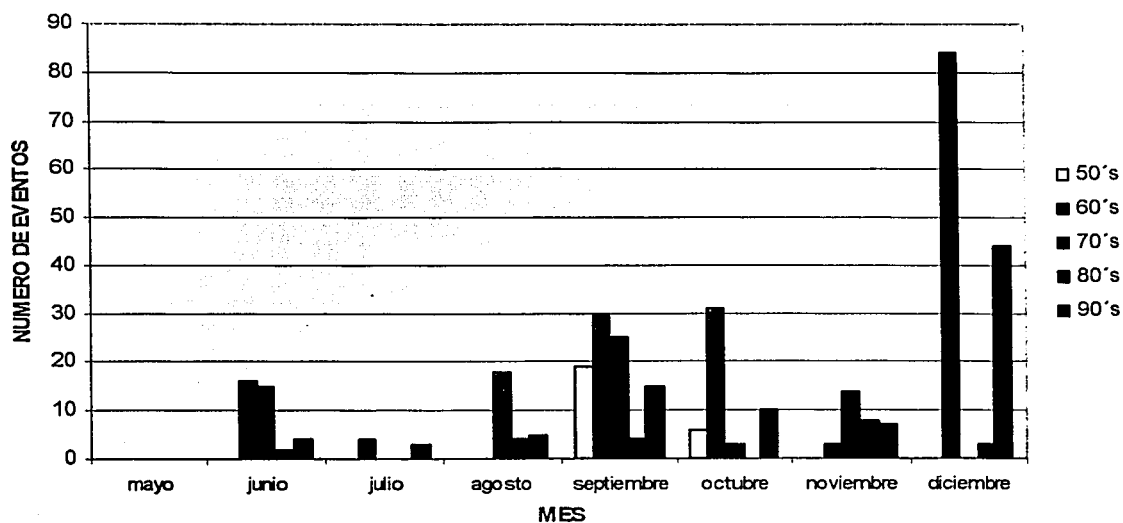
A4. Número de avisos registrados para el Pacífico para cada una de las tres zonas.



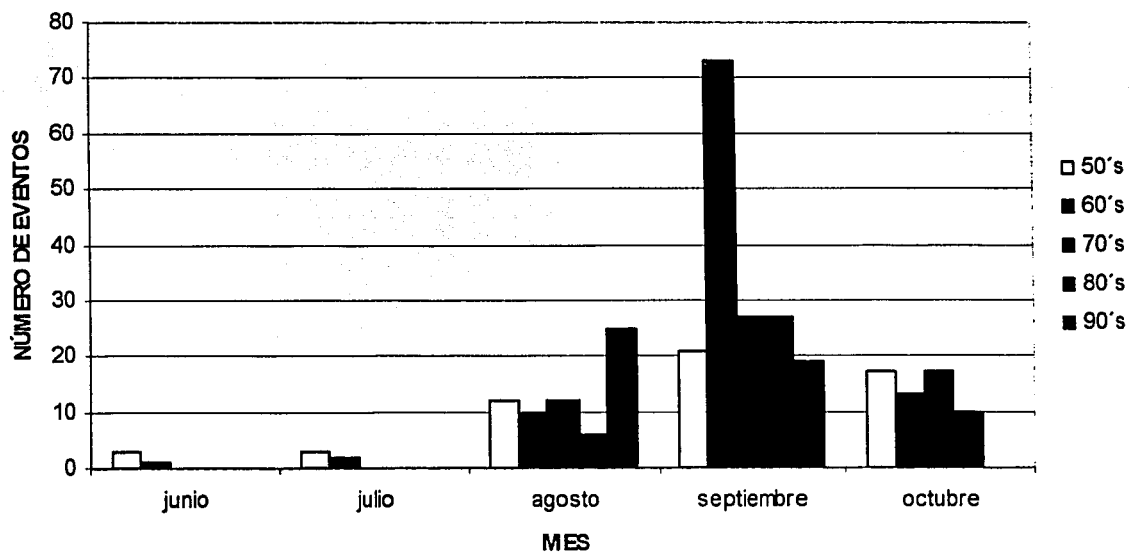
A5. Número de eventos registrados por mes para cada década para la zona del Atlántico 1.



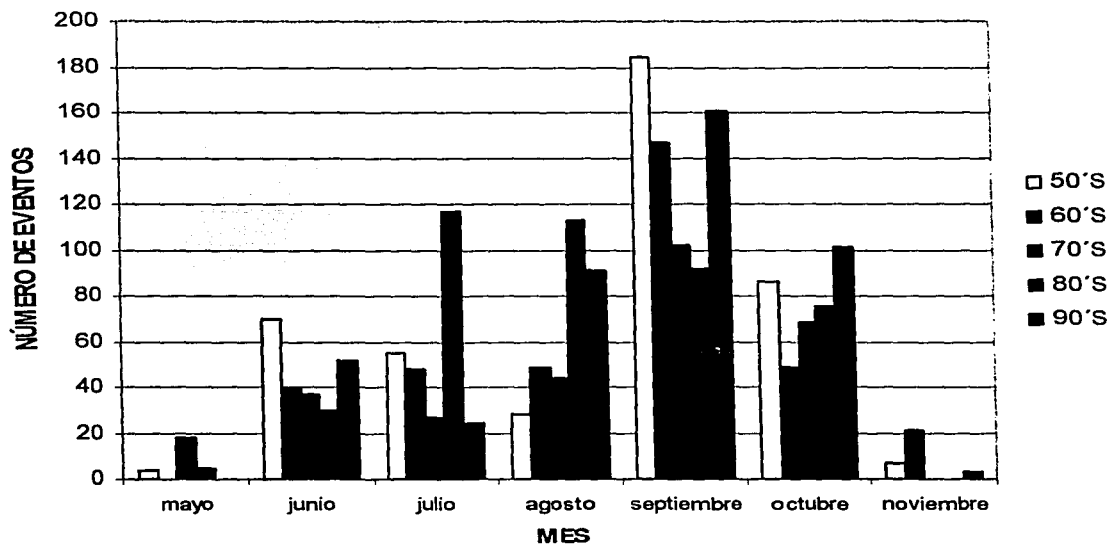
A6. Número de eventos registrados por mes para cada década para la zona del Atlántico 2.



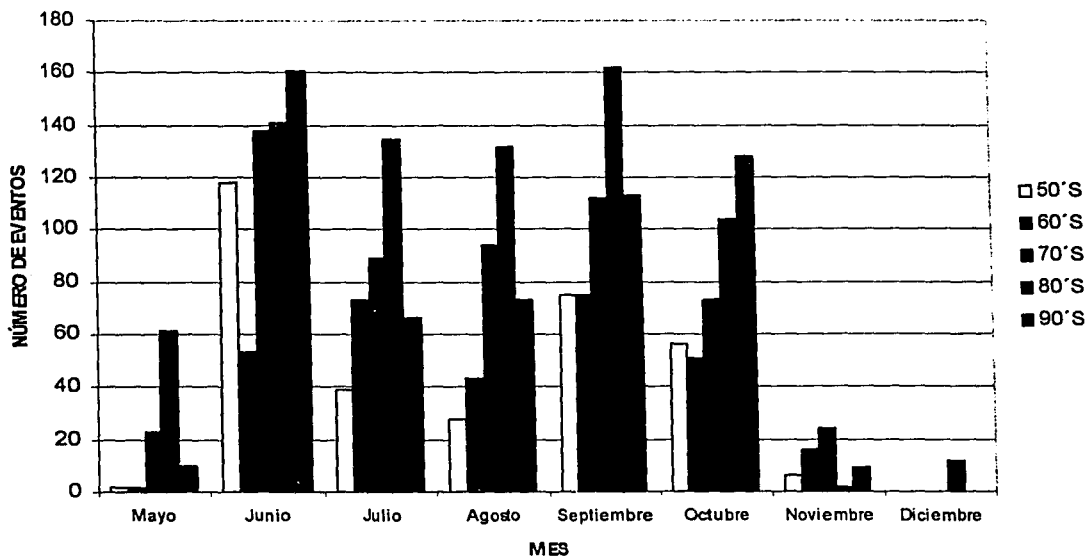
**A7. Número de eventos registrados por mes para cada década para la zona del Atlántico 3.**



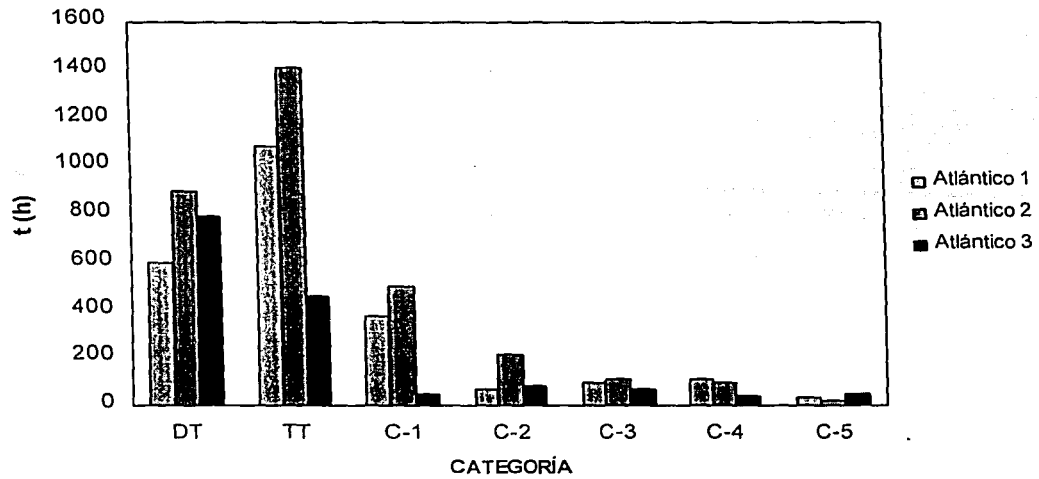
**A8. Número de eventos registrados por mes para cada década para la zona Pacífico 1.**



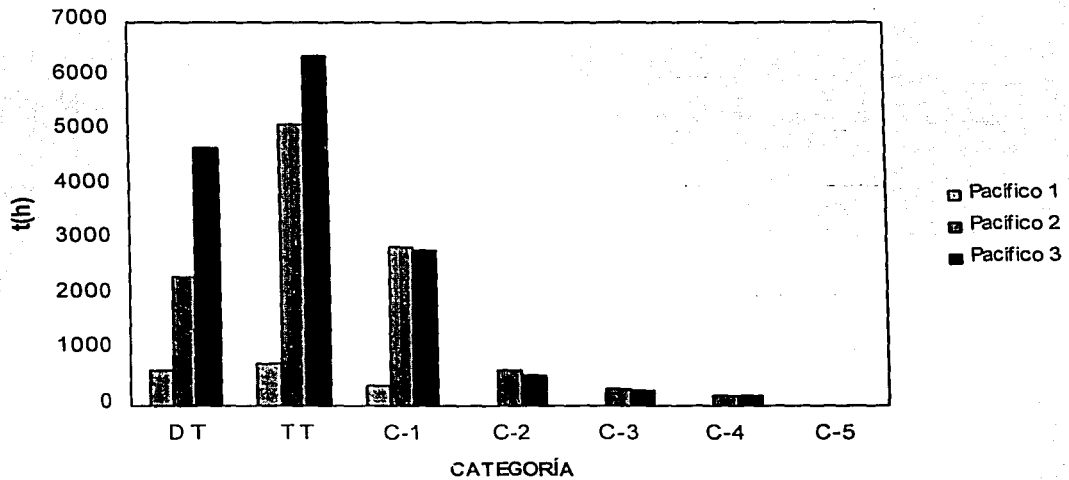
**A9.** Número de eventos registrados por mes para cada década para la zona Pacífico 2.



**A10.** Número de eventos registrados por mes para cada década para la zona Pacífico 3.



A11. Total de horas acumuladas por categoría para la zona del Atlántico.



A12. Total de horas acumuladas por categoría para la zona del Pacífico.