

1a. edición, julio 1997

◉ SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN

Abraham González No. 48,  
Col. Juárez, Deleg. Cuauhtémoc,  
C.P. 06699, México, D.F.

◉ CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE  
DESASTRES

Av. Delfín Madrigal N° 665,  
Col. Pedregal de Santo Domingo,  
Deleg. Coyoacán, C.P. 04360, México, D.F.  
Teléfonos: 6 06 98 37, 6 06 97 39, 6 06 91 56.  
Fax: 6 06 16 08

◉ Autores: Óscar Arturo Fuentes Mariles y  
María Teresa Vázquez Conde

Derechos reservados conforme a la ley

IMPRESO EN MEXICO. *PRINTED IN MEXICO*

Distribución Nacional e Internacional: Centro Nacional de  
Prevención de Desastres

EL CONTENIDO DE ESTE DOCUMENTO ES  
EXCLUSIVA RESPONSABILIDAD DE LOS AUTORES

SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN

Lic. Emilio Chuayffet Chemor  
Secretario de Gobernación

Lic. Ricardo García Villalobos Gálvez  
Subsecretario de Protección Civil y de Prevención  
y Readaptación Social

CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE  
DESASTRES

Dr. Roberto Meli  
Director General

Dr. Servando de la Cruz Reyna  
Coordinador de Investigación

M. en I. Roberto Quaas  
Coordinador de Instrumentación

Lic. Ricardo Cícero Betancourt  
Coordinador de Difusión

**SISTEMA NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL  
CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES**

**PROBABILIDAD DE PRESENTACIÓN DE CICLONES  
TROPICALES EN MÉXICO**

**ÓSCAR ARTURO FUENTES MARILES  
MARÍA TERESA VÁZQUEZ CONDE**

**COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN  
ÁREA DE RIESGOS HIDROMETEOROLÓGICOS  
JULIO 1997**

# CUADERNOS DE INVESTIGACION

## P R E S E N T A C I O N

---

La Coordinación de Investigación del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) realiza estudios sobre las características de los fenómenos naturales y de las actividades humanas que son fuentes potenciales de desastres, así como sobre las técnicas y medidas que conducen a la reducción de las consecuencias de dichos fenómenos.

Las actividades enfocan la problemática de los Riesgos Geológicos (Sismos y Volcanes), de los Riesgos Hidrometeorológicos (Inundaciones, Huracanes, Sequías, Erosión) y de los Riesgos Químicos (Incendios, Explosiones, Contaminación por Desechos Industriales).

Los resultados de los estudios se publican en Informes Técnicos que se distribuyen a las instituciones y los especialistas relacionados con cada tema específico.

En adición a dichos Informes Técnicos de carácter muy especializado, el CENAPRED ha emprendido la publicación de esta serie, llamada CUADERNOS DE INVESTIGACION, con el fin de dar a conocer a un público más amplio aquellos estudios que se consideran de interés más general o que contienen información que conviene quede publicada en una edición más formal que la de los Informes Técnicos.

Los catálogos de Informes Técnicos y de Cuadernos de Investigación, así como las publicaciones específicas pueden obtenerse solicitándolos por escrito a la Coordinación de Investigación del CENAPRED, o pueden consultarse directamente en su Unidad de Información.

# **PROBABILIDAD DE PRESENTACIÓN DE CICLONES TROPICALES EN MÉXICO**

## **RESUMEN**

Con base en la información estadística de ciclones se planteó un método que evalúa la probabilidad de ocurrencia de ciclones en el Golfo de México, mar Caribe y Océano Pacífico cerca de la República Mexicana.

Se elaboró un mapa de México donde se señala la probabilidad anual de que pase un ciclón de determinada magnitud. Ello puede servir para calcular en forma aproximada la probabilidad de que ocurran ciertos valores de marea de tormenta, viento, oleaje y lluvia asociados a la intensidad del ciclón.

## **ABSTRACT**

A method to estimate the probability of cyclone occurrence in the areas of the Gulf of Mexico, the Caribbean Sea and the Pacific Ocean, in the neighborhood of Mexico, is developed from a statistical data base.

The results are summarized in a map showing the annual probability of a cyclone with a given magnitude occurring in a chosen region. This approach may be helpful in the assessment of the probability of occurrence of storm surge, wind, waves and rain, related to the cyclone intensity.

## **CONTENIDO**

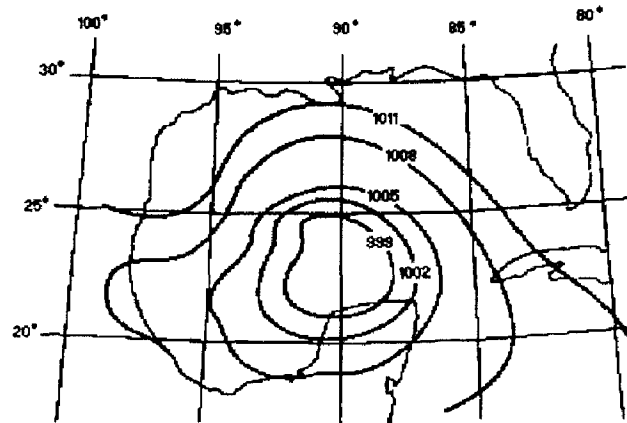
|                                                                                                       |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Resumen</b>                                                                                        | <b>ii</b> |
| <b>Abstract</b>                                                                                       | <b>ii</b> |
| <b>Capítulo 1 Introducción</b>                                                                        | <b>1</b>  |
| <b>Capítulo 2 Información básica</b>                                                                  | <b>5</b>  |
| 2.1 Fuentes de información                                                                            | 5         |
| 2.2 Tipos de datos                                                                                    | 7         |
| 2.3 Procedimiento para determinar el número de ciclones tropicales por año en zonas de interés        | 9         |
| <b>Capítulo 3 Análisis estadístico de la información</b>                                              | <b>13</b> |
| <b>Capítulo 4 Análisis de probabilidad</b>                                                            | <b>19</b> |
| 4.1 Cálculo de probabilidad                                                                           | 19        |
| 4.1.1 Probabilidad de que en un año se presente un ciclón en una zona.                                | 19        |
| 4.1.2 Probabilidad de que un ciclón tenga determinada presión central.                                | 20        |
| 4.1.3 Probabilidad de que en un año se presente un ciclón en una zona con determinada presión central | 21        |
| 4.2 Periodo de retorno                                                                                | 22        |
| <b>Capítulo 5 Probabilidades de presentación de ciclones cerca de México</b>                          | <b>23</b> |
| 5.1 Probabilidad de que en un año se presente un ciclón cerca de México                               | 23        |
| 5.2 Probabilidad de ocurrencia de un ciclón de cierta intensidad cerca de México                      | 23        |

|                            |                                                      |    |
|----------------------------|------------------------------------------------------|----|
| 5.3                        | Probabilidad de tormentas tropicales cerca de México | 24 |
| 5.4                        | Probabilidad de huracanes                            | 31 |
| 5.5                        | Ejemplos                                             | 31 |
| 5.5.1                      | Ejemplo 1                                            | 31 |
| 5.5.2                      | Ejemplo 2                                            | 35 |
| Capítulo 6                 | Conclusiones                                         | 37 |
| Bibliografía y referencias |                                                      | 38 |

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

El ciclón es una perturbación atmosférica de área casi circular con presiones que disminuyen hacia su interior (figura 1.1). Consiste en una gran masa de aire con vientos fuertes que giran en forma de remolino alrededor de un centro de baja presión. Esta perturbación, que suele trasladarse con velocidades de 10 a 40 km/h, transporta humedad.



**Figura 1.1 Líneas Isobaras (valores en milibares) del Ciclón Carla, 8 sep. 1961.**

Los vientos alisios, la alta temperatura del mar y la rotación de la Tierra provocan que el movimiento giratorio de los vientos del ciclón en el hemisferio norte sea contrario al sentido de las manecillas del reloj (figura 1.2).

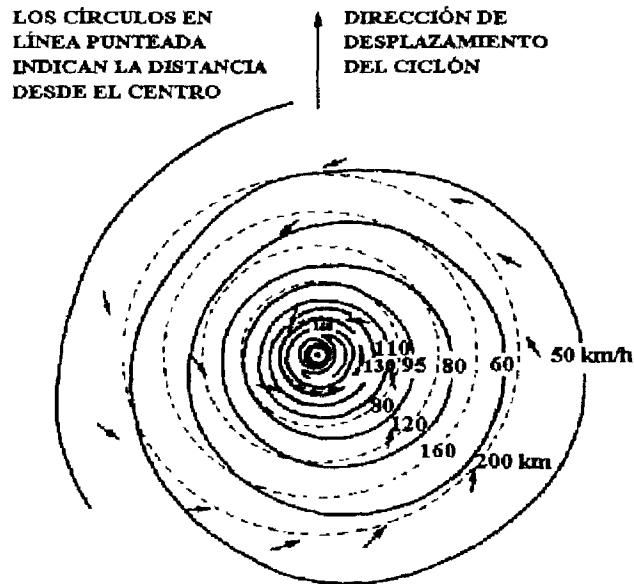
Los ciclones tropicales cambian su estructura desde una presión pequeña en la superficie del mar hasta una presión grande en la zona alta. Esto propicia la formación de nubes que producen lluvias y tormentas eléctricas.

Los ciclones del hemisferio norte se generan en los océanos Atlántico y Pacífico entre los 5° y 15° de latitud y se desplazan hacia el oeste (figura 1.3). Se presentan durante la época cálida, cuando las temperaturas del mar son del orden de 26°C. El huracán es la etapa más intensa de un ciclón.

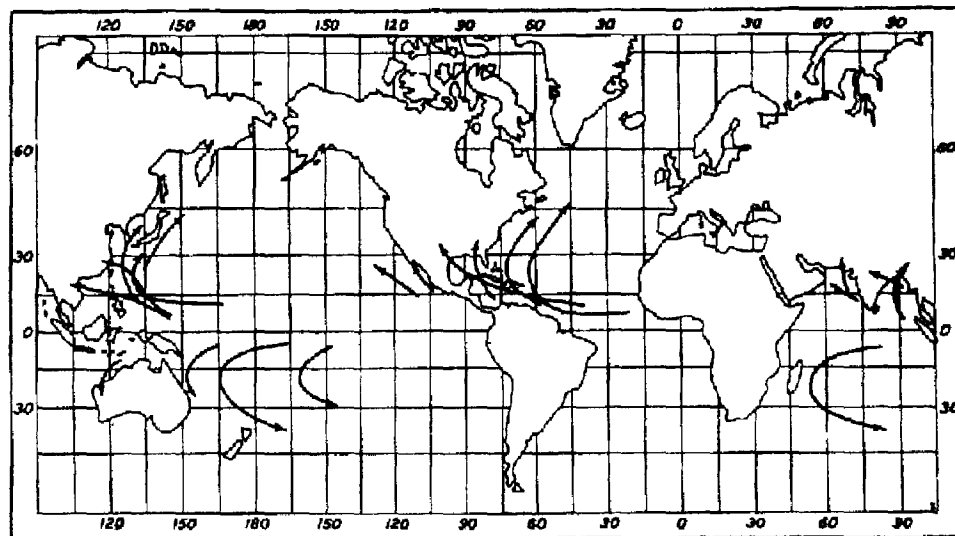
Las regiones donde se originan los ciclones se les conoce como zonas ciclogénicas. Los que llegan a México provienen de la sonda de Campeche, Golfo de Tehuantepec, Caribe (alrededor de los 13 grados latitud norte y 65 grados longitud oeste) y sur de las islas Cabo Verde (cerca de los 12 grados latitud norte y 57 grados longitud oeste).

La energía del ciclón aumenta conforme es mayor la diferencia entre la presión en su centro con respecto a la normal de la periferia. Como ésta es del orden de 1013 milibares (101.3

kPa, 29.92 pulgadas de mercurio), mientras más reducida sea la central, mayor será su intensidad. Las presiones centrales más bajas registradas en el mundo son del orden de 900 milibares (en 1969 el ciclón Camille presentó una presión central de 901 milibares).



**Figura 1.2** Vientos cerca del mar en un ciclón en el hemisferio norte



**Figura 1.3** Trayectorias promedio de desplazamiento de ciclones

De acuerdo con la presión central, los ciclones se clasifican en depresión tropical (1008 a 1005 mb, velocidad del máximo viento menor a 63 km/h), tormenta tropical (1004 a 985 mb, velocidad del máximo viento entre 63 y 118 km/h) y huracán (menor a 984 mb, velocidad del máximo viento mayor a 119 km/h). En la tabla 1.1 se indica la clasificación de ciclones para la Región IV de la Organización Meteorológica Mundial que incluye a Norteamérica, Centroamérica y el Caribe.

La capacidad destructiva de un ciclón se manifiesta principalmente en cuatro aspectos: viento, lluvia, marea de tormenta y oleaje.

El objetivo de este trabajo es estimar la probabilidad de que se presente un ciclón de cierta intensidad en algunas zonas de los océanos Pacífico y Atlántico cercanas a la República Mexicana. Las zonas están formadas por dos meridianos separados a  $2^\circ$  y dos paralelos espaciados también a  $2^\circ$ . Ellas comprenden desde la longitud (oeste)  $84^\circ$  hasta la  $124^\circ$  y desde la latitud (norte)  $10^\circ$  hasta la  $34^\circ$ .

Por la calidad de la información reportada de los ciclones, en este trabajo se considera principalmente a los ciclones que han ocurrido en los últimos 36 años para los océanos Pacífico y Atlántico.

**Tabla 1.1 Escala de daño potencial de Saffir-Simpson**

| <b>CATEGORIA</b>      | <b>PRESION CENTRAL (mb)</b> | <b>VIENTOS (km/h)</b> | <b>FORMENTA DE MAREA (m)</b> | <b>CARACTERÍSTICAS</b>        |
|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Perturbación tropical | 1008.1 a 1010               |                       |                              | Ligera circulación de vientos |
| Depresión tropical    | 1004.1 a 1008               | <62                   |                              | Localmente destructivo        |
| Tormenta tropical     | 985.1 a 1004                | 62.1 a 118            | 1.1                          | Tiene efectos destructivos    |
| Huracán categoría 1   | 980.1 a 985                 | 118.1 a 154           | 1.5                          | Altamente destructivo         |
| Huracán categoría 2   | 965.1 a 980                 | 154.1 a 178           | 2.0 a 2.5                    | Altamente destructivo         |
| Huracán categoría 3   | 945.1 a 965                 | 178.1 a 210           | 2.5 a 4.0                    | Extremadamente destructivo    |
| Huracán categoría 4   | 920.1 a 945                 | 210.1 a 250           | 4.0 a 5.5                    | Extremadamente destructivo    |
| Huracán categoría 5   | < 920                       | > 250                 | > 5.5                        | El más destructivo            |

En el capítulo 2 se describe el tipo de información y la forma en que se reporta y que sirvió de base para este trabajo.

En el capítulo 3 se presenta el proceso estadístico que se aplicó a los datos de los ciclones.

El capítulo 4 se refiere al modo en que se establece la probabilidad de ocurrencia de un ciclón de cierta intensidad en determinadas zonas de los océanos Pacífico y Atlántico.

En el capítulo 5 se incluye el cálculo de las probabilidades de que se presenten ciclones en las cercanías de México. Ello se realiza a partir del análisis estadístico de los datos y de los discutidos en el capítulo 4.

Finalmente en el capítulo 6 se presentan las conclusiones sobre el trabajo que se llevó a cabo.

## **CAPÍTULO 2**

### **INFORMACIÓN BÁSICA**

La observación de los huracanes se hace por medio de los satélites especializados en meteorología y por medio de radares. En México, el Servicio Meteorológico Nacional se encarga de captar, procesar e interpretar datos sobre el surgimiento, trayectoria de desplazamiento, avance y otras características de los huracanes con la finalidad de mantener informados a los centros de prevención y autoridades, así como a la población.

Se ha observado que en México, entre los meses de mayo a noviembre, se presentan en promedio 23 ciclones con vientos mayores a 63 km/h (figura 2.1). De los cuales, 14 ocurren en el océano Pacífico y 9 en el Golfo de México y el mar Caribe. De estos inciden cada año sobre territorio nacional o se acercan a menos de 100 km, el 15% de los que ocurren en el océano Pacífico y el 26% de los que se presentan en el Atlántico. Se estima que alrededor de 4 ciclones arriban anualmente a las costas de México.

#### **2.1 FUENTES DE INFORMACIÓN**

Se dispuso de información de los ciclones tropicales que se han presentado en el océano Pacífico y en el Atlántico, desde la más reciente hasta las primeras trayectorias y mediciones de viento y presión central.

Los datos obtenidos fueron proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Los registros fueron recabados de fuentes como el National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), la Organización Mundial de Meteorología (OMM) y el Instituto Cubano del Libro. La información proporcionada se incluye en la tabla 2.1 .

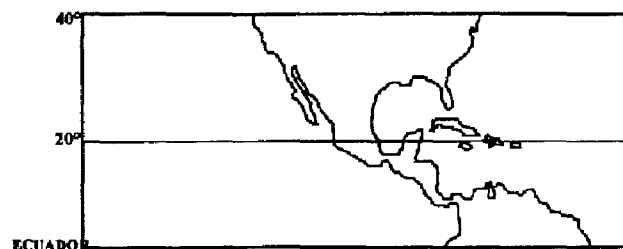
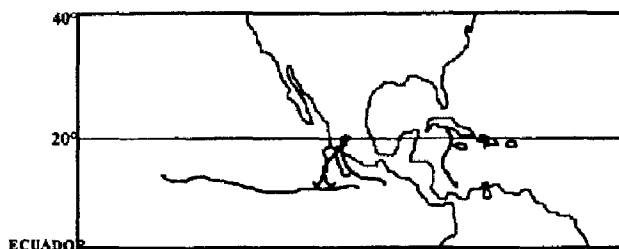
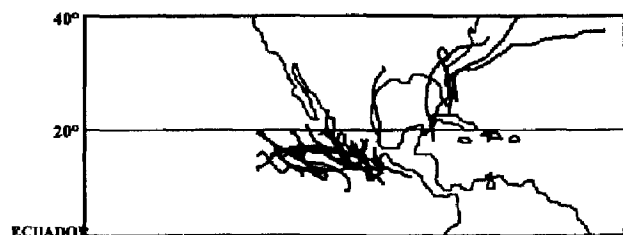
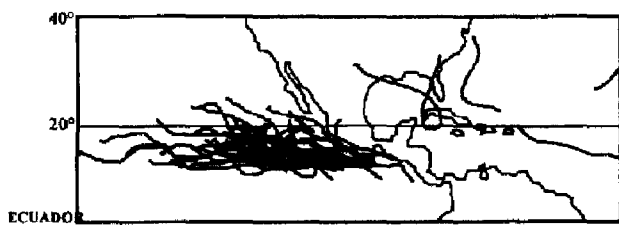
De acuerdo con el tipo de datos disponibles en las fuentes de información y con la introducción de instrumentos más precisos para medir los diversos parámetros de un ciclón (velocidad del viento y presión central), se prefirieron los datos posteriores a 1960.

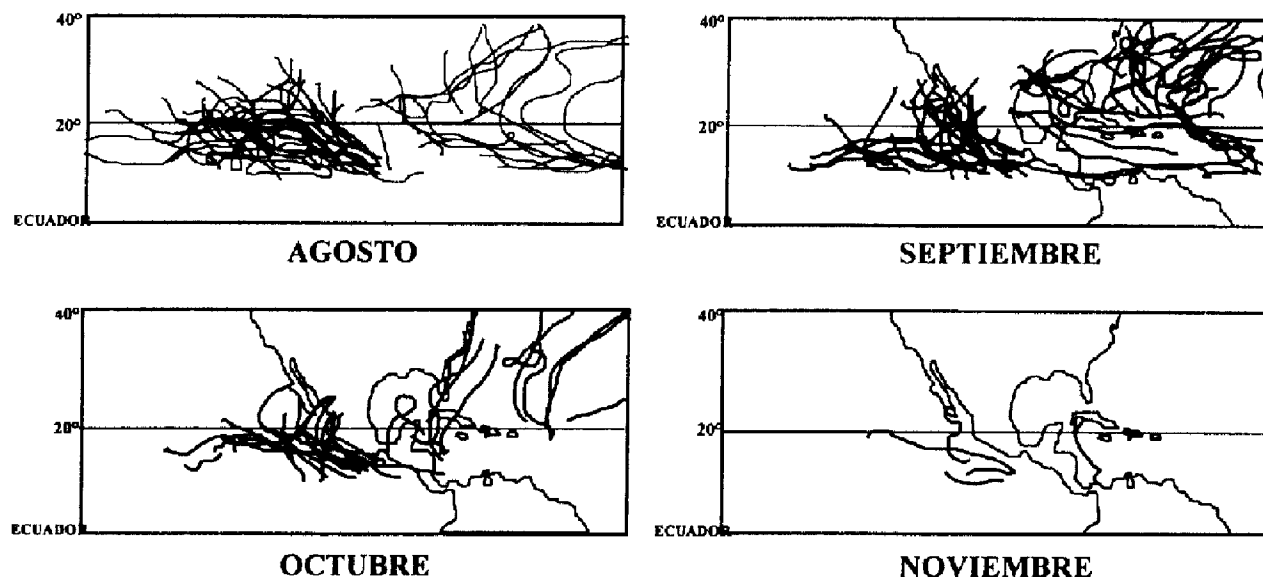
La Organización Mundial de Meteorología (OMM) fue la principal fuente empleada, ya que se contó con registros de presión y velocidad de viento para ciclones del océano Pacífico y del Atlántico.

Las trayectorias de los ciclones no coincidieron en todas las fuentes de información, especialmente de aquellas que se presentaron a principios de este siglo o a finales del siglo pasado. Esto se debe a que los primeros datos se recabaron a partir de las observaciones de los marineros que enfrentaban a los ciclones en el mar. En la figura 2.1 se presenta una muestra de las trayectorias de los ciclones que ocurren cada mes en un lapso de 10 años.

**Tabla 2.1 Fuentes de información**

| FUENTE | PERIODO   | OCEANO    | PROCESAMIENTO                                                                                                                                                                                                                                       |
|--------|-----------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.NOAA | 1871-1994 | Atlántico | Referencia 1. Gráfico de las trayectorias de los ciclones                                                                                                                                                                                           |
| 2.NOAA | 1886-1992 | Atlántico | Diskette. Archivos en código ASCII. Tablas con datos de velocidad del viento y coordenadas (latitud, longitud)                                                                                                                                      |
| 3.ICL  | 1919-1969 | Atlántico | Referencia 2. Gráfico de las trayectorias de los ciclones                                                                                                                                                                                           |
| 4.OMM  | 1946-1995 | Pacífico  | Diskette. Archivos en Word: Tablas con datos de coordenadas (latitud, longitud), presión y velocidad para el periodo 1946-1995.<br>Archivos en Power Point: Gráficos de las trayectorias de los ciclones que se presentaron en el periodo 1985-1995 |
|        | 1901-1995 | Atlántico | Diskette. Archivos en Word: Tablas con datos de coordenadas (latitud, longitud), presión y velocidad para el periodo 1901-1995.<br>Archivos en Power Point: Gráficos de las trayectorias de los ciclones que se presentaron en el periodo 1985-1995 |

**ABRIL****MAYO****JUNIO****JULIO****Figura 2.1 Trayectorias ciclónicas (período de 1968 a 1977)**



**Figura 2.1 Trayectorias ciclónicas (período de 1968 a 1977).  
(continuación)**

Por otro lado, como se puede observar en la tabla 2.1 que se tiene mayor cantidad de información en el océano Atlántico. Ello obedece a que los ciclones de este océano son los que principalmente afectan a los Estados Unidos. En cambio, para México, los del océano Pacífico tienen mayor incidencia. Como para los Estados Unidos hubo interés en los ciclones que arriban a las islas de Hawai, también se contó con mediciones de ciclones en el océano Pacífico.

## 2.2 TIPOS DE DATOS

Los datos proporcionados por la Organización Mundial de Meteorología (OMM) aparecen en archivos de procesador de textos Word por cada año (desde 1946 hasta 1995 en el Pacífico y desde 1901 hasta 1995 en el Golfo de México y mar Caribe). Se menciona el número de ciclones que se presentaron ese año y para cada ciclón se consignan (desde su formación hasta su disipación) la posición, el tiempo, las coordenadas, la velocidad máxima de viento y la presión central. Como ejemplo del tipo de información reportada, en la tabla 2.2 se muestra la primera hoja del archivo ATL8 correspondiente al año 1988.

*12 storms are displayed of the 12 storms which occurred during 1988*

***Position Data for "ALBERTO"***

| <b><i>Date</i></b> | <b><i>Time(GMT)</i></b> | <b><i>Lat (° N)</i></b> | <b><i>Long (° W)</i></b> | <b><i>Wind(knots)</i></b> | <b><i>CP(mb)</i></b> |
|--------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------|
| 8/5/1988           | 18:00                   | 32.0                    | 77.5                     | 20                        | 1015                 |
| 8/6/1988           | 00:00                   | 32.8                    | 76.2                     | 20                        | 1014                 |
| 8/6/1988           | 06:00                   | 34.0                    | 75.2                     | 20                        | 1013                 |
| 8/6/1988           | 12:00                   | 35.2                    | 74.6                     | 25                        | 1012                 |
| 8/6/1988           | 18:00                   | 37.0                    | 73.5                     | 25                        | 1011                 |
| 8/7/1988           | 00:00                   | 38.7                    | 72.4                     | 25                        | 1009                 |
| 8/7/1988           | 06:00                   | 40.0                    | 70.8                     | 30                        | 1006                 |
| 8/7/1988           | 12:00                   | 41.5                    | 69.0                     | 35                        | 1002                 |
| 8/7/1988           | 18:00                   | 43.0                    | 67.5                     | 35                        | 1002                 |
| 8/8/1988           | 00:00                   | 45.0                    | 65.5                     | 35                        | 1004                 |
| 8/8/1988           | 06:00                   | 47.0                    | 63.0                     | 35                        | 1006                 |
| 8/8/1988           | 12:00                   | 49.0                    | 60.0                     | 30                        | 1008                 |
| 8/8/1988           | 18:00                   | 51.0                    | 56.0                     | 25                        | 1010                 |

\*

***Position Data for "BERYL"***

| <b><i>Date</i></b> | <b><i>Time(GMT)</i></b> | <b><i>Lat (° N)</i></b> | <b><i>Long (° W)</i></b> | <b><i>Wind(knots)</i></b> | <b><i>CP (mb)</i></b> |
|--------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|
| 8/8/1988           | 00:00                   | 30.4                    | 90.3                     | 25                        | 1010                  |
| 8/8/1988           | 06:00                   | 29.7                    | 89.7                     | 30                        | 1009                  |
| 8/8/1988           | 12:00                   | 29.7                    | 89.4                     | 35                        | 1007                  |
| 8/8/1988           | 18:00                   | 29.4                    | 89.2                     | 40                        | 1005                  |
| 8/9/1988           | 00:00                   | 29.3                    | 89.1                     | 45                        | 1002                  |
| 8/9/1988           | 06:00                   | 29.6                    | 89.5                     | 45                        | 1001                  |
| 8/9/1988           | 12:00                   | 30.1                    | 90.4                     | 45                        | 1002                  |
| 8/9/1988           | 18:00                   | 30.1                    | 90.9                     | 40                        | 1005                  |
| 8/10/1988          | 00:00                   | 30.3                    | 91.6                     | 30                        | 1006                  |
| 8/10/1988          | 06:00                   | 30.7                    | 92.2                     | 30                        | 1007                  |
| 8/10/1988          | 12:00                   | 31.2                    | 92.6                     | 25                        | 1008                  |
| 8/10/1988          | 18:00                   | 31.7                    | 93.2                     | 20                        | 1011                  |

\*

**Tabla 2.2 Forma en que se presentan los datos en el archivo ATL8.**

También se contó con información (para el periodo comprendido entre 1985 y 1995) de la OMM relativa a las trayectorias de los ciclones en archivos del paquete de cómputo Power Point. Como ejemplo, el contenido de uno de estos archivos se muestra en la figura 2.2.

### **2.3 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR EL NÚMERO DE CICLONES TROPICALES POR AÑO EN ZONAS DE INTERÉS**

Para determinar el número de ciclones por año que ocurren en ambas costas de la República Mexicana, se analizaron los archivos Word para el periodo de 1960 a 1995 (tabla 2.1) y se identificó para cada ciclón, de acuerdo con la velocidad del viento según su posición, si el fenómeno meteorológico se encontraba en etapa de tormenta tropical o de huracán; para esto último se utilizó la escala Saffir-Simpson (tabla 1.1).

Se ubicó cada ciclón en su etapa de tormenta o huracán, según sus coordenadas, en las áreas de interés descritas en el Capítulo 1. Posteriormente se contó el número de veces que se presentaron huracanes y tormentas tropicales en cada cuadrícula de  $2^{\circ}$  de longitud por  $2^{\circ}$  de latitud. En la figura 2.3 se muestra el número total de huracanes y de tormentas tropicales que se presentaron en cada área de interés. En la parte superior de cada celda se muestra el número total de huracanes, en la parte inferior aparece el número total de tormentas tropicales y en la parte central del lado izquierdo el número total de eventos ciclónicos en el periodo de 1960 a 1995.

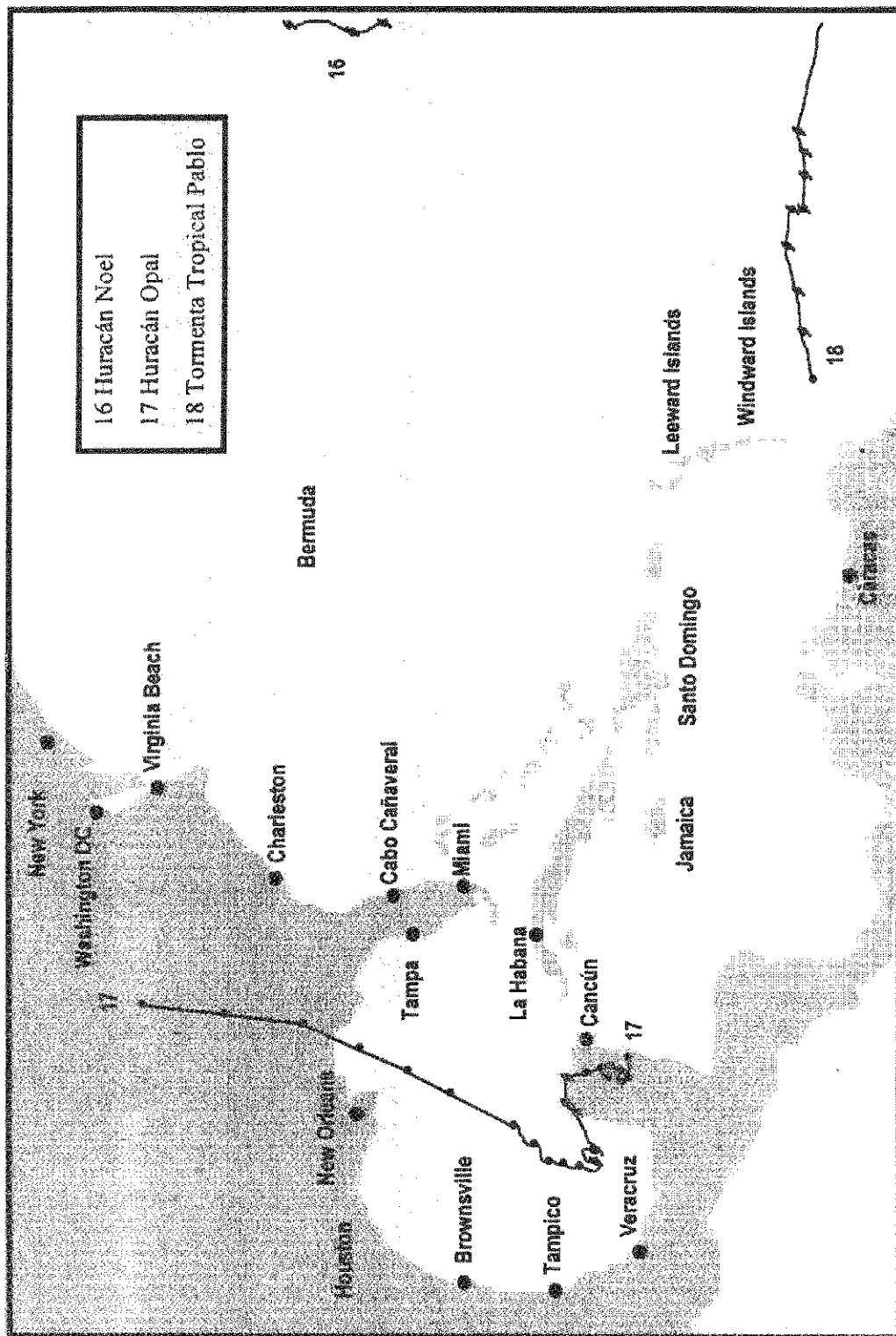


Fig. 2.2 Ciclones Tropicales del Atlántico en 1995.

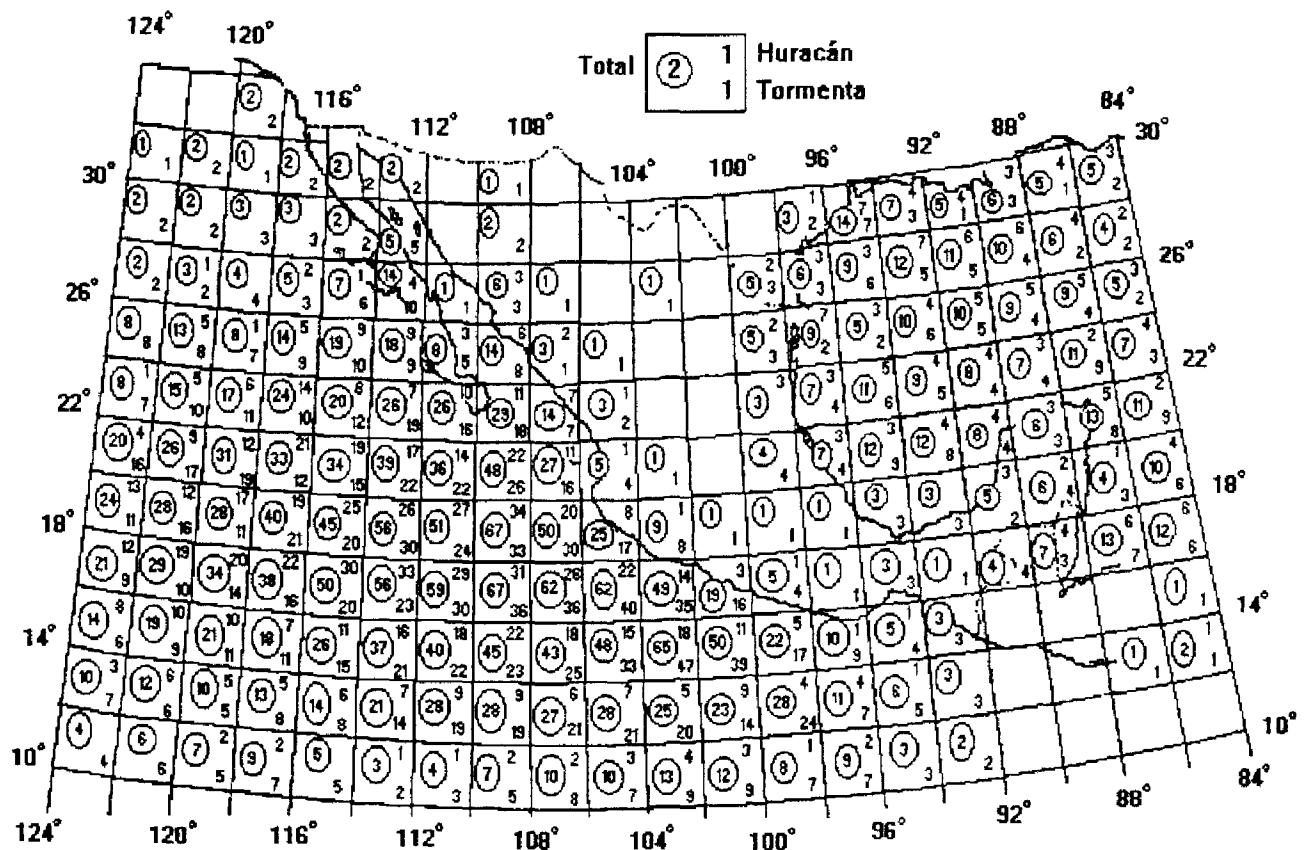


Figura 2.3 Número de ciclones que se han presentado de 1960 a 1995.

## CAPÍTULO 3

### ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA INFORMACIÓN

Los datos disponibles de presión central de los ciclones del océano Pacífico, Golfo de México y Mar Caribe permitieron manejar distribuciones de probabilidad.

Se ajustaron los parámetros de las funciones de probabilidad Normal, Lognormal, Gumbel, Exponencial, Gamma y Doble-Gumbel a las funciones de distribución de frecuencia de los datos de presión central. Para llevar a cabo esta tarea se empleó el programa AX.exe (Jiménez, 1992).

Las ecuaciones de las funciones empleadas y sus parámetros aparecen en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Funciones de distribución de probabilidad**

| NOMBRE       | FUNCION                                                                                                                                                                                                                            | PARAMETROS                                |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Normal       | $F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{t'^2}{2}} dt'$ $\text{donde } t = \frac{x - \alpha}{\beta}$                                                                                                               | $\alpha, \beta$                           |
| Lognormal    | $F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{t'^2}{2}} dt'$ $\text{donde } t = \frac{\ln(x - \delta) - \alpha}{\beta}$                                                                                                 | $\alpha, \beta, \delta$                   |
| Gumbel       | $F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}}$                                                                                                                                                                                                 | $\alpha, \beta$                           |
| Exponencial  | $F(x) = 1 - e^{-\frac{x-\beta}{\alpha}}$                                                                                                                                                                                           | $\alpha, \beta$                           |
| Gamma        | $F(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \int_{\delta}^x \left(\frac{x-\delta}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\frac{x-\delta}{\alpha}} dx$ <p style="text-align: center;">donde <math>\Gamma</math> es la función matemática Gamma</p> | $\alpha, \beta, \delta$                   |
| Doble-Gumbel | $F(x) = p e^{-e^{-\alpha_1(x-\beta_1)}} + (1-p) e^{-e^{-\alpha_2(x-\beta_2)}}$                                                                                                                                                     | $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, p$ |

Las presiones centrales mayores a 1004 mb no fueron consideradas porque no corresponden a tormentas tropicales o huracanes.

Dado que un ciclón es más intenso conforme es más pequeña la presión central, interesaban los valores mínimos. Para emplear el programa AX.exe los datos se multiplicaron por -1 y se les sumó 1004. De esta manera se fijó en 1004 mb (100.4 kPa, 29.65 mm Hg) el valor del parámetro de posición,  $\delta$  para las distribuciones Lognormal y Gamma o  $\beta$  para la Exponencial.

Los datos disponibles de coordenadas del ojo del ciclón y la presión central se agruparon de acuerdo con la latitud. Se encontró que casi en todos los conjuntos de presión central, los ajustes de la función exponencial a los datos tenía el error cuadrático medio más pequeño, por lo que se adoptó esta función para estimar las probabilidades de presentación de tormentas tropicales o huracanes.

La función de distribución de probabilidad exponencial se empleó de la manera siguiente:

$$F(y) = e^{-\frac{1004-y}{\alpha}} \quad (3.1)$$

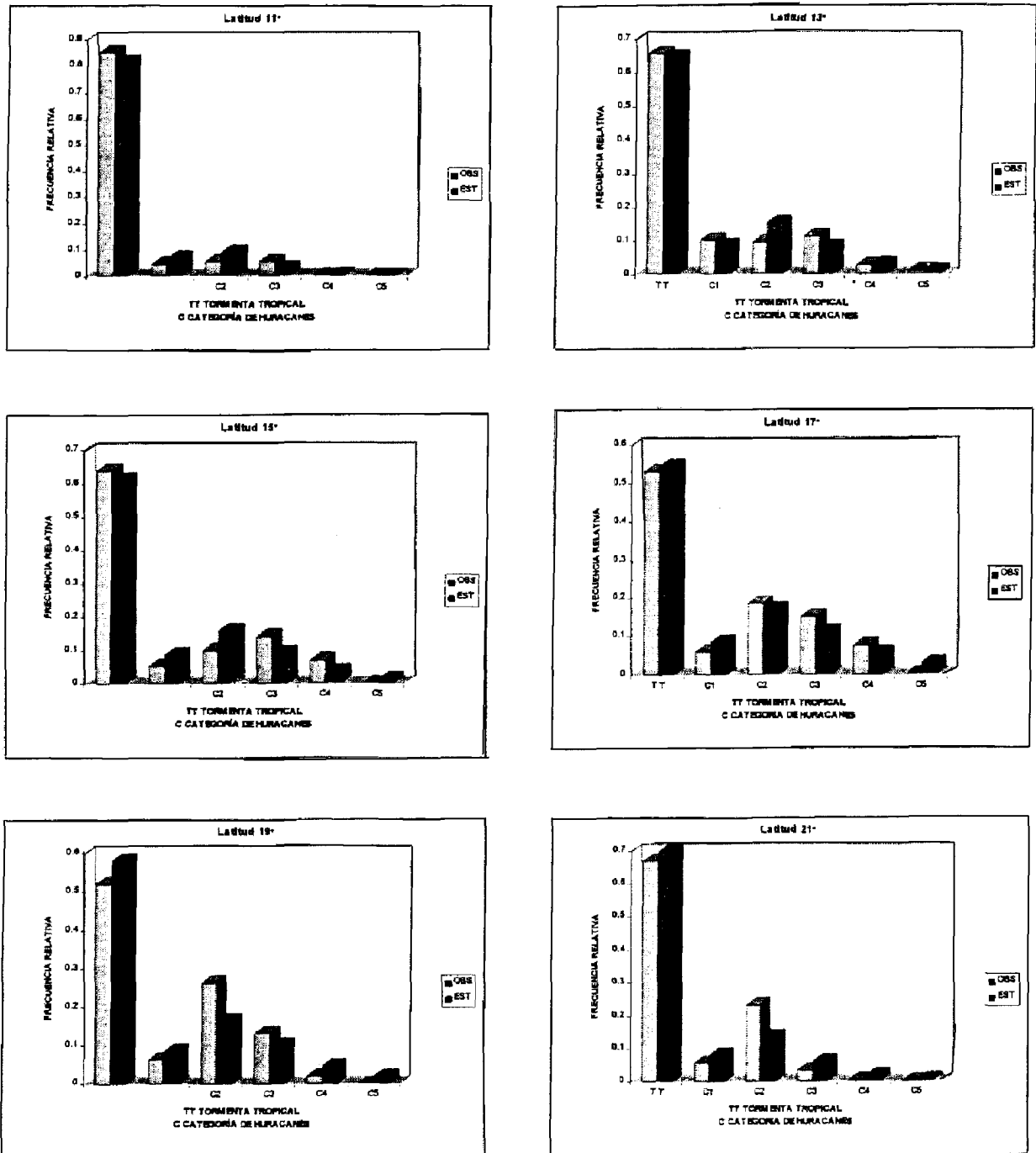
donde  $y < 1004$  mb representa a la presión central del ciclón.

En la tabla 3.2 se consignan para distintos intervalos de clase el número de valores de presión central utilizados; así como los parámetros  $\alpha$  y los errores cuadráticos medios calculados con el ajuste a la distribución de probabilidad.

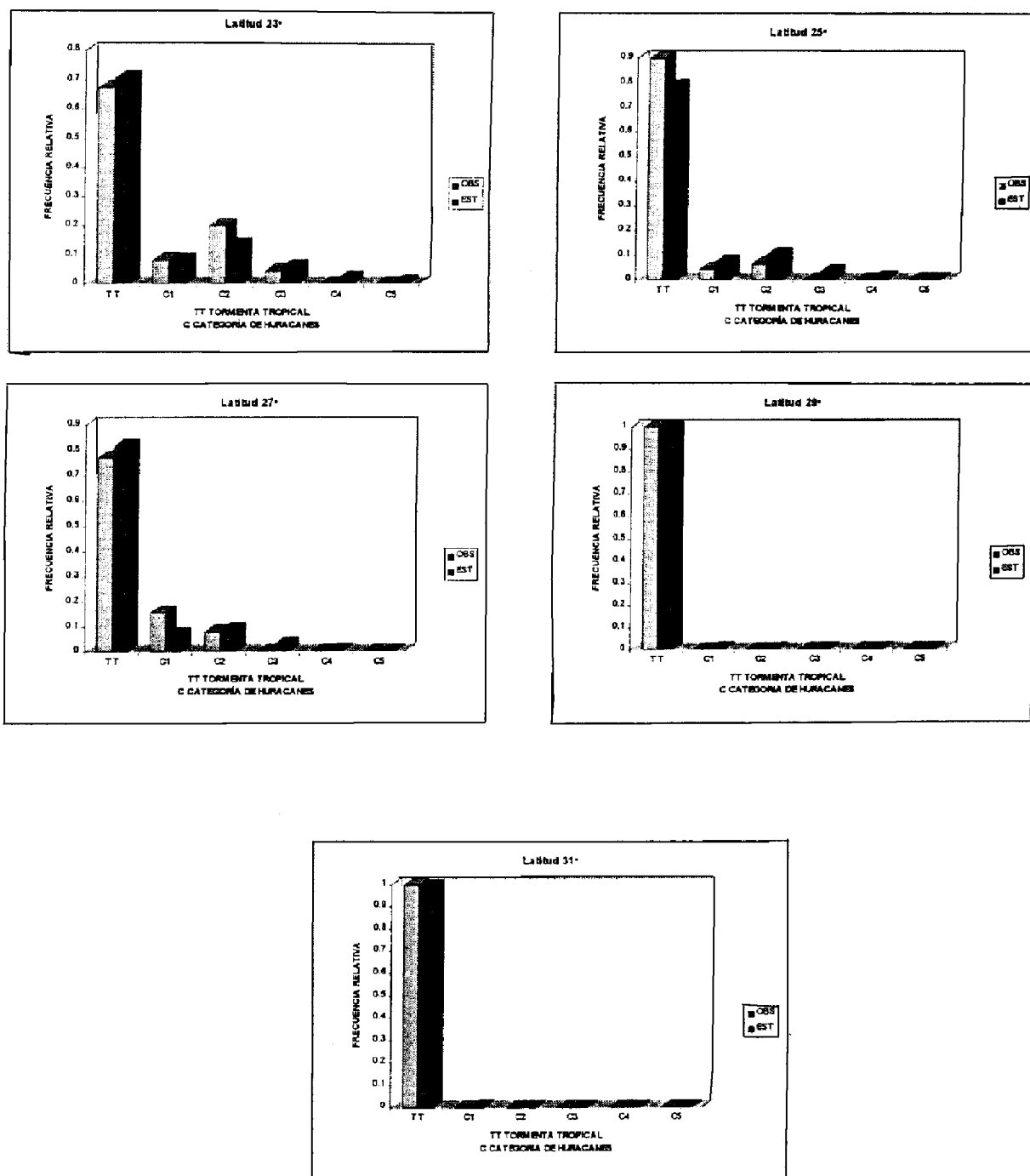
**Tabla 3.2 Valores del parámetro  $\alpha$  de la función de distribución exponencial respecto a la latitud.**

| LATITUD $\phi$   | OCEANO PACIFICO    |          |                        | OCEANO ATLANTICO   |          |                        |
|------------------|--------------------|----------|------------------------|--------------------|----------|------------------------|
|                  | NÚMERO DE CICLONES | $\alpha$ | ERROR CUADRÁTICO MEDIO | NÚMERO DE CICLONES | $\alpha$ | ERROR CUADRÁTICO MEDIO |
| $30 < \phi < 32$ | 4                  | 4.000    | 3.21                   | -                  | -        | -                      |
| $28 < \phi < 30$ | 6                  | 4.167    | 1.68                   | -                  | -        | -                      |
| $26 < \phi < 28$ | 13                 | 11.308   | 4.79                   | -                  | -        | -                      |
| $24 < \phi < 26$ | 48                 | 12.333   | 16.20                  | 172                | 22.622   | 74.40                  |
| $22 < \phi < 24$ | 110                | 15.473   | 11.85                  | 201                | 16.770   | 26.67                  |
| $20 < \phi < 22$ | 172                | 15.866   | 9.14                   | 232                | 15.849   | 20.15                  |
| $18 < \phi < 20$ | 373                | 21.807   | 41.08                  | 187                | 17.392   | 11.23                  |
| $16 < \phi < 18$ | 376                | 24.410   | 35.71                  | 180                | 18.654   | 17.00                  |
| $14 < \phi < 16$ | 303                | 20.373   | 36.20                  | -                  | -        | -                      |
| $12 < \phi < 14$ | 223                | 18.668   | 11.05                  | -                  | -        | -                      |
| $10 < \phi < 12$ | 94                 | 11.479   | 6.66                   | -                  | -        | -                      |

En las figuras 3.1 y 3.2 se muestra una comparación entre los histogramas obtenidos con los datos de cada latitud (OBS) y los valores estimados (EST) con la ecuación 3.1.



**Figura 3.1** Histogramas obtenidos con la información del Océano Pacífico.



**Figura 3.1** Histogramas obtenidos con la información del Océano Pacífico.  
(continuación)

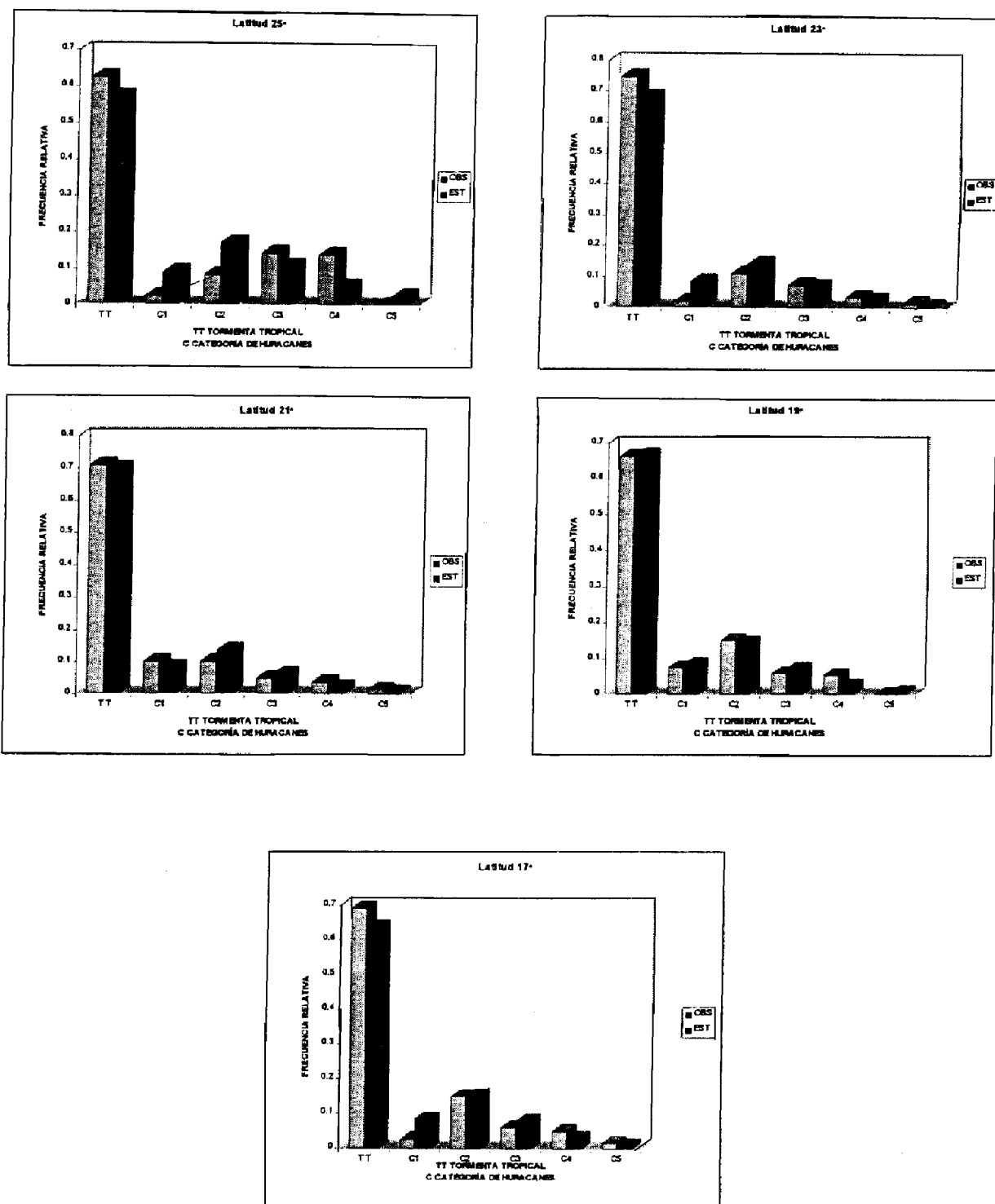


Figura 3.2 Histogramas obtenidos con la información del Océano Atlántico.

## CAPÍTULO 4

### ANÁLISIS DE PROBABILIDAD

Para calcular la probabilidad de que en un año ocurra un ciclón (con presión central menor a 1004 mb) cerca de la República Mexicana se consideró a los ciclones que se han presentado en los océanos Pacífico y Atlántico en un lapso mayor a 35 años y algunas de las presiones reportadas en el centro de ellos.

#### 4.1 CÁLCULO DE PROBABILIDAD

La probabilidad se planeó a partir de la ocurrencia dos eventos independientes. Se toma en cuenta la probabilidad de que en un año se presente un ciclón en una zona (evento A) y la probabilidad de que el ciclón posea cierta presión en su centro (evento B). Así, la probabilidad de que en dicha zona ocurra un ciclón de cierta presión central,  $P(A \cap B)$ ; se calcula como

$$P(A \cap B) = P(A)P(B) \quad (4.1)$$

##### 4.1.1 Probabilidad de que en un año se presente un ciclón en una zona.

Se considera que el número de ciclones  $x$  que se presentan en un año en una región específica es una variable aleatoria con distribución de Poisson. Por lo que, el número promedio de ciclones se calcula con  $\mu = \lambda t$ , donde  $t$  es el tiempo específico de interés (en este caso, es igual a un año) y  $\lambda$  la tasa o promedio de resultados por unidad de tiempo (es igual al número de ciclones por año en una cierta zona).

La probabilidad de ocurrencia de  $x$  está dada como

$$P(x, \lambda t) = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^x}{x!} \quad (4.2)$$

Si  $N$  representa al número de ciclones que en promedio ocurren anualmente en una región, la probabilidad de que se presente en un año uno o más ciclones en la región está dada como

$$P(A) = 1 - P(0, N) \quad (4.3)$$

donde la probabilidad  $P(0, N)$  se obtiene con la ecuación 4.2 para  $x$  igual a cero y  $\mu = \lambda t = N$  como

$$P(0, N) = e^{-N}$$

Por lo anterior, la ecuación 4.3 también puede escribirse como

$$P(A) = 1 - e^{-N} \quad (4.4)$$

#### 4.1.2 Probabilidad de que un ciclón tenga determinada presión central.

En el Capítulo 3 se encontró que la función de distribución de probabilidad que mejor se ajusta a los valores medidos de presión central ( $y$ ), tanto en el océano Pacífico como en el Atlántico, es en una exponencial de dos parámetros. Esta distribución se expresa como

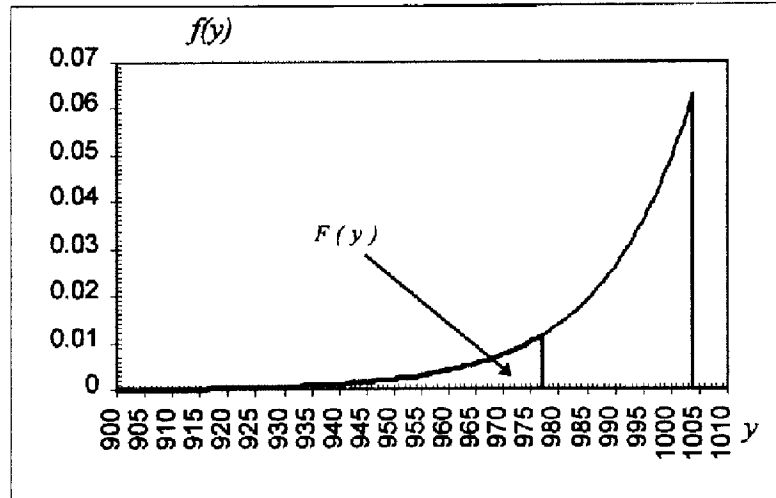
$$F(y) = e^{-\frac{\beta-y}{\alpha}} \quad (4.5)$$

Esta expresión es válida para  $y < \beta$ , de otro modo es igual a la unidad.

La función de densidad de probabilidad asociada a la distribución anterior es

$$f = \frac{dF}{dy} = \frac{1}{\alpha} e^{-\frac{\beta-y}{\alpha}}$$

En la figura 4.1 se muestra la gráfica de la función de densidad de probabilidad



**Figura 4.1 Función de densidad de probabilidad ( $\alpha=15.849$ ,  $\beta=1004$ ).**

El parámetro  $\beta$  se tomó como 1004 mb y el parámetro  $\alpha$  depende de la latitud del centro de la región donde se presenta el ciclón (tabla 3.2). Por lo que la probabilidad de que el ciclón tenga una presión central menor a  $Y$  (siendo  $Y < \beta$ ) se calcula mediante

$$P(B) = P(y < Y) = F(Y)$$

o sea que

$$P(B) = e^{-\frac{1004-Y}{\alpha}} \quad (4.6)$$

#### 4.1.3 Probabilidad de que en un año se presente un ciclón en una zona con determinada presión central.

La probabilidad de que en un año se presente un ciclón con presión central menor a 1004 mb en una zona, se obtiene al tomar en cuenta a las ecuaciones 4.4 y 4.6 en la 4.1, así

$$P(y < Y) = \left( e^{-\frac{1004-Y}{\alpha}} \right) (1 - e^{-N}) \quad (4.7)$$

donde  $Y$  es la presión central del ciclón y  $N$  es el número promedio de ciclones que ocurren anualmente en la región de interés. En esta expresión se ha considerado  $P(A \cap B)$  como  $P(y < Y)$ .

Para el cálculo de esta probabilidad se prefiere escribir la ecuación anterior de la forma siguiente

$$P(y < Y) = \left( e^{-\frac{1004-Y}{\alpha}} \right) P(A) \quad (4.8)$$

En el Capítulo 3 se describió la manera en que se ajustó el parámetro  $\alpha$  para las distintas zonas en estudio.

Para calcular la probabilidad de que la presión central del ciclón esté dentro de un intervalo de clase se toma en cuenta que

$$P(Y_l < y < Y_s) = P(y < Y_s) - P(y < Y_l)$$

que de acuerdo con la ecuación 4.8 es igual a

$$P(Y_l < y < Y_s) = \left( e^{-\frac{1004-Y_s}{\alpha}} - e^{-\frac{1004-Y_l}{\alpha}} \right) P(A) \quad (4.9)$$

## 4.2 PERÍODO DE RETORNO

Se entiende por período de retorno el número promedio de años que deben transcurrir para igualar o superar un evento.

En el caso de los ciclones se considera que se trata con valores de presiones mínimas, por lo que el período de retorno es igual al recíproco de la probabilidad de no excedencia, es decir

$$T_r = \frac{I}{P(y < Y)}$$

Al tomar en cuenta la ecuación 4.8 resulta

$$T_r = \frac{I}{\left( e^{-\frac{1004-Y}{\alpha}} \right) P(A)} \quad (4.10)$$

De acuerdo con la expresión anterior, el periodo de retorno más pequeño que podría tenerse para cada zona de interés resulta cuando la exponencial toma su valor más grande, uno cuando  $Y=1004$  mb. Periodos de retorno menores a este no serían posibles. Por ello conviene evaluar el mínimo como referencia y llevar a cabo los cálculos requeridos para periodos mayores o iguales al mínimo.

De la ecuación 4.10 resulta que el período de retorno más pequeño a tomar en cuenta es igual a

$$T_{r\ min} = \frac{I}{P(A)} \quad (4.11)$$