

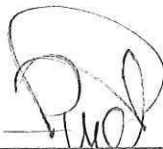
MECANISMOS FISICOS QUE INFLUYEN EN LAS TRAYECTORIAS DE  
LOS CICLONES TROPICALES FRENTE A LAS COSTAS MEXICANAS  
DEL PACIFICO.

TESIS  
QUE PRESENTA:  
FRANCISCO JAVIER PRECIADO GOMEZ

Aprobada por:



Presidente del Jurado  
Dr. Luis Zavala Sansón



Sinodal Propietario  
Dr. René Pinet Plascencia



Sinodal Propietario  
Dr. Rubén Castro Valdez

## Índice

Dedicatoria .....	1
Agradecimientos.....	2
Resumen.....	3
Capítulo 1. Introducción.....	4
1.1 Tema de estudio .....	4
1.2 Características generales de los ciclones tropicales .....	6
1.3 El efecto $\beta$ .....	8
1.4 Centros de presión semipermanentes .....	10
Capítulo 2. Objetivo.....	12
2.1 Objetivos Particulares.....	12
2.2 Hipótesis.....	13

Capítulo 3. Comportamiento de los ciclones tropicales en el Pacífico Oriental en el periodo de 1992 al 2003.....	14
Capitulo 4. Casos especiales con recurvamiento.....	24
4.1 Fausto y Douglas (1996).....	25
4.2 Kenna y Hernan (2002).....	30
4.3 Lester (1992).....	35
Capitulo 5. Efecto de los ciclones en las costas mexicanas del Pacífico Nororiental .....	38
5.1 Precipitación en México.....	39
5.2 Estados afectados con desastres por las lluvias .....	43
Capitulo 6. Discusión y Conclusión.....	45

## Lista de Tablas.

**Tabla 1-** Escala Saffir-Simpson de acuerdo a la máxima velocidad

de viento sostenido y a la presión en el centro de los ciclones. .... 8

**Tabla 2-** Número de ciclones por mes de 1992 hasta el 2003. ....19

**Tabla 3-** Muestra los ciclones tropicales desde 1992 hasta el 2003, donde se presentan los promedios individuales de presión y velocidad para cada uno, velocidad máxima, periodo del ciclón, categoría y año. ....20

**Tabla 4-** Frecuencia de ciclones que han tocado tierra en estados de las costas mexicanas del pacifico oriental. ....23

**Tabla 5-** Casos especiales durante el periodo de 1992 al 2003. ....25

**Tabla-. 6** Precipitación anual y mensual en la republica mexicana desde 1992 al 2003. ....39

**Tabla-. 7** Promedios de precipitación anual e individual de los casos seleccionados, porcentaje de lluvia que aportaron anualmente y a la climatología de 1992 al 2003. ....40

**Tabla- 8** Presenta los ciclones tropicales de 1992 al 2003 que dejaron daños importantes en las costas del pacífico nororiental, y a su vez se muestran los estados que afectaron. ....43

## Lista de Figuras

Fig. 1-. Zona de estudio localizada en pacífico nororiental, próxima a la costa Occidental de México. ....	6
Fig. 2.- Esquema de la distribución de vorticidad relativa en un vórtice ciclónico en presencia del efecto $\beta$ en el Hemisferio Norte .....	9
Fig. 3-. Mapas que presentan los sistemas de alta presión semipermanentes del Pacífico y del Atlántico, además los cinturones de alta y bajas presiones en ambos Hemisferios. ....	11
Fig. 4 a),b),c),d)-. Mapas de trayectorias de los ciclones tropicales por temporada. 16	
Fig. 4 e),f),g),h)-. Mapas de trayectorias de los ciclones tropicales por temporada. 17	
Fig. 4 i),j),k)-. Mapas de trayectorias de los ciclones tropicales por temporada. ....	18
Fig 5 a)-.Gráfica de Años contra velocidad. ....	21
Fig 5b)-.Gráfica de presión promedio individual contra velocidad promedio individual. ....	22
Fig. 6-. Mapa con las trayectorias que desarrollaron los huracanes Fausto y Douglas de la temporada 1996. ....	28
Fig. 7-. Imágenes de satélite del Huracán Fausto a) 11 de septiembre y b) 13 de septiembre de 1996. ....	28
Fig. 8-. Imágenes de satélite del Huracán Douglas c) 30 de julio y d) 01 de agosto de 1996. ....	29

**Fig. 9-**. Contornos de altura geopotencial y vectores de viento a 500 mb, para Fausto (a) del día 13 de septiembre de 1996 a las 0600 UTC y Douglas (b) del día 2 de agosto a las 0000 UTC .....29

**Fig. 10-**. Contornos de altura geopotencial y vectores de viento a 1000 mb, para Fausto (a) del día 13 de septiembre de 1996 a las 0600 UTC y Douglas (b) del día 2 de agosto de 1996 a las 0000 UTC. ....30

**Fig. 11-**. Mapa con las trayectorias que desarrollaron los huracanes Kenna y Hernan de la temporada 2002. ....33

**Fig. 12-**. Imágenes de satélite del Huracán Kenna a) 23 de octubre y b) 25 de octubre de 2002. ....33

**Fig. 13-**. Imágenes de satélite del Huracán Hernan a) 30 de agosto y b) 02 de octubre del 2002. ....34

**Fig. 14 -**. Contornos de altura geopotencial y vectores de viento a 500 mb, para Kenna (a) del día 18 de octubre del 2002 a las 18UTC y Hernan (b) del día 31 de agosto del 2002 a las 0600 UTC. ....34

**Fig. 15-**. Mapas de alturas geopotencial a 1000 mb, para Kenna (a) del día 18 de octubre del 2002 a las 18UTC y Hernan (b) del día 31 de agosto del 2002 a las 0600 UTC. ....35

**Fig. 16-** Mapa con la trayectoria que desarrolló el huracán Lester de la temporada 1992, en donde se muestra el recurvamiento que presentó. ....35

**Fig. 17-** Contornos de altura geopotencial a 500 (a) y 1000 (b) mb, para Lester del día 22 de septiembre de 1992 a las 00UTC. ....36

**Fig. 18 -.** Mapas de precipitación para Fausto (a) y Douglas (b) de temporada de 1996. ....42

**Fig. 19 -.** Mapas de precipitación para Kenna (a) y Hernan (b) de la temporada 2002. ....42

## **Dedicatoria**

A mis padres Francisco Javier Preciado Mejia e Irma Patricia Gomez de Preciado, por estar en mi camino apoyándome en cualquier decisión, porque gracias a ustedes he llegado hasta aquí y sigo en este sendero.

A mi hermana Patricia, por ser parte de la alegría de mi vida.

A la Dra. Gabriela Granados por toda su ayuda aquí y siempre.

A Jimena Haza Vidal.

A las Familias: Calderon Preciado, Gomez Saldivar, Martín Preciado, Vega Santana, Valenzuela Tapia y Almaraz Martínez, por todo su apoyo para seguir adelante, por siempre agradecido.

## **Agradecimientos**

Al Dr. Luis Zavala Sansón por su apoyo y paciencia que me brindo en la realización de este trabajo.

A mis sinodales, Dr. Adán Mejía Trejo y Dr. Rene Pinet Placencia por todo el apoyo recibido.

Al Dr. Rossengaus del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), al Ing. Mendoza del Servicio Nacional Meteorológico (SMN) por la disponibilidad y facilidades que se presentaron para la obtención de los datos que fueron utilizados en el presente trabajo.

A mis amigos Rafa Sánchez, Alejandro Sánchez y Bertha Ramos, Leopoldo Gutiérrez, Ana Maria Aguilar, Cesar Ávila, Diana Kusters, Raúl Herrera, Margarita González, Daniela Chiquette, Juan Carlos Nava, Cecilia Peralta, Mariana Leija, todos los Well Well D friends, Nathaniel Schmith, Ashley Sokol, Octavio Mcfarland, Fátima Ortiz, Javier Escalante, El padrino y carito, Quique y Nayeli, Abuelo y Flaca, Meño, Gabriel, Galo, Biviana Ávila y a todos los que alguna vez compartimos algo.

## Resumen

La trayectoria, evolución y precipitación asociada con los ciclones tropicales que afectaron las costas mexicanas en el Pacífico Oriental durante el periodo de 1992 al 2003 son estudiadas por medio de mapas de altura geopotencial con vectores a 500 y 1000 mb, imágenes de satélite del GOES 8, y mapas de precipitación derivados de las estaciones meteorológicas distribuidas en la República Mexicana. El objetivo es investigar los mecanismos físicos por los que algunos ciclones modifican su trayectoria hacia el continente (recurvamiento), mientras que otros siguen una trayectoria hacia el noroeste, sin acercarse a la costa. Además, se hace un análisis comparativo de la lluvia asociada con algunos casos especiales, en donde se contrastan los efectos de ciclones que curvan su trayectoria hacia el continente y los que no lo hacen. Los resultados muestran que las trayectorias de los ciclones analizados están estrechamente relacionadas con la forma y posición de los sistemas de alta presión semipermanente: la alta presión del Pacífico y la alta presión del Atlántico. La influencia de estos sistemas es observada en los mapas de altura geopotencial a 500 mb, en donde se aprecia que un intenso flujo hacia el este en latitudes medias es responsable de la desviación de algunos ciclones hacia el continente. Cuando dicho flujo se debilita o es desplazado por los sistemas de alta presión, los ciclones tienden a proseguir su deriva al noroeste. Respecto a las precipitaciones debidas al paso de los ciclones, se observó que la cantidad de lluvia y potenciales daños en los estados afectados no están necesariamente relacionados de manera directa con la intensidad del huracán ni con su trayectoria. Esto significa que huracanes relativamente poco intensos o que inclusive no tocan tierra, pueden aportar mayor lluvia que otros más intensos y que impacten directamente en el continente.

## 1. Introducción

### 1.1 Tema de estudio

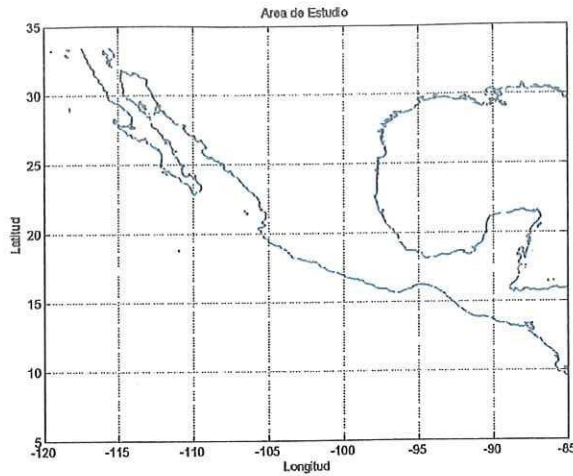
Los ciclones tropicales son fenómenos de amplia relevancia en las zonas costeras debido al incremento de la población en estas áreas, así como a los notables efectos que producen a su paso (alta precipitación, vientos intensos, marejadas, etc.). Sin embargo, el conocimiento que se tiene sobre los procesos físicos que gobiernan su comportamiento es aún insuficiente, ya que presentan mecanismos complejos que todavía no han sido del todo comprendidos. Se conoce que México es uno de los países afectados por ciclones tropicales, debido a que presenta dos regiones ciclogénicas distintas (Atlántico Norte y Pacífico Oriental), donde estos fenómenos tienen efectos importantes sobre las costas mexicanas. Ambas regiones afectadas pertenecen a la IV región de la Organización Mundial de Meteorología (OMM) (Cerdea *et al.*, 2001).

La climatología de los ciclones tropicales que afectan a las costas mexicanas provee una herramienta útil para el estudio de los daños potenciales que ocurren dentro de esta zona. En particular, este trabajo se encuentra enfocado a la región que comprende el Pacífico Nororiental próximo a la costa Occidental de México (Figura 1). El Pacífico Nororiental es el área que se encuentra al norte del ecuador, entre el continente americano y los 140° de longitud oeste. La climatología que presenta el Pacífico Oriental durante el invierno es la presencia de vientos secos que soplan desde el continente hacia el océano, mientras que en verano los vientos soplan en dirección contraria trayendo abundantes precipitaciones (Cerdea *et al.*, 2001).

Por lo tanto, en esta región las condiciones climáticas presentan una marcada estacionalidad.

Las tormentas tropicales que se presentan en el Pacífico Oriental son de gran importancia para las costas mexicanas. Durante los meses de julio a septiembre se presenta un aumento considerable de lluvias, muchas de las cuales se asocian a eventos de huracanes (Avila y Guiney, 2000; Pavía, 2004). Además, se ha observado que en el transcurso de los años la temporada de ciclones tropicales ha presentado un claro incremento (Rosengaus, 2001). La vulnerabilidad que se presenta en el Pacífico Oriental ante esta clase de fenómenos es de dos y media veces más alta que para el Atlántico (Jáuregui, 2003); los estados más susceptibles a ellos son el noroeste de Sinaloa, la parte sur de la Península de Baja California, Jalisco, Nayarit, Oaxaca, Baja California y el estado de Michoacán.

Uno de los mayores problemas que presenta el estudio de los ciclones tropicales es el pronóstico de sus trayectorias, ya que se necesita de una correcta estimación de los procesos físicos que están sucediendo dentro y a grandes distancias de ellos. El presente trabajo tiene como finalidad analizar el comportamiento de los ciclones tropicales más importantes de los últimos 12 años y, en particular, determinar bajo qué condiciones sus trayectorias son fuertemente influenciadas por las principales variables meteorológicas. Para facilitar la exposición del tema, en las siguientes secciones de este capítulo introductorio se presentarán algunos de los conceptos más básicos e importantes sobre los ciclones tropicales y la atmósfera.



**Fig. 1-** Zona de estudio localizada en Pacífico Nororiental, próxima a la costa Occidental de México.

## **1.2 Características generales de los ciclones tropicales**

La formación de ciclones se ve favorecida al registrarse un aumento de la temperatura superficial del mar, aunado a la existencia de una zona de baja presión atmosférica hacia la cual convergen vientos de todas direcciones. En general, estos fenómenos tienen dimensiones espaciales de cientos de kilómetros, en donde las áreas afectadas presentan fuertes lluvias y viento. Los vientos en la zona circundante fluyen en espiral hacia el interior del huracán, en donde aumenta el ascenso del aire caliente y húmedo que libera vapor de agua. El calor latente, ganado por la condensación del vapor de agua, se transforma en energía cinética de rotación, y constituye la fuente de energía del ciclón. Una vez que se inicia el movimiento del aire hacia arriba, a través de la columna central, se incrementa la entrada de aire en los niveles más bajos, con la correspondiente salida en el nivel superior.

Debido a la influencia de la rotación de la Tierra, el aire que converge gira y comienza a moverse en espiral, en sentido contrario a las manecillas del reloj (ciclónico), en el caso del Hemisferio Norte (Colling, 2001).

Se conoce que dentro de los ciclones tropicales se encuentra una zona de alta precipitación, de vientos intensos y con valores promedio de presión menores a 1000 mb. Dentro de los ciclones tropicales se tienen paredes de nubes organizadas, que están compuestas de bandas adyacentes que típicamente pueden llegar a tener un diámetro total de hasta 1000 km. El lugar donde se localiza la intensificación de las variables antes mencionadas es la parte adyacente a la pared exterior del ojo, a unos 50-80 km de su centro geométrico (Emmanuel, 1991). A diferencia del resto de la tormenta, el ojo del ciclón se encuentra caracterizado por tener una zona de velocidades de viento relativamente bajas y sin cobertura de nubes, teniendo que la circulación vertical alcanza los 15 km. La clasificación de los huracanes se basa en la intensidad de la tormenta. Aunque existen diversas formas de clasificar a dichos sistemas, el método de categorización que se utiliza con mayor frecuencia es el desarrollado por H. Saffir y R.G. Simpson. En este esquema las categorías son dadas dependiendo principalmente de la presión en el centro del sistema y de las máximas velocidades sostenidas de viento generadas (Tabla 1).

**Tabla 1-** Escala Saffir-Simpson de acuerdo a la máxima velocidad de viento sostenido y a la presión en el centro de los ciclones.

Categorías	Vientos sostenidos		Presión atmosférica en el ojo (mb)
	(km/h)	(millas/h)	
Depresión Tropical	< 62	< 39	
Tormenta Tropical	62- 119	39-67	
1	119- 153	74- 95	980
2	154- 177	96-110	965 - 979
3	177 -209	110 - 130	945 - 964
4	209 -249	130 - 155	920 - 944
5	< 249	<155	< 920

### 1.3 El efecto $\beta$

Se conoce que los vórtices de gran escala en los fluidos geofísicos (los océanos y la atmósfera) son influenciados por el efecto beta, el cual es debido a la variación latitudinal del parámetro de Coriolis (Chan, 1986). En el Hemisferio Norte, los vórtices ciclónicos monopoles presentan un movimiento que tiende hacia el noroeste y, de manera análoga, tienden hacia el suroeste en el Hemisferio Sur. Este efecto es producto del movimiento de las parcelas de fluido alrededor del núcleo central del vórtice, junto con el principio de conservación de vorticidad potencial: cuando dichas parcelas al este del núcleo central se mueven hacia el norte,

adquieren un decremento en la vorticidad relativa. Igualmente, las parcelas al oeste del núcleo central se mueven hacia el sur adquiriendo un aumento en su vorticidad relativa (Figura 2). Esta estructura puede ser descrita como una perturbación en el campo de la distribución inicial de vorticidad, la cual tiene un momentum orientado hacia el noroeste (Chan, 1986). Aunque los ciclones tropicales suelen presentar trayectorias muy erráticas, su tendencia es principalmente hacia dicha dirección, como se ha mostrado en numerosas regiones del Hemisferio Norte (Farfán y Zehnder, 2001). Esto indica que cuando se observan desviaciones importantes es probable que sea debido a factores externos al vórtice, tales como el flujo medio de gran escala en el que está inmerso. Algunos patrones de escala planetaria que pueden llegar a influir en las trayectorias de los ciclones se describen en la siguiente sección.

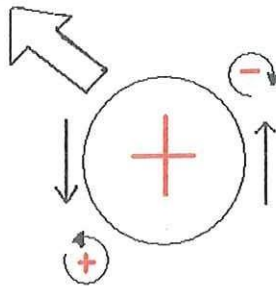


Fig .2.- Esquema de la distribución de vorticidad relativa en un vórtice ciclónico en presencia del efecto  $\beta$  en el Hemisferio Norte.

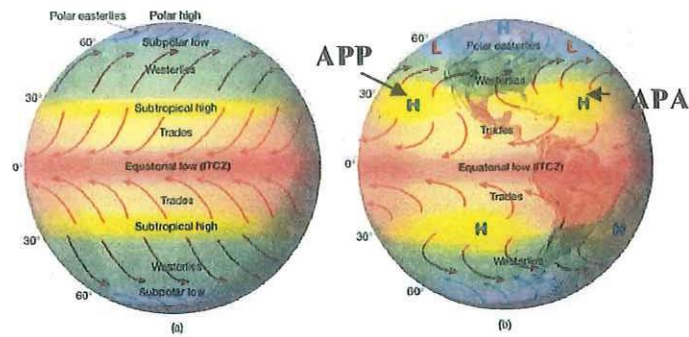
#### 1.4 Centros de presión semipermanentes

Los centros de presión semipermanentes son áreas en la atmósfera donde las altas y bajas presiones residen por extensos periodos de tiempo. Estos centros de presión se encuentran localizados, según el modelo de cinturones de presión (Colling, 2001), como

- Bajas presiones ecuatoriales.
- Altas presiones subtropicales.
- Bajas presiones subpolares.
- Altas presiones polares.

La mayoría de estos cinturones son una idealización para simplificar el entendimiento y el comportamiento de estos sistemas.

En el área de estudio donde se desarrolla esta investigación se tiene la influencia de dos centros semipermanentes de alta presión: la alta presión del Pacífico (APP), y la alta presión del Atlántico ó Azores (APA) (Figura 3). Ambos sistemas presentan migraciones estacionales en verano, otoño, así como en invierno. La APP durante el invierno se encuentra cerca de los 30° N y en verano su posición es entre 35° N y 40° N, siendo dicho sistema más intenso durante el verano. A su vez, la APA durante el invierno se encuentra localizada cerca de los 30° N y durante el invierno alrededor de los 40°N, experimentando intensificación durante el invierno. La migración de ambos sistemas es de suma importancia en el comportamiento de los ciclones tropicales.



**Fig. 3.-** Mapas que presentan los sistemas de alta presión semipermanentes del Pacífico y del Atlántico, además los cinturones de alta y bajas presiones en ambos Hemisferios (Colling, 2001).

Los sistemas semipermanentes de presión en ambos océanos repercuten directamente en la circulación general de la atmósfera debido a que dichos sistemas abarcan grandes extensiones, lo cual juega un factor importante en el comportamiento del clima en las regiones que tienen influencia. Cabe señalar que las altas presiones del Pacífico y del Atlántico son parte importante de este trabajo, dada su relación con las trayectorias de los ciclones tropicales en la zona de estudio. Es importante señalar que este tipo de sistemas son espacialmente mucho mayores comparados con los ciclones, a pesar de que estos últimos también abarcan grandes extensiones.

## **2. Objetivo**

El objetivo general es establecer un análisis del movimiento y evolución de los ciclones tropicales en el Pacífico Oriental que afectaron directamente a las costas mexicanas durante el periodo de 1992 al 2003.

### **2.1 Objetivos Particulares**

A partir de los datos obtenidos, tanto de la estructura, movimiento y evolución de los casos históricos, se analiza:

- 1) La intensidad, forma y trayectoria que presentaron los fenómenos durante el periodo mencionado.
- 2) La influencia de las variables meteorológicas en la trayectoria de algunos casos particulares. El objetivo es determinar con certeza los mecanismos físicos por los cuales algunos ciclones sufren una marcada desviación de su trayectoria (recurvamiento), mientras que otros no presentan notables modificaciones.
- 3) Los efectos causados en las regiones que dejaron a su paso, tanto de los ciclones que recurvan como de los que no recurvan.

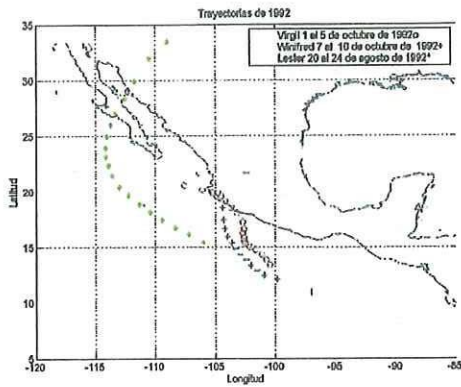
## 2.2 Hipótesis

Se iniciará estableciendo el comportamiento promedio de los ciclones tropicales durante el periodo de 1992 al 2003, mediante datos históricos obtenidos del National Hurricane Center (NHC) y del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). La hipótesis principal es que la mayor parte de los huracanes se trasladan en dirección noroeste debido al efecto  $\beta$ . Cuando se registran variaciones importantes en los patrones dominantes de circulación de gran escala en la atmósfera, entonces su trayectoria sufre una modificación importante. Las variables meteorológicas (viento, presión superficial, alturas geopotenciales a 1000 y 500 mb) son derivadas del NCEP\_NCAR Data Reanalysis, mientras que la evolución del ciclón se observa mediante imágenes de satélite infrarrojas del GOES 8. Los datos de precipitación se obtuvieron del SMN que corresponden a todas las estaciones meteorológicas de la República Mexicana, con el fin de encontrar los efectos que causan en las costas mexicanas.

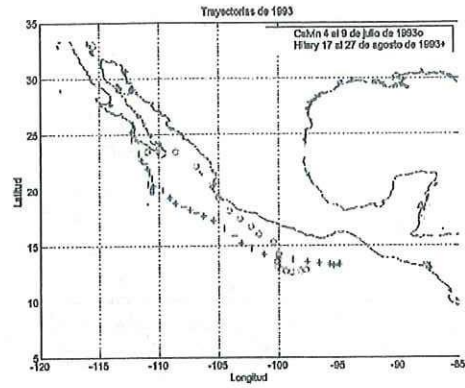
### **3. Comportamiento de los ciclones tropicales en el Pacífico Oriental en el periodo de 1992 al 2003**

Históricamente los ciclones tropicales han tenido influencia directa e indirecta sobre las costas mexicanas del Pacífico Oriental. En diversas investigaciones, se ha encontrado que las condiciones climatológicas que promueven la formación de estos fenómenos se presentan en los meses de junio a octubre, que es cuando se ha reportado la mayor cantidad de ciclones. En el periodo de 1958 a 1984 el número de ciclones tropicales es de 14 en promedio, con totales anuales que varían de 6 a 21; para el periodo de 1958 a 1996 el número anual de ciclones tropicales es de 12 en promedio, con totales anuales que varían de 6 a 24 (Jáuregui, 2003). Los ciclones del Pacífico Nororiental son quizá los menos conocidos, debido a que no se ha contado con suficientes observaciones meteorológicas en esta zona marítima. A partir de 1968, con la ayuda de los satélites meteorológicos se ha logrado su identificación, obteniendo un promedio de 16.1 contabilizados para el periodo de 1968 a 1996. La mayoría de estos sistemas tienden a formarse en la región sur de México y al oeste de Centro América, teniendo un movimiento paralelo a la costa de México (Farfán y Zehnder, 2001).

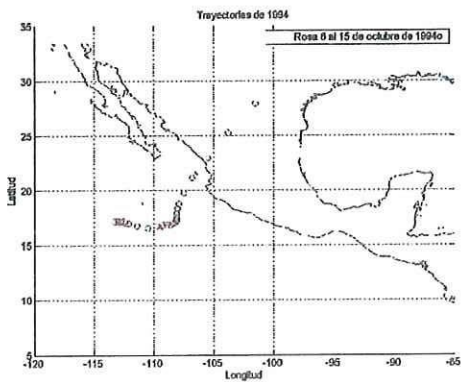
Las Figuras 4a – 4k muestran las trayectorias de los ciclones tropicales registrados con categoría de 1 a 4 y que tuvieron alguna influencia sobre las costas de México durante el periodo de 1992 al 2003. Los huracanes que se internaron al Pacífico sin tener ninguna interacción con el continente fueron excluidos. De estas figuras se observa que algunos de los sistemas presentaron una trayectoria con tendencia hacia el noroeste, alejándose de las costas mexicanas. Sin embargo, durante dicho periodo algunos ciclones presentaron durante su trayectoria una cercanía con las costas mexicanas, y en ocasiones una fuerte modificación hacia el continente, lo que los indujo a tocar la costa Occidental de México. Un claro ejemplo es el caso de Kenna de la temporada 2002 (Figura 4j), que mostró un intenso recurvamiento que lo forzó a tocar tierra. Un comportamiento análogo, aunque a diferentes latitudes, fue observado en los huracanes Lester (1992) y Fausto (1996). En cambio se presentaron algunas trayectorias anómalas como la del huracán Rosa (1994) que se desplazó hacia el este-noreste durante todo su periodo de actividad.



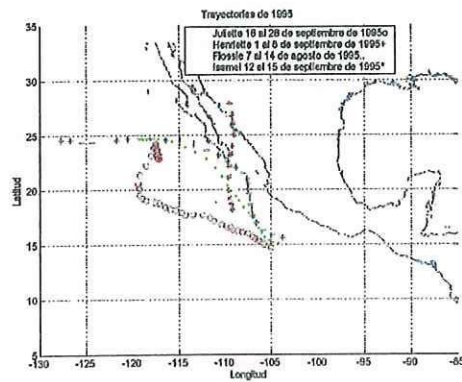
(a)



(b)

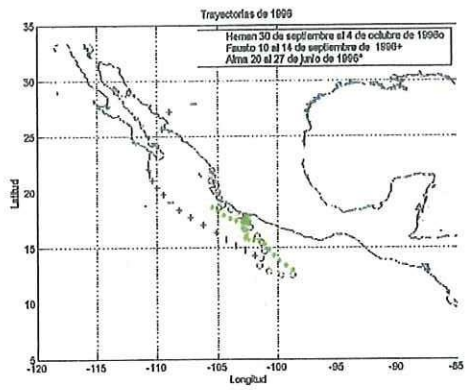


(c)

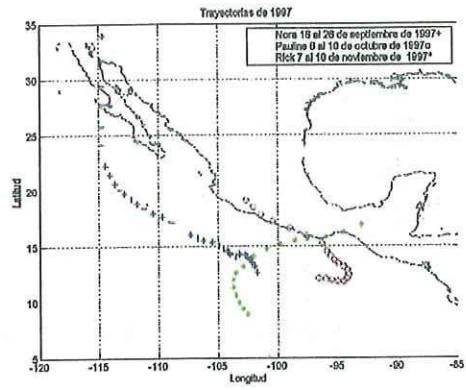


(d)

Figuras 4-. Mapas de trayectorias de los ciclones tropicales registrados cerca del continente durante el periodo de la temporada 1992-2003.

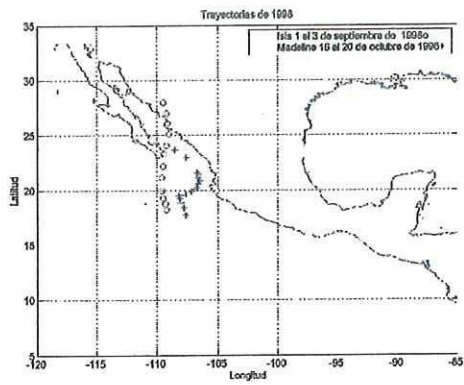


(e)

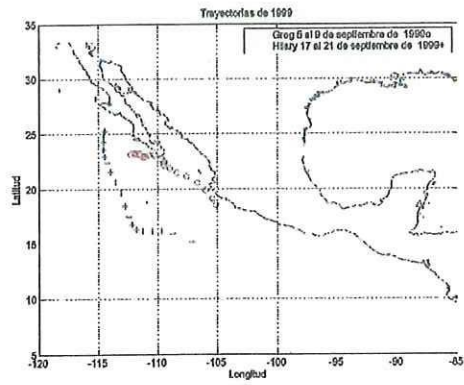


(f)

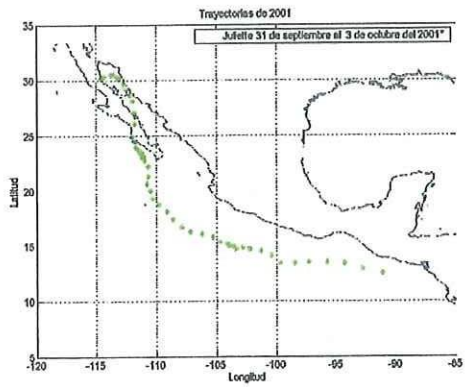
Figuras 4-. Continuación



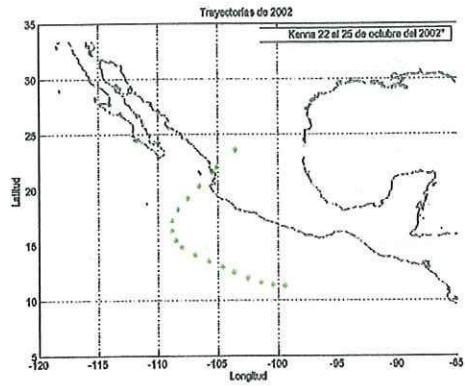
(g)



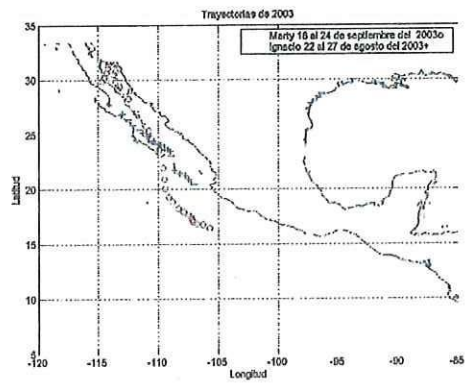
(h)



(i)



(j)



(k)

Figuras 4-. Continuación

**Tabla 2-** Número de ciclones por mes de 1992 a 2003.

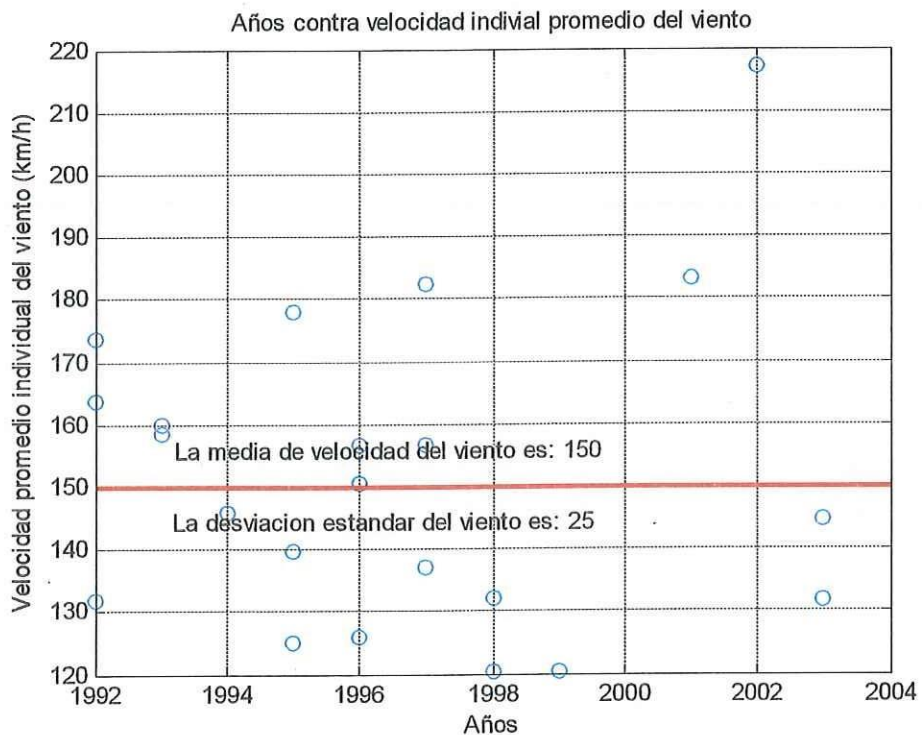
Categorías	1	2	3	4	5	Total
<b>Junio</b>	1					1
<b>Julio</b>		1				1
<b>Agosto</b>	3		1			4
<b>Septiembre</b>	5	2	2			9
<b>Octubre</b>	2	3	2	1		8
<b>Noviembre</b>	1					1
<b>Número de ciclones por categoría</b>	12	6	5	1	0	24

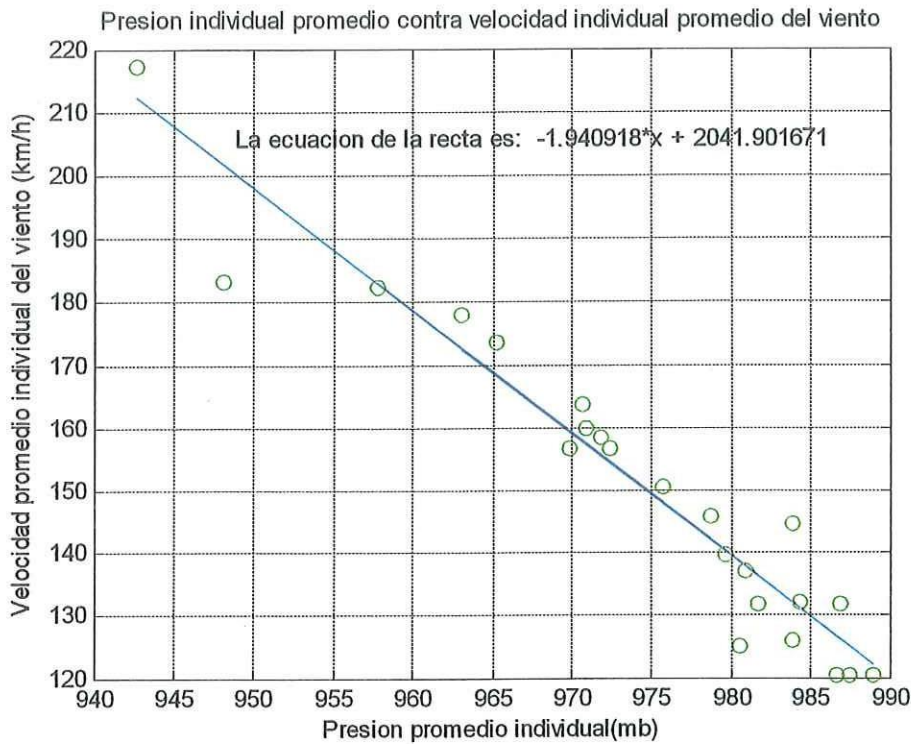
La **Tabla 2** muestra que solamente 6 de los eventos entre 1992 y 2003 alcanzaron las categorías 3 y 4 de la escala Saffir-Simpson, y los 18 restantes están dentro de las categorías 1 y 2. Aunque la mayoría de los ciclones que han afectado las costas mexicanas no son de una intensidad alta, los que han tocado tierra han causado daños en las poblaciones aledañas, mostrando la vulnerabilidad que tienen estas zonas. Entre los ciclones tropicales más intensos se encuentra Kenna del año 2002, que fue el ciclón que presentó la menor presión de todos con 942 mb, y la velocidad más alta con 217 km/h. Los ciclones más débiles fueron Isis del año 1998 y Hillary y Greg del año 1999, presentando Isis una presión de 989 mb y una velocidad de 120 km/h, Hillary una presión de 987 mb y una velocidad de 120 km/h y Greg con una presión de 986 mb y una velocidad de 120 km/h. En estos 12 años, se observa que la mitad de los ciclones fueron de categoría 1 y el resto se encuentran entre las categorías 2, 3 y 4.

**Tabla 3-.** Ciclones tropicales desde 1992 hasta el 2003, donde se presentan los promedios individuales de presión y velocidad para cada uno, velocidad máxima, periodo del ciclón, categoría y año.

Nombre	Año	Categoría de acuerdo con la escala (Saffir-Simpson)	Lugar de entrada a tierra	Periodo	Presión promedio individual. (Milibares)	Velocidad promedio individual. (Nudos)	Velocidad máxima (km/h)
Virgil	1992	2	Peñitas, Mich.	1-5 octubre	965	93	173
Winifred	1992	2	Cuyutlan, Col.	7-10 octubre	970.	88	163
Lester	1992	1	P.Abreojos B.C.S; B. Sargento, Son.	20-24 agosto	981	71	131
Calvin	1993	2	Manzanillo Col.	4-9 julio	971	85	158
Hilary	1993	3	Punta pequeña B.C.S.	17-27 agosto	970	86	160
Rosa	1994	2	Escúinapa Sin.	8-15 octubre	978	78	145
Juliette	1995	3	No toco tierra	16-26 septiembre	963	96	178
Ismael	1995	3	Topolobampo Son.	12-15 septiembre	963	96	178
Henriette	1995	1	Los Cabos B.C.S.	1-8 septiembre	979	75	139
Flossie	1995	1	No toco tierra	7-14 agosto	980	67	124
Hernan	1996	1	B. Navidad Jal.	30sept. - 4 oct.	984	68	125
Fausto	1996	2	Todos Santos B.C.S; Los Mochis Son.	10-14 septiembre	969	84	156
Alma	1996	1	Lázaro Cárdenas Mich.	20-27 junio	975	81	150
Pauline	1997	3	Puerto Angel Oax.	6-10 octubre	957	98	182
Nora	1997	2	B. Tortugas B.C.S; P. Canoas B.C.N	16-26 septiembre	972	84	156
Rick	1997	1	Puerto Escondido Oax.	7-10 noviembre	981	74	137
Isis	1998	1	Los Cabos B.C.S.; Topolobampo Son.	1-3 septiembre	989	65	120
Madeline	1998	1	No toco tierra	16-20 octubre	984	71	132
Greg	1999	1	San Jose del Cabo B.C.S.	5-9 septiembre	986	65	120
Hilary	1999	1	No toco tierra	17-21 septiembre	987	65	120
Juliette	2001	3	4 impactos en B.C.S y 2 en Son. y B.C.N	31sept.- 3 oct.	948	99	183
Kenna	2002	4	P. Vallarta Jal. ; San Blas Nay.	21_25 octubre	942	117	217
Marty	2003	1	Cabo San lucas y La paz B.C.S.	18-24 septiembre	987	71	131
Ignacio	2003	1	La Paz B.C.S.	22-27 agosto	984	78	144
Promedio de 1992 al 2003					965	88	151

Sin embargo, en la **Tabla 3** se muestra que los meses más intensos en todas las temporadas de ciclones tropicales son **septiembre y octubre**, presentando entre ambos 18 eventos de 24, lo cual corresponde al 75% de todos los huracanes en los últimos 12 años. De igual forma, **Jáuregui (2003)** muestra que durante el periodo de 1951 al 2000 los meses más intensos de todas las temporadas fueron **septiembre y octubre**. **Gutiérrez y Mayer (2004)**, con un registro completo de tormentas tropicales y huracanes para el periodo de 1949 al 2001, comenta que el mes con mayor frecuencia de huracanes es **septiembre**.





**Figura 5.-** En el panel superior se presenta la gráfica de años contra velocidad tangencial y en el panel inferior la gráfica de presión promedio individual contra velocidad promedio individual.

En la **Figura 5** se muestra la media de la velocidad del viento de todos los ciclones tropicales seleccionados. En esta gráfica los valores de velocidad son obtenidos por medio del promedio individual de la velocidad tangencial para cada uno de los sistemas seleccionados durante el periodo de vida de cada ciclón. A su vez, el promedio de estos valores es de 150 km/h. De los 24 ciclones tropicales que fueron seleccionados, el 45.8 % de estos están sobre la media y el 54.2% se encuentra por debajo de la media. Además, se puede observar que en los años de 1992, 1995, 1996, 1997, 2001 y 2002 se presentaron por lo menos uno o dos ciclones tropicales con

velocidades promedio arriba de la media, y ninguno alcanzó la categoría 5 de la escala Saffir-Simpson. La **Figura 5** también muestra la velocidad tangencial de los huracanes en función de la presión mínima registrada. Como se puede apreciar, ambas variables son inversamente proporcionales.

**Tabla 4-** Frecuencia de ciclones que han tocado tierra en estados de las costas mexicanas del Pacífico Oriental

Estado	Frecuencia con la que tocan tierra los huracanes durante los últimos 12 años	Categorías que han tocado los estados.
Colima	1	2
Jalisco	2	4,1
Michoacán	1	2
Sonora	4	3,2,1, 3
Baja California Norte	2	3,2
Baja California Sur	7	1,2,2,1,3,1
Nayarit	1	4
Sinaloa	1	2
Oaxaca	1	3

En la **Tabla 4** se muestra el número de ciclones que tocaron tierra en las costas mexicanas, teniendo a los estados de Baja California Sur, Sonora y Baja California, como los más afectados. El estado de Baja California Sur es el más afectado por éste tipo de eventos, con un número de 7. Es importante mencionar que Allard y Peterson

(1987) reportan la tendencia a que estos fenómenos modifiquen su trayectoria en una zona localizada al sur de la península de Baja California, donde inician su recurvamiento hacia el norte-noreste.

#### **4. Casos especiales con recurvamiento**

Los casos especiales que se analizan en este trabajo son los huracanes que presentaron en su trayectoria una fuerte modificación (recurvamiento). El objetivo es entender las causas de dicho comportamiento, el cual es un factor importante para el estudio de las trayectorias promedio de los ciclones, así como para su posible pronóstico.

Los ciclones seleccionados que se comparan a continuación presentan tanto una trayectoria curva hacia el continente, como una trayectoria casi recta en la dirección noroeste. Específicamente, se analizan dos casos en una misma temporada en la que la trayectoria de ambos ciclones coincidió aproximadamente. De esta manera, se hizo el seguimiento de cada caso en los días posteriores con la finalidad de apreciar la diferencia en las variables meteorológicas que determinaron que unos de los ciclones recurvara y el otro no.

**Tabla 5.-** Casos especiales durante el periodo de 1992 al 2003

<b>Nombre</b>	<b>Año</b>	<b>Duración</b>	<b>Categoría</b>
<b>Lester</b>	1992	20 al 24 de agosto	1
<b>Fausto</b>	1996	10 al 14 de septiembre	2
<b>Kenna</b>	2002	22 al 26 de octubre	4

Los ciclones tropicales que denominamos especiales se encuentran en la **Tabla 5**. Se tienen tres ciclones que recurvan: Lester 1992, Fausto 1996 y Kenna 2002, y dos que no recurvan: Douglas 1996 y Hernan 2002.

#### **4.1 Fausto y Douglas (1996)**

La temporada de ciclones de 1996 presentó en total nueve eventos, teniendo 4 huracanes y 5 tormentas tropicales. La mayoría de ellos tuvo la tendencia a seguir una trayectoria hacia el noroeste, excepto por algunos casos. Los huracanes Fausto (10-14 de septiembre) y Douglas (25 de julio-6 de agosto) fueron seleccionados debido a que Fausto presenta un claro recurvamiento, mientras que Douglas no recurva (**Figura 6**). Estos huracanes se presentaron con diferencia de un mes. La comparación de dichos casos es importante debido a que tuvieron una posición geográfica muy similar en una etapa de su trayectoria: ambos se encontraban alrededor de los 105° W, 17° N los días 11 de septiembre (Fausto) y 28 de julio (Douglas). A partir de ahí Fausto recurvó hacia el continente y Douglas prosiguió su deriva hacia el noroeste.

La depresión tropical Fausto se formó el 10 de septiembre de 1996. A las 0000(UTC) del día 10 se localizaba aproximadamente a 200 millas náuticas al sureste de Manzanillo, Colima, y comenzó a moverse paralela a la costa aproximadamente a 10 nudos ó 18 km/h durante los tres días siguientes. El 10 a las 1800(UTC) de depresión tropical pasó a ser tormenta tropical, y para el 11 a las 1200 (UTC), se convirtió en huracán, con vientos aproximados de 105 nudos ó 194 km/h y una presión mínima de aproximadamente 955 mb. Del día 12 al 13 este presentó cambios en su trayectoria hacia el noreste, con rumbo a la península de Baja California (**Figura 7**). A las 2000(UTC) del 13, tocó tierra cerca de Todos Santos, Baja California Sur, cruzando la península. Diez horas más tarde tocó tierra cerca de Los Mochis, Sinaloa, debilitándose y desapareciendo el 15 sobre la Sierra Madre.

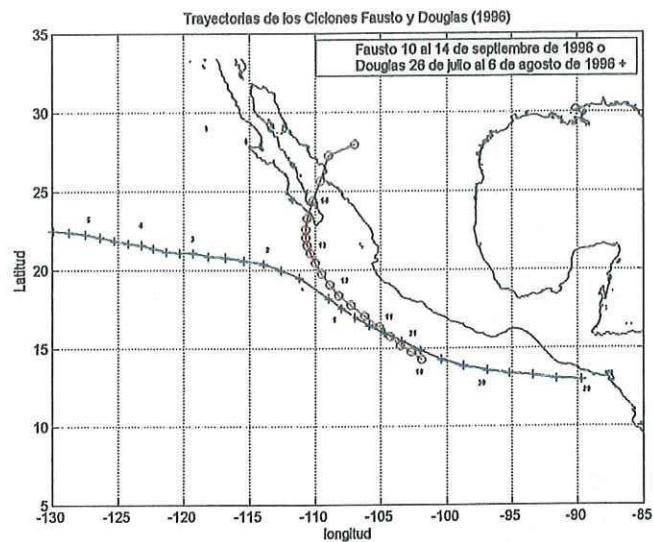
La tormenta tropical Douglas se formó el día 21 de julio, como resultado del cruce del huracán Cesar por Centro América. Doce horas más tarde Douglas pasó a ser huracán, el cual desarrolló una trayectoria rumbo al oeste con vientos aproximados de 115 nudos ó 212 km/h y una presión mínima de 946 mb (**Figura 8**). El huracán Douglas nunca tocó tierra, y a las 0000 (UTC) del 6 de agosto dicho sistema se disipó en el Océano Pacífico.

Para analizar el comportamiento de Fausto y Douglas, se presentarán mapas de alturas geopotenciales a los 500 mb y 1000 mb; (aproximadamente 5.5 km y 1 km de altura, respectivamente). En estos mapas se hará referencia a los centros semipermanentes de presión mencionados en el Capítulo 1: la alta presión del pacífico (**APP**) y la alta presión del atlántico (**APA**).

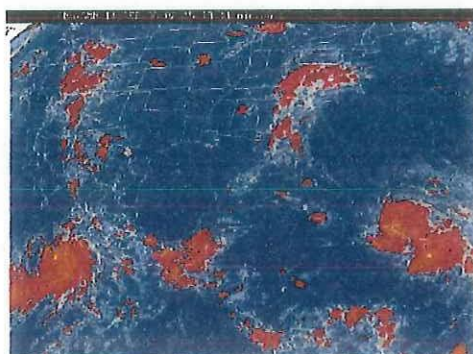
En la **Figura 9 (a)** se muestra el mapa de 500 mb y los vectores de viento asociados del día 13 de septiembre de 1996. Dentro del mapa se tiene la trayectoria del huracán Fausto del día 10 al 14 de septiembre. La característica más evidente es la presencia de un flujo intenso hacia el este, situado al norte de los 25-30° N. Como se puede apreciar, este flujo presenta una pequeña saliente que genera una barrera que desvía la trayectoria del ciclón hacia el norte-este.

En la **Figura 9 (b)**, se presenta el mapa de 500 mb correspondiente a Douglas, cuya trayectoria se grafica del 29 de agosto al 5 de julio. En este caso se logra apreciar a la APA localizada aproximadamente a 105°W, 37°N. sobre el continente americano. Este sistema de alta presión no permite que Douglas cambie su trayectoria, si no que, por el contrario, induce su desplazamiento hacia el oeste.

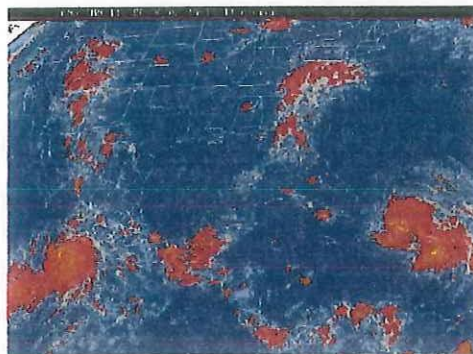
Las **Figuras 10 a) y b)** muestran los mapas de altura geopotencial a 1000 mb de Fausto y Douglas, respectivamente. Aunque a esta altura la circulación atmosférica es más débil que a los 500 mb, se puede notar aún la influencia de los centros semipermanentes de presión en el comportamiento de los ciclones. En el caso de Fausto (**Figura 10 a)**) se observa que el huracán es confinado entre la APP al oeste y la APA al norte-este. Al parecer, este arreglo induce la deformación de los contornos de presión en la dirección meridional, (aproximadamente a los 112° W) contribuyendo a la desviación de su trayectoria hacia el norte los días 13 y 14 de septiembre. En el caso de Douglas (**Figura 10 b)**) no se logra apreciar una clara influencia de la circulación de gran escala a esta altura en su trayectoria, por lo que se puede suponer que su comportamiento está determinado por las capas superiores.



**Fig. 6-** Mapa con las trayectorias que desarrollaron los huracanes Fausto y Douglas de la temporada 1996.

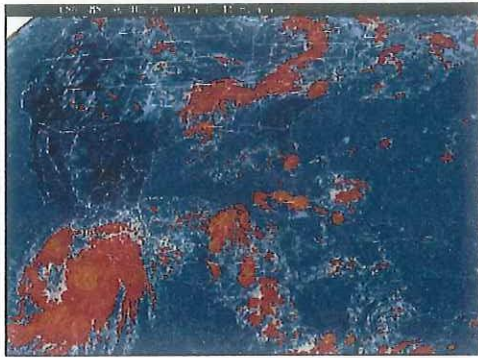


a)

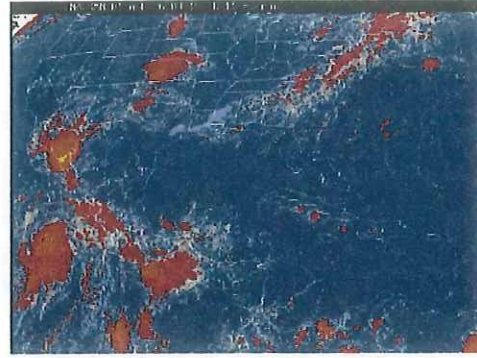


b)

**Figura 7-** Imágenes de satélite del Huracán Fausto a) 11 de septiembre y b) 13 de septiembre de 1996.

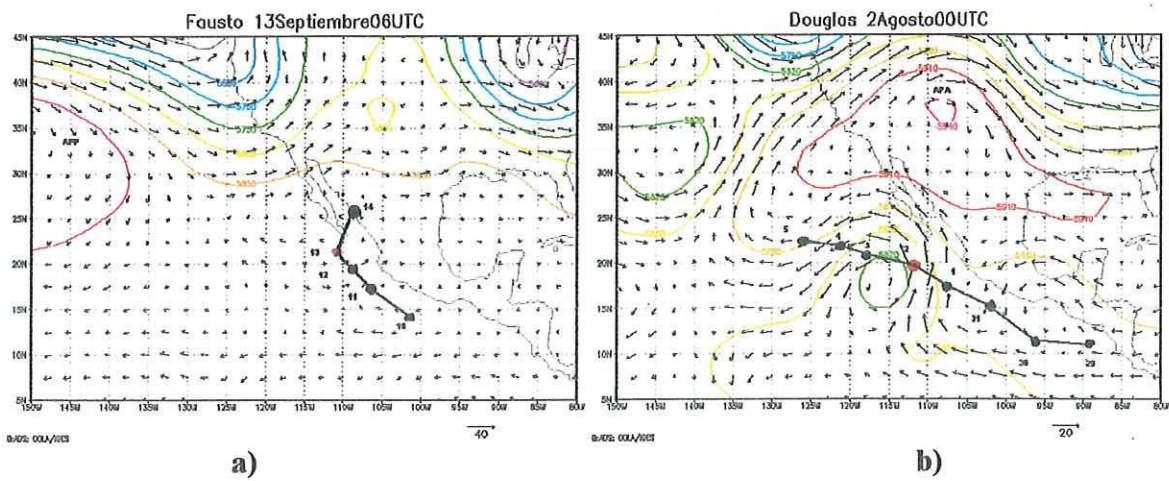


c)



d)

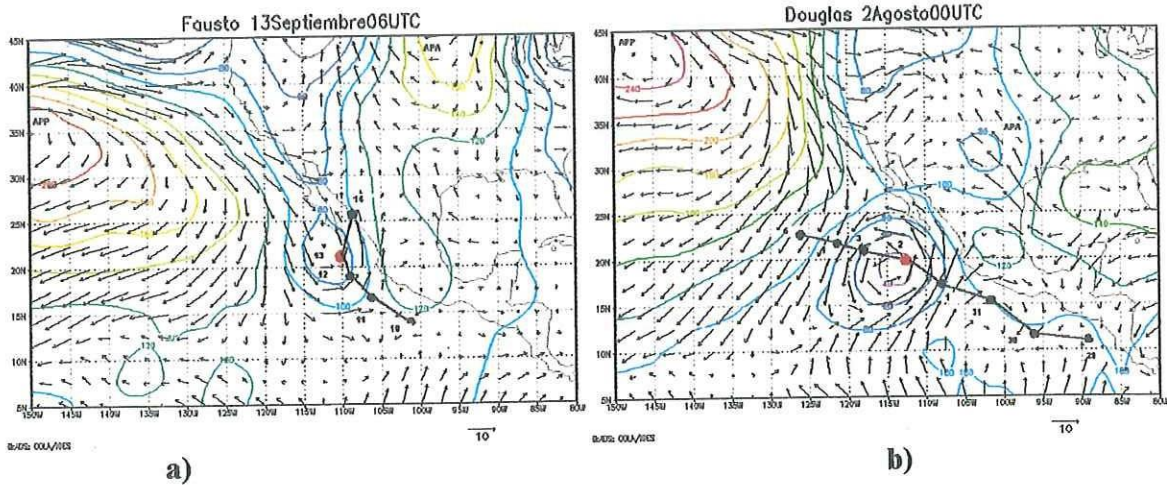
**Figura 8-** Imágenes de satélite del Huracán Douglas c) 30 de julio y d) 01 de agosto de 1996.



a)

b)

**Fig. 9-** Contornos de altura geopotencial y vectores de viento a 500 mb, para Fausto (a) del día 13 de septiembre de 1996 a las 0600 UTC y Douglas (b) del día 2 de agosto a las 0000 UTC.



**Fig. 10-** Contornos de altura geopotencial y vectores de viento a 1000 mb, para Fausto **(a)** del día 13 de septiembre de 1996 a las 0600 UTC y Douglas **(b)** del día 2 de agosto de 1996 a las 0000 UTC.

#### 4.2 Kenna y Hernan (2002)

La temporada de ciclones del 2002, presentó 12 eventos en total, siendo seis de ellos huracanes, y seis tormentas tropicales. Los casos seleccionados para esta temporada fueron Kenna (22-26 de octubre) y Hernan (30 de agosto al 6 de septiembre). Kenna fue un huracán bastante intenso cuya trayectoria mostró un significativo recurvamiento, mientras que Hernan prosiguió su deriva al noroeste (**Figura 11**). Ambos ciclones transitaron alrededor de 108°W, 16°N el 24 de octubre (Kenna) y entre el 31 de agosto y el 1° de septiembre (Hernan).

La depresión tropical Kenna se formó el 22 de octubre del 2002. A las 0000 (UTC) se localizaba aproximadamente a 325 millas náuticas al sur de Acapulco, Guerrero. La depresión tropical se empezó a mover con dirección oeste, presentando un cambio el 22 a las 0600 (UTC), al convertirse en tormenta tropical. El 23 a las 1800 (UTC) pasa a ser huracán, mostrando en las siguientes 18 horas un cambio importante en su trayectoria, la cual se modificó abruptamente con rumbo noreste, con dirección hacia el estado de Nayarit (**Figura 12**). El 25 a las 1630 (UTC) el huracán Kenna tocó tierra, provocando daños a las zonas aledañas. Para el 26 Kenna penetró tierra adentro y comenzó a debilitarse hasta desaparecer.

La tormenta tropical Hernan se desarrolló el día 30 de agosto del 2002 a 340 millas náuticas, al sur-sureste de Manzanillo, Colima. A partir del 31 de agosto a las 00 (UTC), dejó de ser tormenta tropical para convertirse en huracán. La trayectoria de Hernan fue básicamente con dirección noroeste, presentando vientos aproximados de 68 nudos ó 125 km/h, y una presión mínima de 984 mb (**Figura 13**). A las 0000 (UTC) del día 4 de septiembre el huracán se debilitó hasta convertirse de nuevo en tormenta tropical, y para el día 6 de septiembre a las 0000 (UTC) se disipó sobre el Océano Pacífico.

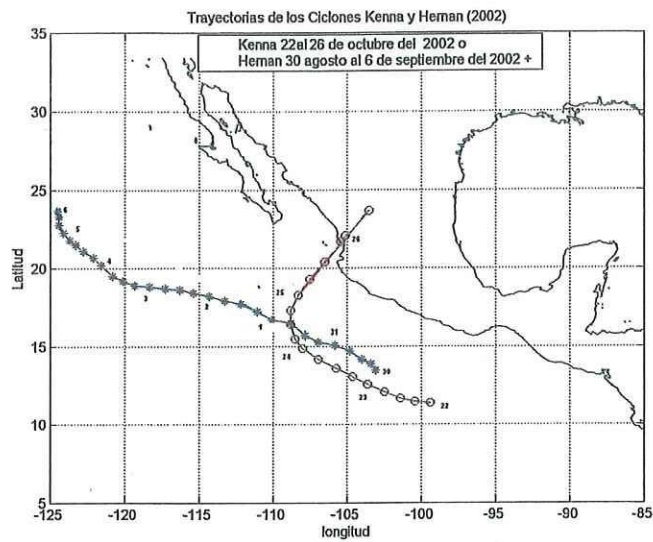
La **Figura 14 a)**, muestra la altura geopotencial de los 500 mb del día 24 de octubre del 2002, fecha en la que el huracán Kenna sufrió una sensible desviación en su trayectoria. Claramente, se observa un flujo intenso definido con dirección este, al norte de los 25°, el cual también se puede notar en la imagen de satélite mostrada en la (**Figura 12 b)**), del 25 de octubre.

Dicho flujo presenta una saliente (centrada a los 115°W, aproximadamente) que hace la función de barrera, haciendo que Kenna recurva. Al parecer, la intensidad de la saliente provoca un posible arrastre del ciclón, dando como resultado la desviación de la trayectoria. Este mecanismo de recurvamiento al noroeste es análogo al observado en el huracán Fausto en la sección anterior. A partir de estos dos ejemplos, se puede establecer que cuando el centro del huracán se encuentra a 500-800 km de la saliente del flujo al este, se produce el cambio de trayectoria hacia el continente.

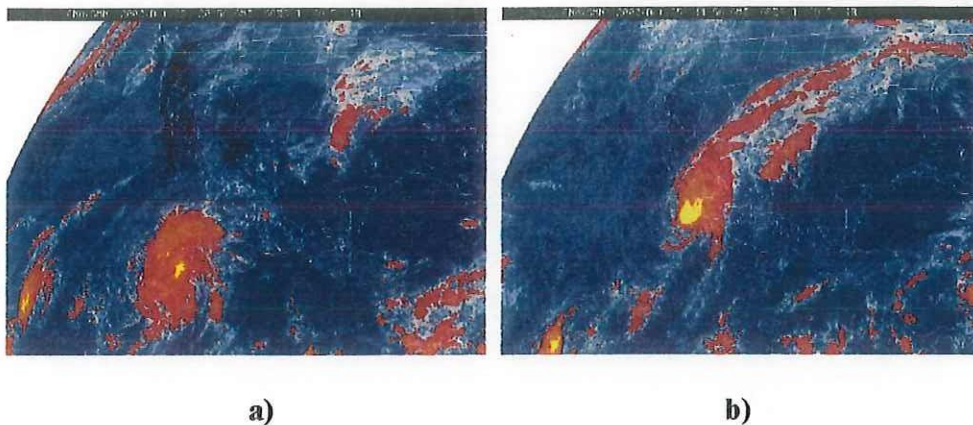
En la **Figura 14 b)** se presenta la altura geopotencial de los 500 mb del día 2 de agosto, junto con algunos puntos de la trayectoria del huracán Hernan. Se puede apreciar la **APA** localizada entre los 110°W, 35°N al sur de los EEUU, la cual provoca que Hernan se desplace a lo largo de la línea de alta presión, obstruyendo el paso hacia el norte. A diferencia del caso anterior, la **APA** genera un flujo hacia el Oeste que refuerza la trayectoria original del ciclón.

Las **Figuras 15 a) y b)** presentan los mapas de altura geopotencial a 1000 mb de Kenna y Hernan. A esta altura la circulación atmosférica es más débil en comparación con los 500 mb. En dichas figuras se aprecia la influencia de los centros de alta presión semipermanentes en el desarrollo de los ciclones. En Kenna (**Figura 15 a)**) se observa al ciclón confinado por la **APP** al oeste y la **APA** al norte-este. Las posiciones que presentaron dichos centros de alta presión, es posible que contribuyan a la desviación de su trayectoria hacia el norte los días 23 y 24 de octubre. En el caso de Hernan (**Figura 15 b)**) no es posible observar la influencia de la circulación de

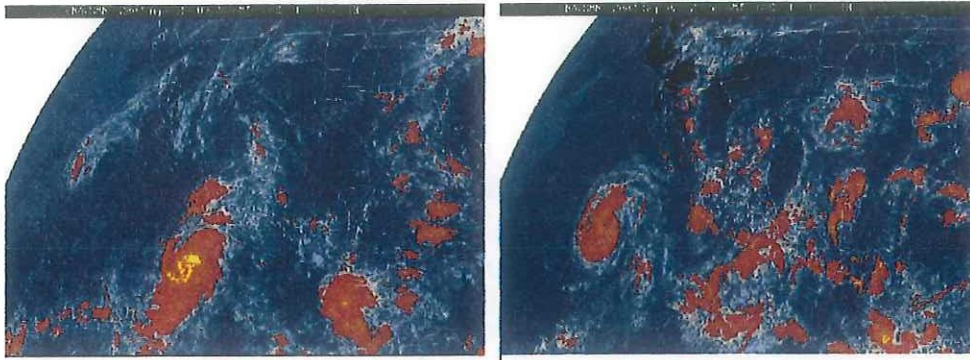
gran escala a esta altura, por lo que se tiene que su comportamiento es determinado por las capas superiores.



**Fig. 11-** Mapa con las trayectorias que desarrollaron los huracanes Kenna y Hernan de la temporada 2002.

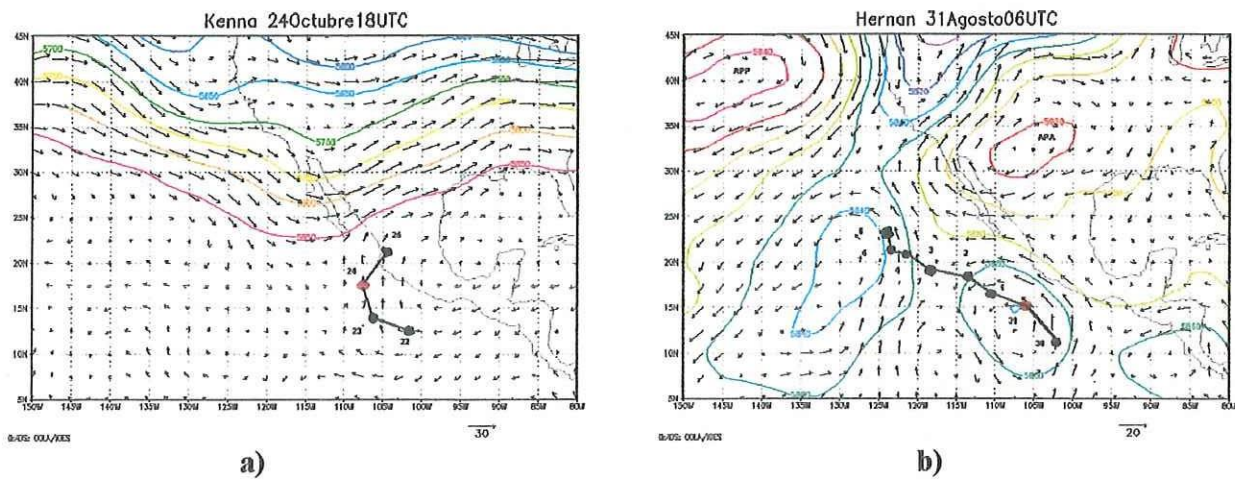


**Figura 12-** Imágenes de satélite del Huracán Kenna a) 23 de octubre y b) 25 de octubre de 2002.



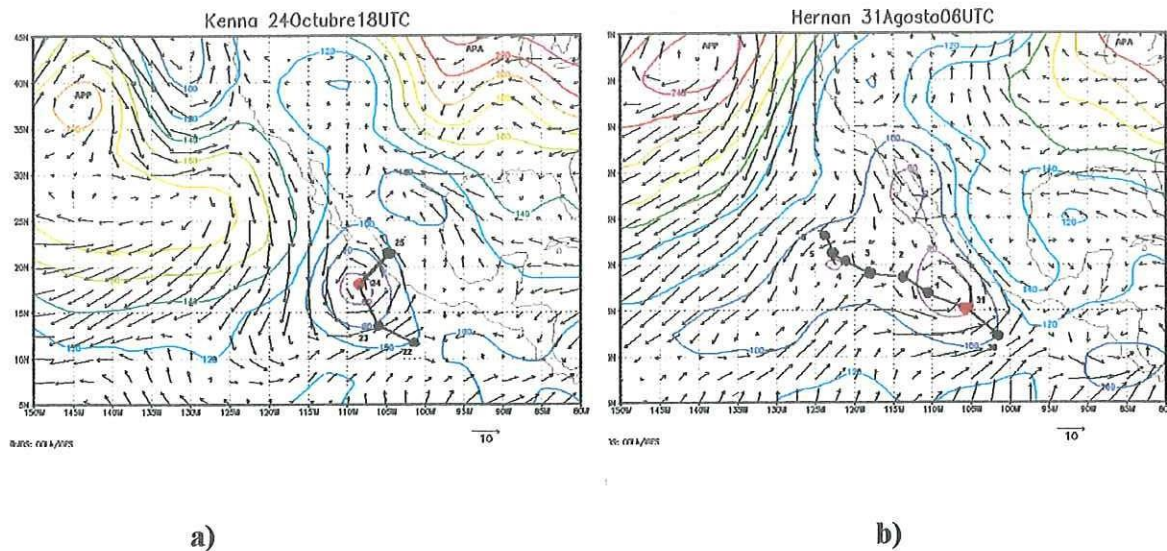
c) d)

Figura 13-. Imágenes de satélite del Huracán Hernan a) 30 de agosto y b) 02 de octubre del 2002.



a) b)

Fig. 14 -. Contornos de altura geopotencial y vectores de viento a 500 mb, para Kenna (a) del día 18 de octubre del 2002 a las 18UTC y Hernan (b) del día 31 de agosto del 2002 a las 0600 UTC.



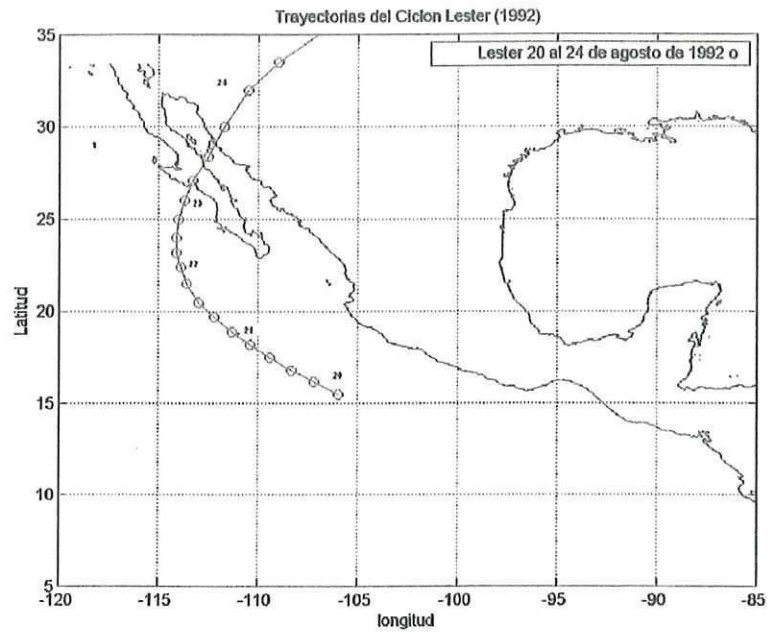
**Fig. 15-** Mapas de alturas geopotencial a 1000 mb, para Kenna **(a)** del día 18 de octubre del 2002 a las 18UTC y Hernan **(b)** del día 31 de agosto del 2002 a las 0600 UTC.

#### 4.3 Lester (1992)

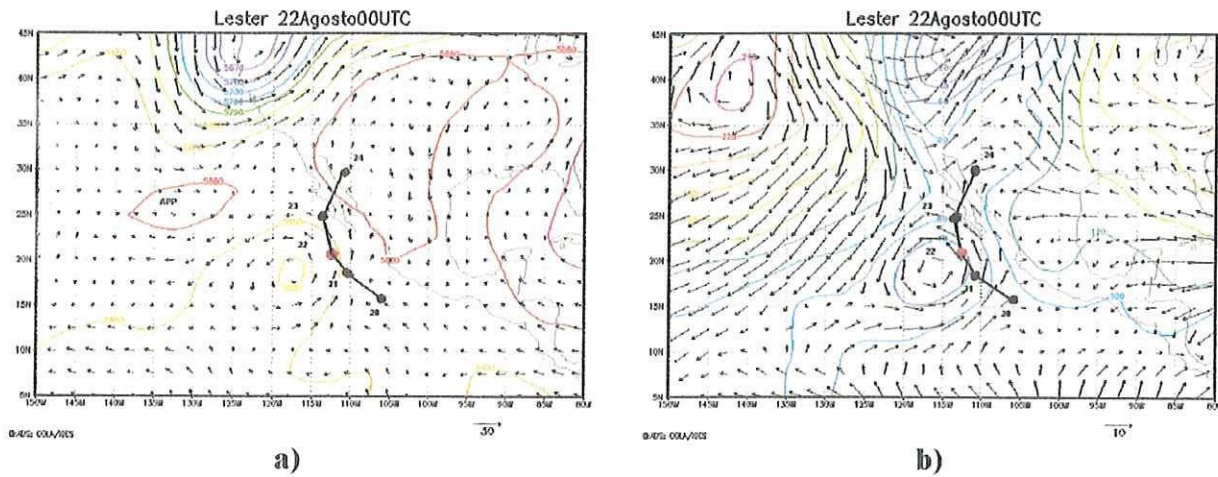
Como caso complementario de los ciclones tropicales que recurvaron se muestra al huracán Lester, cuya trayectoria se presenta en la **Figura 16**. La depresión tropical Lester se formó el 20 de agosto de 1992. A las 0000 (UTC) se localizaba a 240 millas náuticas al sur-suroeste de Manzanillo, Colima. Se empezó a mover hacia el noroeste aproximadamente a 13 nudos ó 24 km/h, y para las 1800 (UTC) del mismo día, se intensificó, pasando de depresión tropical a tormenta tropical, situada a 120 millas náuticas de la isla Socorro, Baja California Sur. Para el 21 y 22 de agosto, Lester continua como tormenta tropical, presentando un cambio en su trayectoria hacia la península de Baja California. El 22 a las 1800 (UTC) deja de ser tormenta tropical y pasa a ser huracán presentando vientos aproximados de 75 nudos ó 138

km/h y una presión mínima aproximada de 977 mb. Para las 1000 (UTC) del 23, el huracán Lester toca tierra cerca de Punta Abreojos, Baja California Sur, atravesando toda la península y el mar de Cortez. Cerca de la Isla tiburón, ya como depresión tropical, comenzó a debilitarse y para las 1800(UTC) del 24 de agosto se disipó por completo.

En la **Figura 17 a)** se observa el campo de altura geopotencial de 500 mb, junto con el campo de velocidad asociado. De nueva cuenta, se tiene un fuerte flujo hacia el este, el cual presenta una lengua de intensidad alta que sirve como barrera en la trayectoria de Lester, haciendo que recurva. Nótese que, de manera similar al caso de Fausto, la saliente del flujo al este se presenta a mayor latitud que para el caso de Kenna. Como consecuencia, el recurvamiento del ciclón se presenta más hacia el norte. La **Figura 17 b)** muestra el mapa correspondiente a los 1000 mb. Se observan los dos centros de alta presión semipermanentes, alta del pacífico (APP) y alta del atlántico (APA). Es importante subrayar que estos sistemas cercanos a la superficie tienen una influencia relativamente menor sobre la trayectoria de los ciclones, por ser menos intensos. Sin embargo la circulación de ambos tiende a generar una zona de estiramiento, por la cual el ciclón pasa y es fuertemente deformado. Como resultado, el centro de baja presión que constituye al ciclón original es confinado a una región elongada meridional entre los dos sistemas de alta presión.



**Fig. 16.-** Mapa con la trayectoria que desarrolló el huracán Lester de la temporada 1992.



**Fig. 17.-** Contornos de altura geopotencial a 500 a) y 1000 b) mb, para Lester del día 22 de septiembre de 1992 a las 00UTC.

## **5. Efectos de los ciclones que recurvaron en las costas mexicanas del Pacífico Nororiental**

La precipitación es un parámetro meteorológico importante para cualquier población en el mundo ya que promueve el desarrollo y crecimiento de diversas actividades que son indispensables para el hombre como la agricultura, el aumento en los niveles de las presas, etc. México cuenta con amplias zonas de costas y grande extensiones de tierra, en donde la precipitación juega un papel importante. En el presente trabajo nos enfocamos a la importancia de eventos extremos como lo son los ciclones tropicales en el Pacífico Nororiental, debido a que la precipitación que traen consigo tiene una gran penetración continental y gran permanencia aun bajo condiciones de disipación del ciclón (Cerdea *et al.*, 2001).

Los ciclones tropicales que afectan a las costas mexicanas son sistemas que representan un factor importante en el aporte de lluvia en los estados que son afectados con frecuencia. En esta sección se presentan los datos de precipitación y daños provocados por los casos especiales de 1996 (Fausto y Douglas), y 2002 (Kenna y Hernan).

### 5.1. Precipitación asociada con los casos especiales.

Para tener un panorama general de los datos recientes de lluvia en la República Mexicana, la **Tabla 6** presenta la precipitación mensual y anual durante el periodo 1992-2003, de acuerdo al SMN. En azul se encuentran señalados los meses en los cuales se produjeron los ciclones tropicales seleccionados SMN. También se presenta la climatología mensual y anual correspondiente (Último renglón). La **Tabla 7** presenta el promedio individual de precipitación para los casos especiales de 1996 y 2002 de acuerdo con los cuatro días en que fueron más intensos y se acercaron al continente (Tercera columna). A su vez, se tiene el porcentaje de precipitación que aportaron anualmente y durante el mes en el que el ciclón se desarrolló (Quinta y séptima columna, respectivamente). En el caso de Fausto se tomaron los datos de precipitación del 10 al 13 de septiembre, periodo en el que el sistema aportó 46.9 mm de lluvia, que representan el 7 % anual en la temporada de 1996 y el 32.1% para la climatología del mes de septiembre.

Para el caso de Douglas se tomaron del 31 de julio al 3 de agosto y durante los cuatro días el sistema aportó 29.2 mm de lluvia a territorio mexicano, siendo estos el 4.3% anual en la temporada de 1996 y el 20.9% de la climatología del mes de agosto. Por lo tanto, el huracán Fausto, que recurvió hacia el continente, aportó mayor cantidad de lluvia que Douglas, el cual prosiguió su deriva al noroeste. Respecto a la temporada 2002, el periodo considerado para Kenna fue del 22 al 25 de octubre, cuyo aporte de precipitación fue de 31.0 mm que es el 4.1% anual de la temporada

y el 37.8% para la climatología del mes de octubre. Para el caso de Hernan de la misma temporada, pero en el periodo del 30 de agosto al 3 de septiembre, se tiene que el aporte de precipitación fue de 33.5 mm que es el 4.5% anual y el 22.9% para la climatología del mes de septiembre. En contraste con el caso anterior, donde el periodo del ciclón Hernan, que no tocó tierra, se registró aparentemente una cantidad mayor de lluvia que en el de Kenna.

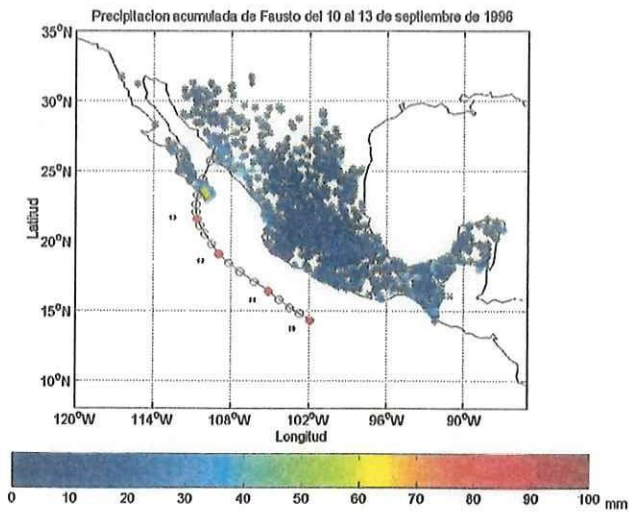
Lo anterior puede ser mejor comprendido con las **Figuras 18 y 19**, en donde se presentan mapas de precipitación de todas las estaciones meteorológicas de la República Mexicana indicadas con un asterisco, en donde el color representa la cantidad de precipitación aportada durante el periodo seleccionado. Cabe mencionar que sólo se tomaron en cuenta las estaciones que reportaron algún valor de precipitación, es decir, se desecharon aquellas donde no se registró ninguna medición. También se presenta la trayectoria de cada caso, señalando en color rojo los días en los que se consideraron datos de lluvia. Para los ciclones de 1996 se promediaron cuatro días de datos, mientras que para los del 2002 se usaron tres días. Como se puede observar en la **Figura 18**, tanto Fausto como Douglas aportaron gran precipitación en los puntos localizados en el extremo sur de la Península de Baja California y el estado de Colima, respectivamente. En la temporada 2002, (**Figura 19**) Kenna también aportó una considerable precipitación puntual al tocar el continente sobre Nayarit y Jalisco. La alta precipitación durante el periodo de Hernan, está al parecer asociada con otros sistemas convectivos al suroeste de México. (ver **Figura 13** del día 02 de septiembre).

**Tabla- 6** Precipitación anual y mensual en la República Mexicana de 1992 al 2003.

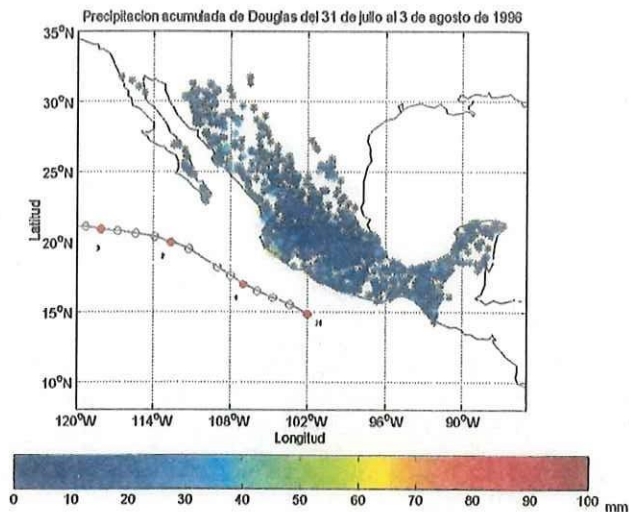
Mes													
Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
1992	86.2	30.5	19	26.6	51.6	69.1	130	132.1	124.7	74.2	39.1	26.2	809.3
1993	43.2	15.3	14.2	15.8	34.2	133	117.6	164.1	204	70.4	33	14.4	859.6
1994	25.5	13.7	13.7	18.9	23	70.7	102	153.2	129.2	79.4	43.8	45.1	718.2
1995	22.6	22.6	16.2	18.3	38.6	89.1	122.5	179.4	127.4	66.5	35.4	28.2	766.8
1996	5.9	6	8.5	15.9	23.4	104	112.9	165.9	114.9	66.8	26.5	12.2	664.4
1997	16.8	15.8	28.3	38.5	39.6	75	105.6	103.3	115.7	77.1	51.5	24.9	692.1
1998	12.2	16	12.8	6.4	7.6	68.9	138.7	139.2	172.5	112	43.6	11.1	741
1999	8.4	8.2	11.7	14	25.1	126	154.5	138	150.1	80.7	18.6	18.4	754.1
2000	11.6	11.4	14.3	14.7	68.9	140	99.1	130	124.6	92.2	37.3	20.7	765.2
2001	14.8	24.2	18	23.7	53.2	89.9	135.1	139.2	146.2	74	24.4	23.4	766.1
2002	14	29.6	7.8	8.6	31.2	102	135.5	99.2	168.3	81.7	44.1	16.8	738.9
2003	13	18.9	12.5	10.1	34.3	115	133.8	133.7	172.8	107.7	33.8	10.5	796.1
Climatología mensual (mm)	22.85	17.683	14.75	17.6	35.9	98.6	123.9	139.8	145.8667	81.892	35.925	20.9917	755.9833

**Tabla- 7** Promedios de precipitación anual e individual de los casos seleccionados, y el porcentaje de lluvia que aportaron anualmente y a la climatología de 1992 al 2003.

Año	Nombre del sistema	Promedio individual en 4 días (mm)	Promedio anual (mm)	Porcentaje anual asociado con el ciclón	Climatología de 1992 al 2003, para el mes donde el sistema ocurrió (mm).	Porcentaje individual con respecto a la climatología
1996	Fausto	46.9	664.4	7.0	145.8	32.1
1996	Douglas	29.2	664.4	4.3	139.7	20.9
2002	Kenna	31.0	738.9	4.1	81.8	37.8
2002	Hernan	33.5	738.9	4.5	145.8	22.9

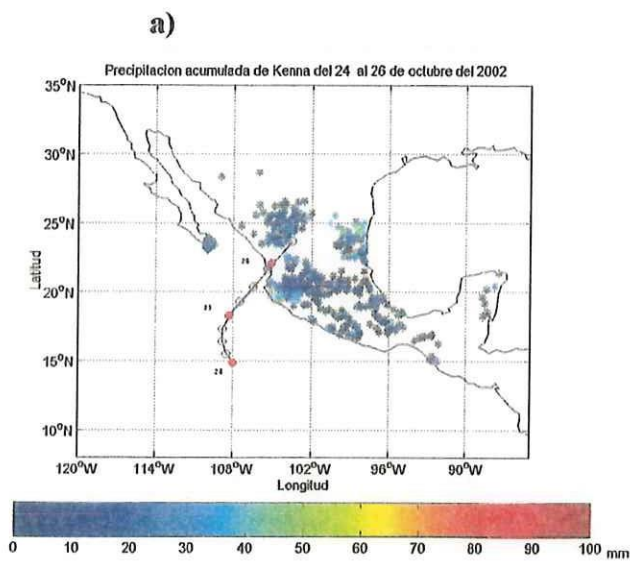


a)

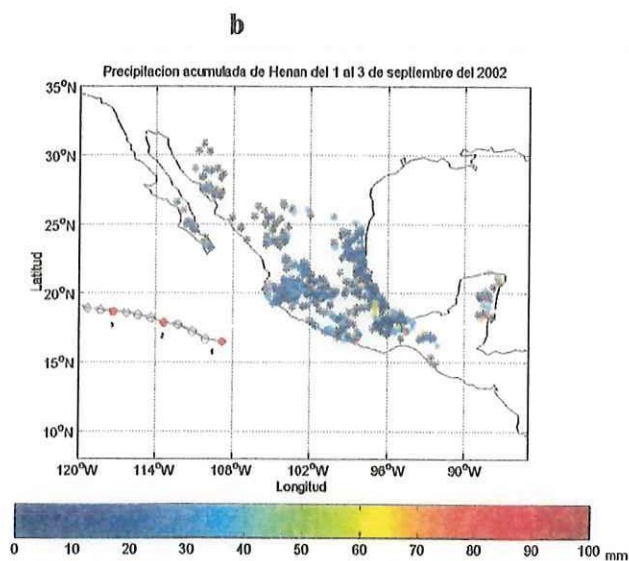


b)

**Fig. 18 -.** Mapas de precipitación para Fausto (a) y Douglas (b) de la temporada 1996.



a)



b)

**Fig. 19 -.** Mapas de precipitación para Kenna (a) y Hernan (b) de la temporada 2002.

## 5.2 Estados afectados.

A lo largo de los años se han presentando ciclones tropicales en las costas mexicanas del Pacífico Nororiental que han repercutido en las poblaciones con abundante lluvia, teniendo como resultado efectos devastadores en algunos estados. Como anteriormente se mencionó, la lluvia provocada juega un papel importante, debido a la magnitud de desastres que puede ocasionar. De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CNA), los estados más vulnerables a los efectos de un ciclón tropical son: Baja California Sur, Michoacán, Sinaloa y Sonora, debido a la existencia de importantes centros de población y asentamientos a lo largo de sus costas (Cerdea *et al.*, 2001). En los estados antes mencionados se tiene que cuatro millones de personas están expuestas a los efectos de los ciclones que toquen tierra, lo que representa el 40% de la población total de dichos estados, ubicadas en 31 municipios costeros.

Cerdea *et al.* (2001) presenta una clasificación de tres grupos de vulnerabilidad para cada entidad federativa de acuerdo con la CNA, en la cual tiene como los estados menos vulnerables: Nayarit, Jalisco, Colima y Baja California, debido a que presentan una mayor dispersión en su población costera, ya que estima que cuatro millones de personas están expuestas a los efectos de ciclones en 176 municipios, siendo el 23.9% del total de la población de dichos estados.

**Tabla-. 8** Ciclones tropicales de 1992 al 2003 que dejaron daños importantes en las costas del Pacífico Nororiental.

Nombre	Duración	Daños Ocasionados	Estados afectados
Fausto	10 al 14 de septiembre de 1996	1 muerte, deslaves y fuertes lluvias	Baja California Sur
Douglas	29 de julio al 6 de agosto de 1996	No presento daños	
Kenna	22 al 26 de octubre del 2002	4 muertes, daños a vivienda y fuertes lluvias	Nayarit y Jalisco
Hernan	30 de agosto al 6 de septiembre del 2002	No presento daños	

La **Tabla 8** muestra un resumen de los daños ocasionados por los ciclones tropicales que fueron seleccionados para este trabajo, en donde se muestra que los estados de Nayarit, Jalisco y Baja California Sur, fueron los más afectados de 1992 al 2003. Cabe hacer notar que en uno de los casos, Kenna (2002), la trayectoria que presentó no fue hacia los estados más vulnerables, de acuerdo con la CNA. Este es sólo un ejemplo de que los estados que no presentan una frecuencia alta de ciclones tropicales en sus costas, no están exentos de fenómenos de grande magnitudes como lo fue Kenna (2002) en el estado de Nayarit.

El estado de Baja California Sur es considerado el más afectado a lo largo de toda la línea de costa del Pacífico Nororiental mexicano debido a que presenta una frecuencia alta de ciclones. El papel que juegan las tormentas extremas producto de los huracanes dentro de los procesos pluviales en Baja California Sur son de suma importancia debido a que esta región se encuentra sujeta a inundaciones extremas, producidas por el escurrimiento que provocan los huracanes. Los ciclones que afectan cada temporada las costas de Baja California Sur son los principales modeladores del paisaje siendo estos considerados como unos de los principales aportes de sedimento.

## **6. Discusión**

En esta tesis se analizaron los ciclones tropicales que afectaron las costas de México durante el periodo de 1992 al 2003 en el Océano Pacífico. La mayor parte de los ciclones presenta un movimiento de traslación hacia el noroeste debido al efecto  $\beta$  (Chan, 1986), aunque algunos de ellos mostraron una fuerte modificación hacia la costa. En particular, se hizo la comparación entre algunos ciclones cuya trayectoria hacia el noroeste fue sensiblemente desviada hacia el continente (Fausto 1996; Kenna, 2002) y otros huracanes que prosiguieron su deriva hacia el Pacífico sin mostrar grandes modificaciones (Douglas, 1996 ; Hernan, 2002). Como caso adicional, se analizó el caso de Lester (1992) cuya trayectoria fue también notablemente curva. Estos ciclones fueron seleccionados debido a que desarrollaron la categoría de huracán aproximadamente en la misma posición geográfica ( Fausto y Douglas, 1996 ; Kenna y Hernan, 2002), lo cual permite hacer una comparación de

vórtices similares, en situación geográfica similar, pero bajo la influencia de diferentes flujos de escalas mayores.

Los ciclones mencionados fueron presentados en las Figuras 9,10, 14, 15 y 17 por medio de los mapas de alturas geopotenciales a 500 y 1000 mb. Los tres ciclones que presentaron modificación en su trayectoria tienen una estrecha relación con el comportamiento de escala sinóptica de la atmósfera a 500 mb, debido a la influencia de los sistemas de alta presión semipermanentes (APP y APA). En las figuras antes mencionadas, se observa la forma en que interactúan los sistemas de alta presión con las trayectorias de dichos ciclones, ya sea para hacerlos recurvar o para permitirles su deriva al noroeste.

La característica principal que provoca la desviación al noreste de los ciclones es un flujo intenso hacia el este, claramente visible en los mapas de 500 mb, el cual presenta una saliente al sur que interacciona con los vórtices analizados. Este mecanismo también fue observado por Farfán y Zehnder (2001) quienes realizaron un cuidadoso análisis del huracán Nora (1997). Este ciclón presentó una desviación de su trayectoria hacia el norte, y tocó tierra en la península de Baja California. A su vez, Allard y Peterson (1987) reportan la tendencia a que estos fenómenos modifiquen su trayectoria en una zona localizada al sur de la península de Baja California. Todos los ciclones antes mencionados han modificado sus trayectorias dentro de dicha zona, pero en diferentes posiciones.

Existen otros mecanismos físicos que pueden inducir la modificación de la deriva hacia el continente. De acuerdo con el trabajo de Zehnder (1993), algunos de los sistemas que se mueven cerca de la línea de costa experimentan un grado de recurvamiento con una componente hacia el este debido a la influencia de la orografía continental. Este mecanismo fue analizado numérica y experimentalmente por Zavala Sansón (2002), y se debe al efecto  $\beta$  asociado con la pendiente de la orografía sobre el continente: cuando se tiene un vórtice ciclónico en presencia de una pendiente topográfica, tiende a moverse cuesta arriba y hacia su izquierda (en relación con su dirección inicial).

En el caso de los ciclones tropicales en el Pacífico la pendiente topográfica está constituida por la Sierra Madre Occidental, por lo que su influencia puede contribuir al recurvamiento hacia el norte-noreste (Zehnder, 1993; Zavala Sansón, 2004). Se debe tomar en cuenta, sin embargo, que este análisis ha sido comprobado en modelos barotrópicos, sin estructura vertical, y en ausencia de flujos de escala sinóptica. Aunque de este trabajo se desprende que el flujo de gran escala es el factor dominante en el recurvamiento de los ciclones, el factor orográfico puede ser un factor adicional que influye en dicho comportamiento.

Los casos que fueron seleccionados, tuvieron diferentes impactos para las zonas costeras de nuestro país. Es importante destacar que la modificación de sus trayectorias no es un factor principal para aportar gran cantidad de precipitación. Se conoce que la lluvia es el efecto de los ciclones más destructivo (Cerdeira *et al.*, 2001), lo cual ocurrió en los casos seleccionados. De los ciclones que recurvaron, Fausto

(1996) fue el que presentó el mayor aporte de lluvia. Sin embargo, este no fue el ciclón que presentó mayores vientos, lo cual significa que no necesariamente tiene que ser más intenso para que el aporte de lluvia sea mayor. Tal es el caso de Kenna (2002), que es el ciclón más intenso del periodo de 1992 al 2003, pero no presenta el aporte de lluvia que hizo Fausto (1996).

El factor de la intensidad del ciclón puede ser visto desde el punto de vista de los daños causados a las zonas por donde pasaron las trayectorias de los casos seleccionados. La lluvia tiene una gran penetración continental y permanencia aún cuando el ciclón se está disipando (Cerde, 2001), lo cual es el factor principal de daños materiales que deja a su paso. Por lo tanto, los ciclones que recurvaron y se introdujeron en el continente causaron daños considerables. Sin embargo, Gutiérrez y Mayer (2004) reportan que existen registros de huracanes que se han encontrado a 250 km de la costa y que han aportado más de 100mm de precipitación, por lo que los daños han sido significativos. El presente trabajo muestra un resultado similar, debido a que Hernan (2002), sin presentar modificación en su trayectoria, fue el segundo ciclón que aportó mayor precipitación en las costas mexicanas.

Las conclusiones de esta tesis son las siguientes:

- La influencia de la circulación general de la atmósfera, su intensidad, forma y arreglo, principalmente a los 500 mb, fueron los factores determinantes para que los ciclones presentados modificaran su trayectoria inicial al noroeste y se desviaran al continente en dirección noroeste.
- El mecanismo básico de recurvamiento es un flujo intenso hacia el este, el cual provoca la desviación de los ciclones en una zona que comprende de los 15° a 25° de latitud norte y los 115° a los 105° de longitud oeste. En ausencia de este flujo, los huracanes tienden a seguir su trayectoria al noroeste, adentrándose al Océano Pacífico sin tocar tierra.
- Se observó que la cantidad de lluvia y potenciales daños en los estados afectados no están necesariamente relacionados de manera directa con la intensidad del huracán ni con su trayectoria. Esto significa que huracanes relativamente poco intensos o que inclusive no tocan tierra, pueden aportar mayor lluvia que otros más intensos y que impacten directamente en el continente.

## **Bibliografía.**

Allard , R. A, y R. E. Peterson, 1987. Characteristics of north-eastern Pacific tropical cyclones. *Revista Geofísica*, **26**, 33-52.

Aguilar, G. 1999. Human settlements and climate change in México – A scenario of regional vulnerability-. En: El cambio climático en México. C. Gray ed., 171-194. INE/PUMA.

Avila, L. A., y J. L. Guiney, 2000. Eastern North Pacific hurricane season of 1998. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 2990–3000

Beven II, L. y L. Franklin , 2003. Eastern North Pacific Hurricane Season of 1999. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1036–1047 pp.

Colling, A. 2001. Ocean Circulation second edition, Ed. Open University, 286 pp.

Chan, J. y R Williams., 1986. Analytical and Numerical Studies of the Beta-Effect in Tropical Cyclone Motion. Part I: Zero Mean Flow . *J. Atmos.*, **Vol. 44**, No. 9, 1257- 1265 pp.

Emmanuel, K.A. 1991. The Theory of Hurricanes. *Annu. Rev. Fluid Mechanic.* **23**, 179-96 pp.

Farfán, M. , J. Zehnder, 2001. An Analysis of the landfalling of Hurricane Nora (1997), *Mon. Weather Review* , **Vol. 129**, 2073-2088 pp.

Gutiérrez, G y L. Mayer, 2004. Huracanes en Baja California, México, y sus aplicaciones en la sedimentación en el Golfo de California, *GEOS*, **Vol. 24**, No. 1, 57-64 pp

Jáuregui, E. 2003. Climatology of landfalling hurricane and tropical storms in México. *Atmósfera*, **16-4**, 193-204 pp.

Pavía E.G. 2004. La influencia de los Ciclones Tropicales en las llluvias del Noroeste de Baja California y Suroeste de California. *GEOS*. **Vol.24**, No 1, 69-72 pp.

Rosengaus, M. 2001. Análisis de la Temporada 2000 de Ciclones Tropicales en México, *Ingeniería Hidráulica en México*, **Vol. XVI**, Núm. 4, 5-23 pp.

Zavala Sansón, L. 2002. Vortex-ridge interaction in a rotating fluid. *Dyn. Atmos. Oceans*, **35**, 299-325 pp.

Zavala Sansón, L. 2004. Trajectories of tropical cyclones near the West Coast of México under the influence of continental topography. *Atmósfera*, **17**, 151-170.

## **Bibliografía de internet.**

[http://148.233.168.204/dgeia/huracanes/en\\_cifras.shtml](http://148.233.168.204/dgeia/huracanes/en_cifras.shtml)

<http://smn.cna.gob.mx/ciclones/tempo2002/crt2002.html>

<http://www.ifremer.fr/pub/ifremer/cersat/tmp>

<http://www.cdc.noaa.gov/Composites/Day/>