

**I. TEXTOS MONOGRÁFICOS:
6. MEDIO AMBIENTE**

LOS CICLONES TROPICALES DE MÉXICO

María Engracia Hernández Cerda
(Coordinadora)

Enrique Azpra Romero

Germán Carrasco Anaya

Orlando Delgado Delgado

Francisco Javier Villicaña Cruz



**TEMAS SELECTOS DE
GEOGRAFÍA DE MÉXICO**

LOS CICLONES TROPICALES DE MÉXICO

I.6.1

María Engracia Hernández Cerda
(Coordinadora)

Enrique Azpra Romero
Germán Carrasco Anaya
Orlando Delgado Delgado
Francisco Javier Villicaña Cruz



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Dr. Juan Ramón de la Fuente
Rector

Lic. Enrique del Val Blanco
Secretario General

Dr. Daniel Barrera Pérez
Secretario Administrativo

Dr. Jaime Martuscelli Quintana
*Secretario de Servicios a la
Comunidad Universitaria*

Dra. Elvia Arcelia Quintana Adriano
Abogada General

Dr. José Narro Robles
Coordinador General de Reforma Universitaria

Dr. René Drucker Colín
Coordinador de la Investigación Científica

INSTITUTO DE GEOGRAFÍA

Dr. José Luis Palacio Prieto
Director

Dra. María Teresa Sánchez Salazar
Secretaria Académica

Dra. Atlántida Coll-Hurtado
Editor Académico

Lic. Mayela Lara Morales
Secretaria Administrativa

Diseño de portada: Laboratorio de Fotomecánica,
Instituto de Geografía, UNAM
Plaza y Valdés, S. A. de C. V.

Responsables de edición: Diana Otero Andrés
Martha Pavón

Revisor de estilo: Eva Saavedra Silva

Primera edición: noviembre del 2001

LOS CICLONES TROPICALES DE MÉXICO I.6.1

© María Engracia Hernández Cerda

© Instituto de Geografía

© Plaza y Valdés, S. A. de C. V.

Derechos exclusivos de edición reservados para todos los países de habla española. Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin autorización escrita de los editores.

Instituto de Geografía, UNAM

Ciudad Universitaria

Del. Coyoacán, C. P. 04510

México, D. F.

www.igeograf.unam.mx

Plaza y Valdés, S. A. de C. V.

Manuel María Contreras núm. 73

Col. San Rafael, C. P. 06470

México, D. F. Tel. 5097-2070

E-mail: editorial@plazayvaldes.com

ISBN: UNAM (Obra General): 968-36-8090-9

ISBN: UNAM 968-36-9546-9

ISBN: 968-856-952-6

HECHO EN MÉXICO

Este libro se publicó con apoyo financiero de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) UNAM. Proyecto: Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIT), No. IN306500. Por este apoyo el Instituto de Geografía expresa su agradecimiento.

ÍNDICE

Presentación	9
Introducción	13
I. Meteorología tropical.....	17
Antecedentes	17
Red mundial de observaciones de ciclones tropicales	26
Designación de nombres a los ciclones tropicales	28
II. Ciclones tropicales	33
Formación de un ciclón tropical (según Simpson y Richl, 1981).....	33
Condiciones meteorológicas para la formación de un ciclón tropical	35
Estructura de un ciclón tropical	36
Ojo del ciclón tropical.....	47
III. Climatología de los ciclones tropicales	49
Zonas ciclogénicas	49
Movimiento de los ciclones tropicales	52
IV. Pronóstico de la trayectoria de los ciclones tropicales	57
Métodos para pronosticar la trayectoria de los ciclones tropicales	57
Predicción numérica	59
Pronóstico estacional en la cuenca del Atlántico	63
Problemas teóricos por resolver	64
V. Efectos de los ciclones tropicales	69
Efectos del viento	69
Efectos del oleaje	73

Efectos de la marea de tormenta (surgencia de tormenta)	76
Efectos de la precipitación	79
Escala Saffir-Simpson de daño potencial	82
VI. Relación de “El Niño” Oscilación del Sur (ENOS) con la entrada de ciclones a México	85
VII. Efectos de los ciclones tropicales en México	93
Crecimiento demográfico de las costas mexicanas	93
Vulnerabilidad de las costas mexicanas	95
Efectos de los ciclones tropicales antes del uso de los satélites	98
Efectos de los ciclones tropicales en los últimos años	102
Vigilancia de los ciclones tropicales en México	104
Recomendaciones generales en caso de un ciclón tropical	105
Glosario	109
Bibliografía	117

PRESENTACIÓN

La población que habita la República Mexicana se ve afectada anualmente de una u otra forma por los ciclones tropicales. Gracias a estos fenómenos, la atmósfera nos deposita una gran cantidad del líquido bendito que el ser humano necesita para su supervivencia. El agricultor vive intensamente la espera del inicio de la época de lluvias, después que ésta tiene lugar, ruega porque un ciclón tropical no genere un exceso de precipitación pluvial que desborde ríos y con ello se pierdan sus futuras cosechas, o bien, venga acompañado con nubes de gran desarrollo vertical y deposite durante su precipitación granizo, lo que también le hará perder su cosecha. En el peor de los casos, si el ciclón tropical es (de características) huracanado, provocará un desastre agrícola total en el área donde se desplace, ya sea por el efecto del viento, el exceso de precipitación y la surgencia que acompaña a este fenómeno, o bien por una combinación de estos tres; es en esta última situación cuando se sufren los efectos más desastrosos, no sólo en pérdidas agrícolas, ganaderas, transporte marítimo, aéreo y terrestre, sino además, en las vías de telecomunicaciones y, lo más lamentable en pérdida de vidas humanas.

No basta un ciclón tropical (de características) huracanado para que la ganadería, los asentamientos humanos y todo tipo de actividades relacionadas con el hombre sufran pérdidas desastrosas, tal y como se ha vivido en nuestro territorio durante los años de 1999, 2000 y 2001 en los estados de Hidalgo, Veracruz, Tabasco y Campeche, en donde una mayor frecuencia de las ondas del este acumuló una gran cantidad de agua en diversas regiones de estas

entidades provocando, además de inundaciones, desgajamiento de los cerros con aniquilamiento de hogares y de compatriotas.

Mientras existe esta continua preocupación en el centro y sur de nuestro país, hacia el norte se espera con gran fervor que penetre una gran cantidad de ciclones tropicales tierra adentro y con ello puedan llenarse las presas, obtener excelentes cosechas y, en general, una actividad agropecuaria adecuada.

En las actividades marítimas se han registrado lamentables sucesos por la presencia de ciclones tropicales, porque conllevan una disminución de la pesca, de la actividad turística y, lo más deplorable, la pérdida de embarcaciones pesqueras que se adentran al interior de nuestros mares sin el equipo de comunicación adecuado para informarse de la presencia de estos fenómenos, como fue el caso del huracán Ismael, que en 1995 originó una pérdida notable de la flota camaronera del Pacífico.

De lo anterior se desprende la importancia del conocimiento que deben poseer nuestros compatriotas sobre estos fenómenos, de ahí el interés de proporcionar este trabajo intitulado *Los ciclones tropicales de México* realizado por expertos nacionales en la materia que día a día viven intensamente los pronósticos numéricos de las trayectorias que siguen estos meteoros, resultados que son emitidos a todas las dependencias nacionales que pueden hacer uso de ellos, así como al Centro Nacional de Huracanes de Miami en Estados Unidos, para recibir el punto de vista analítico de los expertos internacionales.

Este libro consta de una introducción en la que se hace una reseña histórica del conocimiento de estos fenómenos por nuestros antepasados y se muestra la gran necesidad que se tiene de incrementar las observaciones de estos fenómenos para contar con mayor información y que los resultados sean más halagadores mediante el uso de modelos dinámicos que pronostican los cambios meteorológicos, que en la actualidad se están integrando en diversas partes del mundo. Después de una breve introducción, por cierto muy interesante, los autores describen a los ciclones tropicales paulatinamente hasta alcanzar el conocimiento actual que se tiene de los mismos; este proceso lo desarrollan en ocho capítulos.

En el primer tercio de la obra se describe la necesidad del ser humano de observar a la atmósfera para protegerse de los fenómenos atmosféricos que lo afectarán, creándose para tal fin una red mundial de observaciones, cuyos datos diariamente se intercambian como un principio básico para la protección del ser humano, particularizando la red mundial de observaciones de ciclones tropicales, los antecedentes para su formación, así como su estructura y movimiento desde las zonas ciclogénicas.

En el segundo tercio de la obra se plantea el gran problema del pronóstico de la trayectoria de los huracanes con base en los modelos numéricos de la física de la atmósfera y la experiencia del meteorólogo. Se señala que en los últimos años se realiza también un pronóstico estacional del número probable de ciclones tropicales sobre el Océano Atlántico y se analizan los problemas teóricos que están por resolverse.

En el último tercio de la obra se presentan los efectos que generan los ciclones tropicales debido a su intensidad, al oleaje, a la surgencia (marea de tormenta) y a la precipitación, especificándose la vulnerabilidad que existe en la República Mexicana como resultado de la climatología nacional y del incremento de los asentamientos humanos en las zonas costeras. Se establece la relación entre el fenómeno de "El Niño" y los ciclones tropicales en México y se destaca la existencia de un incremento de estos fenómenos en el Océano Pacífico y un decremento en el Océano Atlántico. Finalmente, se proporcionan las medidas de prevención que deben conocer todos los habitantes de nuestras costas

Felicito por su trabajo a los autores: Enrique Azpra Romero, Orlando Delgado Delgado, Francisco Villicaña Cruz y Germán Carrasco Anaya, así como a la coordinadora, María Engracia Hernández Cerda. No dudo que esta obra será para los interesados en la materia un libro básico de consulta.

M. en C. Enrique Javier Buendía Carrera
Jefe de la Sección de Climatología Física y Dinámica
Centro de Ciencias de la Atmósfera-UNAM

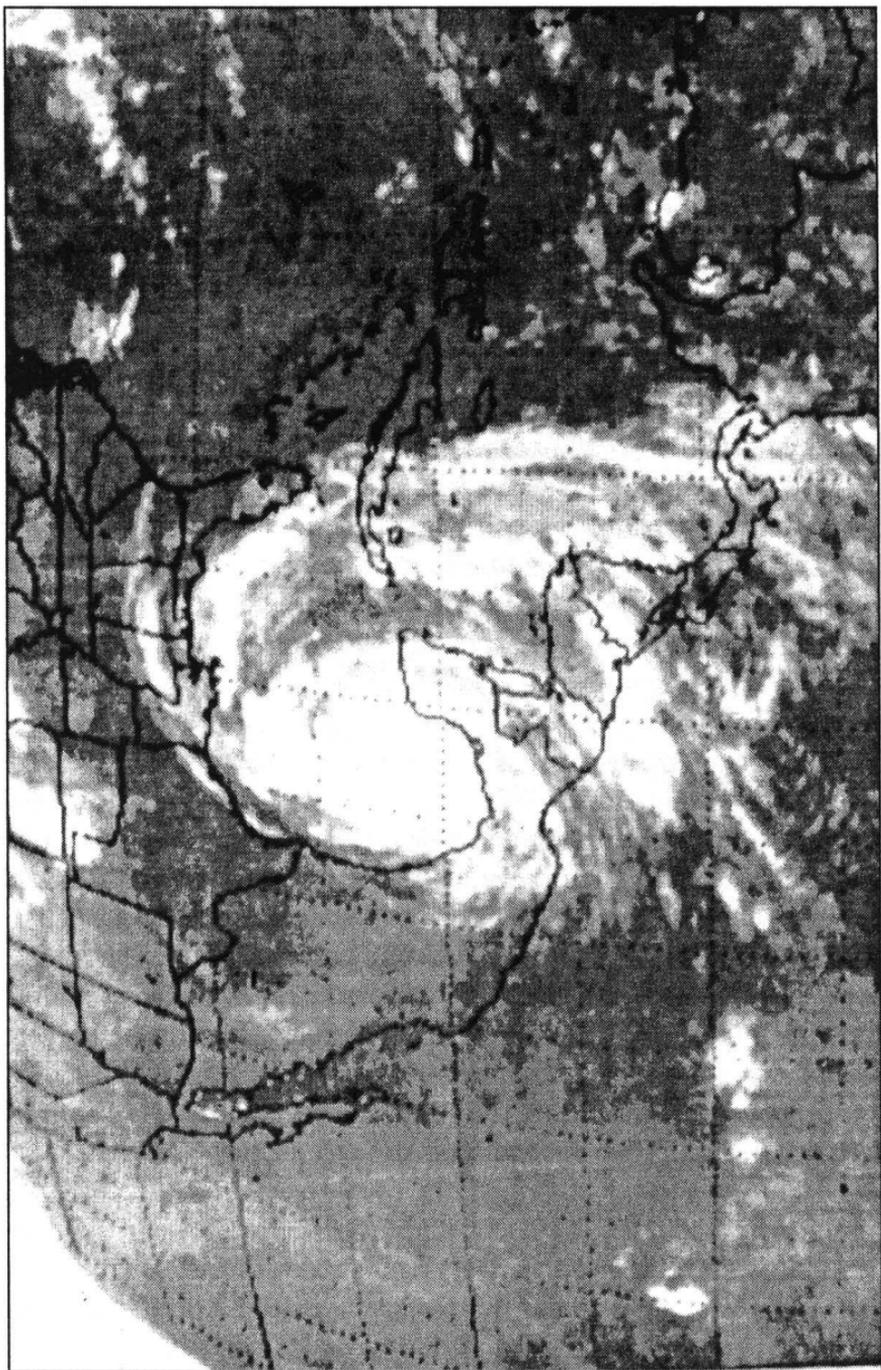


Imagen GOES del huracán Gilbert. 16 de septiembre de 1988.

INTRODUCCIÓN

Los ciclones tropicales son los únicos desastres naturales a los que se les asigna nombre. Gilberto, Pauline y Mitch son ejemplos que recuerdan una particular imagen por los daños que generaron. Estas tormentas presentan características comunes, aunque cada una muestra sus rasgos distintivos. Estos nombres se conocen aun antes de su ocurrencia y posibles efectos, a diferencia de otros fenómenos como los sismos, tornados e inundaciones.

Aunque lo más notorio al paso de un ciclón es el daño que ocasiona (como las pérdidas humanas y materiales), también trae beneficios como el aumento en la precipitación en regiones cuya agricultura depende de la humedad que proporcionan estos fenómenos, así como la recarga en las presas y otros cuerpos de agua.

Ya desde la antigüedad los habitantes del territorio de Mesoamérica padecían de estos fenómenos meteorológicos, prueba de esto es Tláloc, "dios de la lluvia" que aparece en todas las culturas mesoamericanas, desde la olmeca en el horizonte Preclásico hasta la maya en el horizonte Clásico. Sin embargo, las culturas precolombinas que principalmente fueron afectadas por los ciclones tropicales se ubicaban en las costas del Golfo de México y Mar Caribe, como los totonacas y los mayas (García, 1973).

Los totonacas que se desarrollaron en las costas centro y norte de lo que hoy es el estado de Veracruz, mostraban ser conocedores de diversas ciencias, un ejemplo de ello es la pirámide de los nichos en el Tajín. Esta palabra en dialecto totonaca significa dios del true-

no, rayo o huracán. El Tajín está situado frente al Golfo de México, justo en una zona de afectación por ciclones tropicales, así como de lluvias fuertes, sobre todo de junio a octubre. Por esta razón, las actividades de este importante centro de población se basaron en el conocimiento de los fenómenos meteorológicos.

Según el arqueólogo José García Payón: “grupos de peregrinos llegaban al Tajín para celebrar con fiestas los 158 días que duraba la amenaza de huracán”; también nos dice:

... que los totonacas representaron de una forma colosal y natural ese fenómeno atmosférico. Para engendrar en el espíritu del pueblo una idea visual, materializada de ese tremendo destructor y benefactor meteórico y elevarlos hacia su divinidad a través de la sensacional grandeza de su representación, diseñaron la greca escalonada (Figura 1). La greca escalonada es el producto de un profundo enraizamiento en la fenomenología meteorológica, en la emoción religiosa, en los conceptos mutuos, en las necesidades económicas y en los anhelos colectivos más angustiosos y apremiantes. Es decir, parece que la greca escalonada, que probablemente fue de forma espiral y se transformó en su forma geométrica conocida, nos representa al viento y a la lluvia. O más bien simboliza al huracán deificado con el nombre de Tajín.

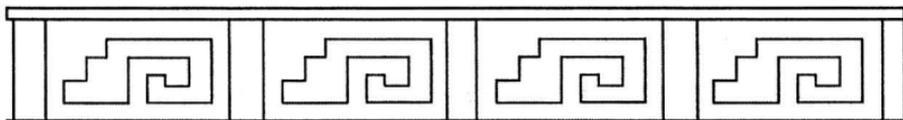


Figura 1. Xicalcolihqui o Greca escalonada (Zaleta, 1998).

Es interesante mencionar que 1492 es considerado por algunos autores como un año de poca actividad ciclónica, debido a la presencia del fenómeno de “El Niño”, por lo que Cristóbal Colón contó con mucha suerte, ya que su primer viaje lo realiza sin encontrar un solo huracán a pesar de haber navegado en una zona y época de alta ocurrencia de ciclones tropicales. En caso con-

trario se hubiera retrasado algunos años el descubrimiento del Nuevo Mundo (Mosiño, 1993).

En general, los riesgos meteorológicos son frecuentes y los que mayores pérdidas materiales y humanas han causado en la historia de nuestro país. Se estima que en los últimos cuarenta años las inundaciones en diferentes regiones del país han afectado a unos 18 millones de mexicanos. En términos de riesgos, aproximadamente 12% de nuestra población está expuesta a los ciclones en áreas donde el período de recurrencia de estos fenómenos meteorológicos es de dos a cuatro años (Suárez, 1993).

Por tanto, se deben redoblar los esfuerzos en el conocimiento de estos fenómenos, para desarrollar, aplicar y coordinar tecnologías para la prevención y mitigación de desastres, promover la capacitación profesional y técnica sobre la materia, así como apoyar la difusión de medidas de preparación y auto-protección a la población ante la contingencia de un desastre.

El objetivo principal de este libro es dar a conocer un bosquejo general de los conocimientos sobre los ciclones tropicales y sus efectos, principalmente en México, así como fomentar la incipiente cultura de protección civil que existe sobre estos fenómenos.

Inicialmente, en el primer capítulo, se aborda el entorno en el que se envuelve la meteorología tropical, y dentro de ella, las definiciones técnicas de los sistemas meteorológicos conocidos como ciclones tropicales, como se les denomina en otras partes del mundo y como se clasifican de acuerdo con la intensidad de sus vientos. Asimismo, se describe brevemente el sistema mundial desarrollado para la vigilancia y aviso de estos fenómenos.

En el segundo capítulo, se explican los factores necesarios para el origen y desarrollo de un ciclón tropical y sus principales características.

La climatología de los ciclones tropicales, que comprende las zonas ciclogénicas y las trayectorias que comúnmente siguen estos fenómenos, se tratan en el tercer capítulo; en el siguiente se habla de los métodos de pronóstico de trayectoria de huracanes y se esboza un panorama general de los problemas científicos que

debe resolver el entendimiento y mejoramiento de la teoría de los ciclones tropicales.

Los ciclones tropicales son uno de los fenómenos naturales más devastadores de la naturaleza. Sus destrozos son producidos por el viento, oleaje, marea de tormenta y precipitación. En el capítulo cinco se proporciona una descripción de los efectos de cada uno de estos elementos.

El conocido evento de “El Niño” Oscilación del Sur (ENOS) y su relación con la entrada de ciclones tropicales a la República Mexicana forman parte del sexto capítulo. En él se contabiliza el número de ciclones tropicales nombrados que han afectado al territorio nacional durante la ocurrencia de estos fenómenos.

Finalmente, en el capítulo siete se tratan los efectos de los ciclones tropicales sobre la República Mexicana, las medidas a seguir para aminorar la pérdida de vidas y la vulnerabilidad de las costas mexicanas.

I. METEOROLOGÍA TROPICAL

Antecedentes

La superficie de la Tierra se divide en zonas polares, templadas y tropicales. Esta clasificación se establece de acuerdo con la temperatura de su superficie, la cual es una consecuencia directa de la energía radiante que proviene del Sol, o sea, resultante de la inclinación del eje terrestre y del movimiento de traslación que da origen a las estaciones del año.

La inclinación del eje terrestre ($23^{\circ} 27'$ con respecto del plano de su órbita) ocasiona que los rayos solares lleguen casi perpendicularmente sobre el ecuador durante todo el año; mientras que, en los polos, la energía incidente sólo está presente la mitad del año (durante el verano del hemisferio), dado que la inclinación no varía en el movimiento de traslación. Esta situación produce que la mayor cantidad de calor se encuentre localizada en la zona conocida como "trópicos", que se ubican entre los $23^{\circ} 27'$ N y S.

Aunada a la mayor concentración de calor en los trópicos, se encuentra que en ellos la mayor parte de la superficie está cubierta por océanos, los cuales constituyen un gran almacén de este calor. Es por eso que la mayor cantidad de humedad y nubosidad se localiza en esta región geográfica de la Tierra.

El aire contiene siempre y en todas partes una cierta cantidad de vapor de agua, debido a la evaporación del agua esparcida por la superficie del globo. Este vapor es invisible, pero puede, en determinadas circunstancias, condensarse y dar lugar a varios fenómenos

meteorológicos como la niebla, el rocío, la lluvia, etc. La cantidad de vapor de agua introducido en la atmósfera se difunde en el ambiente con el auxilio de las corrientes aéreas; posee una cierta tensión, que resulta máxima cuando está saturado; es decir, cuando se considera que el ambiente ya no puede contener más. Esta medida indica la humedad absoluta del aire, es decir, la cantidad de vapor de agua contenido en la unidad de volumen de aire en las condiciones ambientales.

El paso del agua del estado gaseoso al líquido constituye el fenómeno de la condensación. Para efectuar un cambio de fase (de gas a líquido) se siguen dos procedimientos, que pueden actuar el uno independiente del otro o asociados:

1. Enfriamiento.
2. Disminución del volumen.

Sobre el vapor de la atmósfera libre actúa casi exclusivamente el primer factor.

El enfriamiento puede producirse por varias causas:

- a) acción directa, o desplazamiento de la masa de región más cálida a región menos cálida;
- b) irradiación;
- c) mezcla;
- d) expansión adiabática.

Por *acción directa*, se verifica cuando la superficie del suelo y los cuerpos próximos a ella pierden calor por un exceso de la irradiación emitida sobre la recibida, y las capas de aire de encima vienen a encontrarse a temperaturas cada vez más reducidas, hasta que alcanzan el punto de rocío: la ulterior disminución de temperatura provoca la condensación del vapor de agua bajo forma de gotitas líquidas que constituyen el rocío, o de partículas de hielo que forman la escarcha.

La condensación a consecuencia de *irradiación* se presenta principalmente en las capas bajas del aire, cuando éste está quieto y el cielo despejado. El fenómeno es típico de una clase especial de niebla.

Mezcla de masas de aire a temperaturas diferentes. De la mezcla de dos masas de aire húmedo, a temperaturas diferentes, se puede obtener la condensación de una parte del vapor de agua. Si ambas masas están saturadas de vapor, la resultante de su mezcla asume una temperatura intermedia y se encuentra sobresaturada; por consiguiente, el exceso de vapor en ella contenido, se condensa. Esto es también debido al hecho de que la tensión máxima del vapor aumenta más rápidamente al incrementarse la temperatura. Por otra parte, la media de las dos tensiones máximas iniciales es mayor que la tensión máxima correspondiente a la media de las dos temperaturas.

Condensación por enfriamiento debido a expansión; este es el procedimiento más importante en virtud del cual las masas aéreas, empujadas por las corrientes ascendentes en la atmósfera libre, encuentran presiones cada vez más débiles, se expanden y se enfrían.

Dado que la expansión de un gas se realiza de modo adiabático cuando el gas aumenta de volumen, sin recibir calor del exterior, se puede considerar que el aire, al subir, se expande adiabáticamente. De forma simultánea, aquél se enfría, ya que parte de su energía interna es llevada a vencer las presiones externas o, como suele decirse también, se transforma en el trabajo externo de expansión.

Por efecto del enfriamiento parte de su vapor se condensa hasta el punto de rocío. Si se trata de una masa de aire seco el enfriamiento adiabático es de aproximadamente 1°C por cada 100 m de elevación; si la masa de aire está saturada de vapor, el enfriamiento adiabático es de 0.68°C para la misma variación de altura. Una vez que se ha iniciado la condensación, el aire continúa la ascensión y expansión, la ley de variación de la temperatura de acuerdo con la altura cambia y el valor del gradiente térmico vertical es más pequeño. Cuando el grado de enfriamiento desciende por debajo de 0°C , el agua formada por la condensación se solidifica bajo forma de cristales de hielo y forma las fases del granizo y de la nieve.

La condensación del vapor de agua, en forma de lluvia, proviene en gran parte del enfriamiento de las masas de aire por expansión adiabática.

Según las circunstancias que acompañan a las condensaciones suelen distinguirse cuatro tipos diferentes de lluvias:

1. Lluvias ciclónicas:
 - a. De frente caliente, por aire caliente ascendente sobre una cuña de aire relativamente más frío empujada hacia el lado polar respectivo.
 - b. De frente frío, el aire caliente es desplazado por una masa de aire frío que avanza.
2. Lluvias de inestabilidad:
 - a. Inestabilidad debida a un sobrecalentamiento de agua marina;
 - b. Inestabilidad producida por insolación sobre el suelo (lluvias locales).
3. Lluvias de nieve:
 - a) Lluvias de nieve producidas en capas bajas, en contacto con el mar o con el suelo, relativamente frías.
4. Lluvias orográficas:
 - a) formadas en corrientes ascendentes de aire sobre elevaciones del terreno.

Las lluvias orográficas dependen de la desigualdad de la superficie y son originadas por el enfriamiento de masas de aire ricas en vapor de agua, empujadas por los vientos contra cadenas montañosas, obligadas (las masas de aire) a subir a lo largo de las pendientes hasta alcanzar capas de aire más elevadas donde el vapor se condensa.

Las lluvias de frente frío son, en cambio, causadas por invasiones de aire frío que empujan al aire caliente y lo levantan; al encontrarse estas dos masas se forma una superficie de discontinuidad. El contacto de esta superficie discontinua con el suelo es conocido como frente frío.

Las lluvias de frente caliente son debidas al levantamiento de aire caliente sobre masas de aire frío que se retiran. En este caso la superficie de discontinuidad entre dos masas que intersecta el suelo, se llama frente caliente.

En las regiones tropicales, las variaciones de temperatura entre el invierno y el verano son menores que en las regiones templadas. Esto se debe principalmente a que el Sol no se aleja mucho del cenit.

En general, en las regiones situadas entre los dos cinturones de altas presiones subtropicales, los gradientes horizontales de temperatura son muy débiles. De ahí resulta la imposibilidad de detectar frentes bien definidos como los que se conocen en las latitudes medias. Los frentes fríos que penetran a las regiones tropicales y que vienen de latitudes más elevadas se disipan rápidamente debido a la disminución del contraste de temperatura entre las masas de aire en el verano.

La cantidad de precipitación en cada estación depende a la vez de fenómenos de escala sinóptica y de escala media. En la escala sinóptica las depresiones y las líneas de vaguada ejercen una influencia marcada sobre la lluvia. Sin embargo, una gran parte de la precipitación se produce en forma de chubascos y de tormentas que provienen de efectos locales, tales como la orografía y el calentamiento de la superficie.

Aunque los frentes activos se manifiestan rara vez en los trópicos, debido a los débiles gradientes horizontales de temperatura, se observa frecuentemente la formación de nubes y de precipitaciones sobre grandes regiones. La convergencia, a bajo nivel, en las depresiones o a lo largo de las líneas de vaguada provoca movimientos ascendentes que van acompañados de formación de nubes y precipitación. Este efecto es más acentuado si se produce divergencia en la alta atmósfera.

También puede producirse convergencia cuando se acercan dos flujos de aire provenientes de direcciones diferentes. Si el aire tropical se ve forzado a elevarse, pueden formarse, en la proximidad de la zona de convergencia, líneas organizadas de cúmulos o de *cumulonimbus* y bandas de *cirrostratus*.

Existe un cinturón de bajas presiones ecuatoriales (zonas de calentamiento ecuatorial) donde el viento es débil y de dirección variable, se forman tormentas locales debido al calentamiento de las superficie subyacente y a la orografía. Además, pueden producirse turbonadas locales acompañadas de chubascos. Las tormentas desarrolladas pueden caer sobre una gran superficie, la anchura de la banda del tiempo atmosférico varía en función de la escala de la convergencia.

La Zona de Convergencia Intertropical (ZITC) se produce en gran escala, cuando los alisios de los dos hemisferios se encuentran en una estrecha zona (Figura 2). En general, los alisios de los dos hemisferios están separados por una ancha zona de calmas ecuatoriales, pero en ciertas regiones los alisios del noreste y del sureste circulan próximos unos a otros. La ZITC se caracteriza por un tiempo muy lluvioso que se manifiesta sobre una gran superficie. El desarrollo vertical de las nubes se extiende a todo el espesor de la troposfera hasta la elevada tropopausa de las regiones tropicales, a altitudes de 17 km o más. La base de las nubes puede descender a hasta algunos centenares de metros, e incluso casi hasta la superficie.

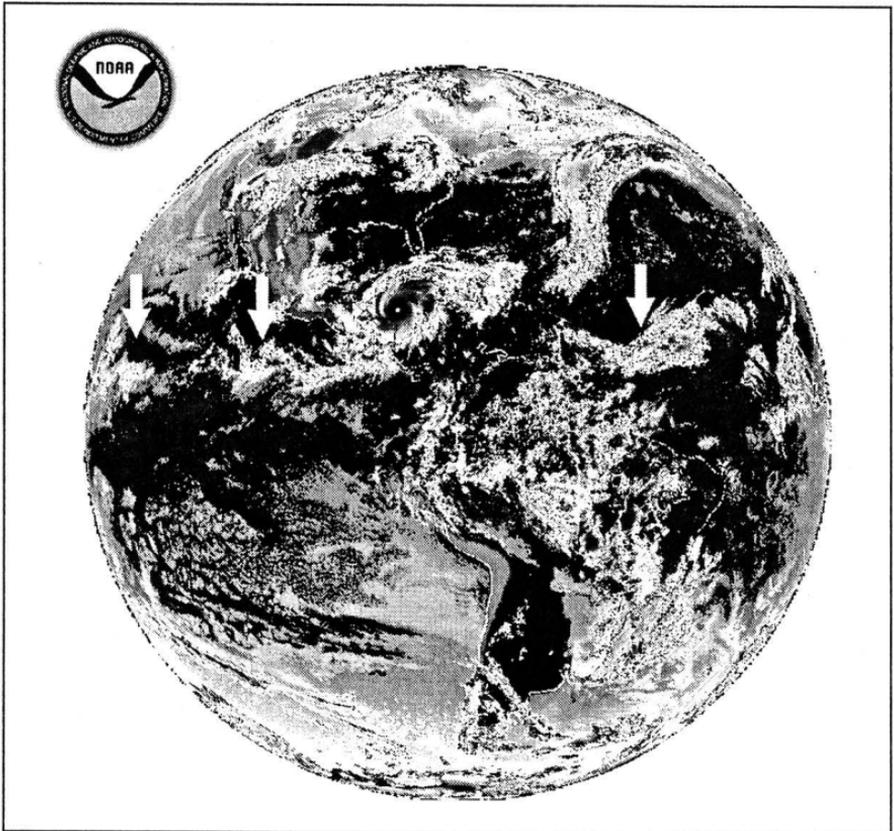


Figura 2. Imagen en canal infrarrojo del satélite meteorológico GOES, del 28 de octubre de 1998.

La zona nubosa más cercana al ecuador corresponde a la Zona Intertropical de Convergencia. Se observa la presencia del huracán Mitch en las aguas del Mar Caribe o de las Antillas.

Los efectos de la variación diurna y los efectos locales son muy importantes en los trópicos. A menudo, ejercen una influencia más grande que las perturbaciones de escala sinóptica. Corrientemente, la variación diurna de la temperatura, del viento y de las precipitaciones se acentúa por los efectos orográficos.

La variación diurna de la temperatura depende mucho de la dirección de los vientos dominantes. Cuando existen vientos que soplan regularmente del mar hacia tierra, la variación diurna de la temperatura es más débil. El clima puede tener un carácter más o menos continental cuando los vientos dominantes soplan hacia el mar. La amplitud de la variación diurna puede ser entonces relativamente grande.

La brisa de mar tiene importantes efectos sobre la temperatura y sobre el tiempo en muchos lugares de las regiones tropicales. También pueden reforzar los vientos dominantes cuando vienen del mar. Si las costas son accidentadas, la brisa de mar puede cambiarse con el efecto de la brisa de valle.

En las regiones donde el aire es húmedo e inestable, la brisa de mar puede favorecer los movimientos verticales, provocando chubascos o tormentas por la tarde. De la misma manera, la brisa de tierra puede producir tormentas en el mar al amanecer.

El término perturbación tropical se emplea para designar todos los elementos de flujo que alteran las corrientes tropicales normales. En ausencia de perturbaciones tropicales, el flujo estaría casi representado por las líneas de corriente más o menos alisadas, casi rectilíneas y con velocidad constante.

Las perturbaciones tropicales más activas son los violentos ciclones tropicales que se forman sobre los océanos cálidos de las regiones tropicales.

Los ciclones tropicales (CT) son zonas de baja presión localizadas dentro de los trópicos, en las cuales el viento circula en sentido contrario a las manecillas del reloj —en el hemisferio norte— lo cual

se conoce como circulación “ciclónica”. La Organización Meteorológica Mundial (OMM), los ha clasificado en “depresión tropical”, “tormenta tropical” y “huracán”, de acuerdo con la intensidad de sus vientos.

En una depresión tropical la intensidad de los vientos es menor a 61 km/h (34 nudos) y se tiene por lo menos una isobara cerrada. La tormenta tropical tiene vientos más intensos de 61 km/h (34 nudos) y menores de 113 km/h (63 nudos), y la configuración de la presión presenta dos isobaras cerradas cuando menos. Los huracanes se definen como ciclones tropicales con vientos de 114 km/h (64 nudos) o más.

La palabra huracán parece que proviene de la palabra maya *huraken* que significa “dios de las tormentas”, aunque también de la palabra *urican* que significa viento fuerte entre los habitantes indígenas de algunas islas del Caribe.

En México la palabra huracán se usa para identificar a los ciclones tropicales que se forman en el Océano Atlántico, o en el Océano Pacífico nororiental, siendo además la que se usa en los Estados Unidos de América, el Caribe y Centroamérica.

Sin embargo, para estos mismos fenómenos meteorológicos que se forman en el Océano Pacífico del noroeste se utiliza la palabra “tifón”. En las islas Filipinas se les conoce como “baguios”, en la India como “ciclones” y en Australia se les llama “*willy-willies*”. Generalmente los tifones y baguios tienen mejores condiciones para su desarrollo y alcanzan mayor intensidad que los huracanes, ciclones o *willy-willies*, dado que en estas zonas las temperaturas de la superficie oceánicas son más elevadas y extensas.

El estudio de los fenómenos tropicales ha pasado por tres etapas. Primero, por un largo período que finalizó hasta antes de la Segunda Guerra Mundial; se estableció entonces que las condiciones tropicales del tiempo, circulación, patrones y mecanismos eran más simples que aquéllos de las latitudes más altas. Aunque esto se basó principalmente en la escasa o nula existencia de registros meteorológicos, particularmente sobre los océanos y parcialmente también por consideraciones teóricas y prácticas. Durante este período se progresó muy poco, debido a la aparente ausencia general de con-

trastes de masas de aire. Los gradientes de presión de las perturbaciones tropicales (diferentes de los huracanes) tienden a pasar desapercibidos a causa de la oscilación diurna de la presión en los trópicos. La presión varía de 2 a 3 mb, con máximas a las 10 de la mañana y 10 de la noche, mínimas a las 4 de la mañana y 4 de la tarde (hora local). Otra razón es la gran extensión de la superficie oceánica, por lo cual se suponía que los patrones del tiempo y clima serían más simples. Sobre los océanos ecuatoriales el viento superficial es ligero y variable, el aire está siempre cálido, húmedo y sofocante.

La siguiente etapa tiene lugar a partir de las observaciones realizadas durante la Segunda Guerra Mundial, al revelar la ineficacia de los primeros acercamientos a la Meteorología tropical. Se constató que los cambios del tiempo atmosférico son frecuentes y complejos, con muchos tipos de sistemas diferentes en otras partes de las tierras tropicales y con diferencias considerables aún en las áreas oceánicas. Se notó la tendencia de los vientos alisios de los dos hemisferios a converger en la vaguada ecuatorial (baja presión), la cual lleva a la designación de la convergencia de los vientos alisios como Zona Intertropical de Convergencia (ZICT). La posición del ecuador térmico está directamente relacionada con el calentamiento solar y existe una estrecha relación entre éste y la vaguada ecuatorial, desde el punto de vista de bajas presiones térmicas (Figura 3).

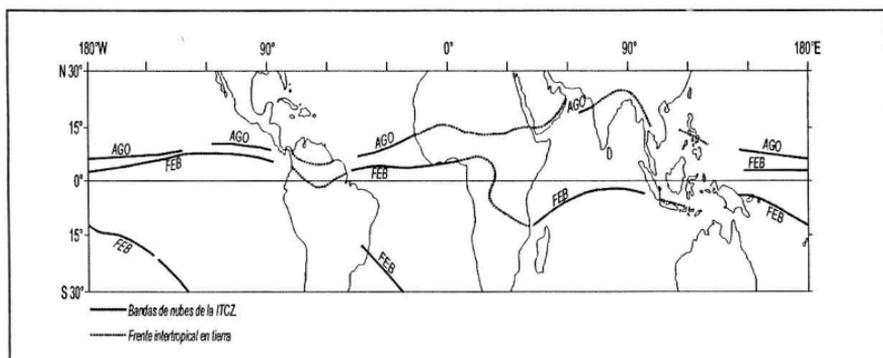


Figura 3. Posición de la vaguada ecuatorial (Zona Intertropical de Convergencia o Frente Intertropical en algunos sectores) en febrero y agosto (Saha, 1973 y Riel, 1954).

No fue sino hasta la década de los años cuarenta que se pudo establecer una detallada clasificación de las perturbaciones tropicales, aparte de los ya conocidos ciclones tropicales. Sin embargo, esto cambió radicalmente con el uso de los satélites meteorológicos a partir de la década de los años sesenta, con lo cual empieza la tercera etapa.

Se distinguen cinco categorías de sistemas de tiempo de acuerdo con sus escalas temporales y espaciales. La menor, con una vida media de unas cuantas horas son los cúmulos de 1-10 km de diámetro, se generan por la convergencia de los vientos alisios. Torres individuales de cúmulos asociados a los chubascos violentos, se desarrollan en la ZITC y llegan a alcanzar hasta los 20 000 m (65 000 pies) de altura, con vientos verticales de 10-15 m/s (36-54 km/h).

La segunda categoría se desarrolla cuando los cúmulos se agrupan en áreas convectivas de mesoescala de hasta 100 km de ancho. Pueden llegar a constituir un racimo (tercera categoría) de 100 a 1 000 km de diámetro. Se identifican en las imágenes de satélite como áreas nubosas amorfas. Su definición es arbitraria pero se pueden extender en un área cuadrada de 2-12° de latitud. Algunas de estas zonas persisten de uno a dos días pero otras se desarrollan a ondas de escala sinóptica.

La cuarta categoría se refiere a los sistemas de tiempo que incluyen las ondas de escala sinóptica y su escala temporal es de una a dos semanas. Finalmente, la quinta categoría contiene a las ondas planetarias (con una longitud de onda de 10 000 a 40 000 km), dos de ellas ocurren en la estratosfera ecuatorial y dos en la parte alta de la troposfera (Figura 4).

Red mundial de observaciones de ciclones tropicales

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) ha dividido a la superficie terrestre en seis regiones continentales, que se aprecian en la Figura 5.

El Programa de Ciclones Tropicales de la OMM busca promover y coordinar la planeación e implementación de medidas para mitigar

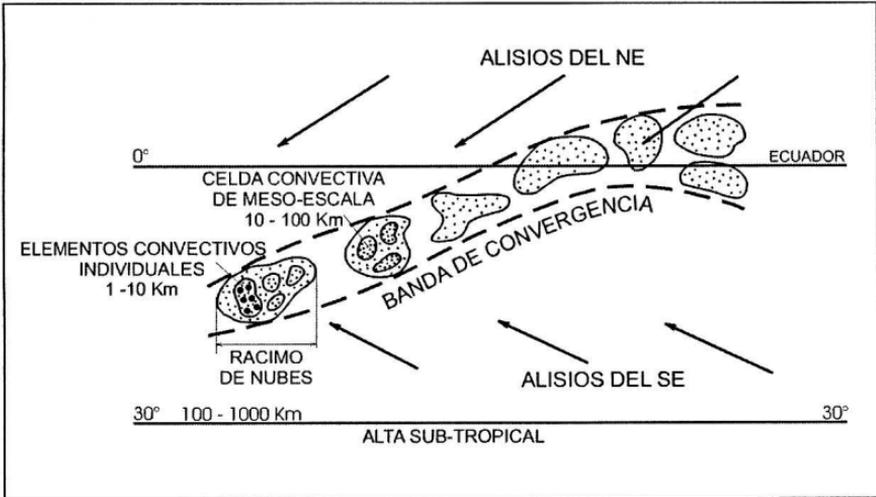


Figura 4. Estructura de las escalas meso y sinóptica de la Zona Intertropical de Convergencia (Mason, 1970). Muestra también su distribución espacial.

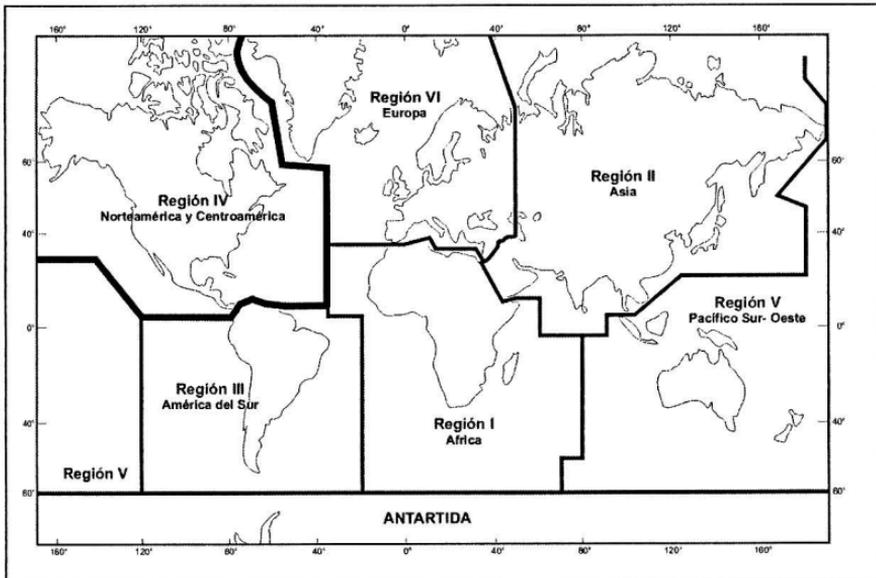


Figura 5. Asociaciones Regionales (AR) en que la OMM ha dividido la superficie terrestre para la vigilancia meteorológica.

los desastres ocasionados por los CT sobre las costas del mundo. Debido a que no todas las Asociaciones Regionales son afectadas por estos fenómenos, las áreas de vigilancia no coinciden con ellas. El Programa ha establecido Comités de CT de acuerdo con el siguiente Cuadro 1.

Existen variaciones considerables en la terminología que se usa dentro de cada una de las siete cuencas de CT del Programa de Ciclones Tropicales. Al utilizar diferentes promedios del viento en el tiempo se incrementa aún más la complejidad, por ejemplo, promedios de 1, 3 o 10 minutos provocan que un CT en una cuenca adquiera una categoría que puede ser mayor o menor en otra en la que se utiliza otro criterio para promediar el viento. Así, un sistema tropical puede adquirir un nombre o número en un país, pero no en otro, con el mismo criterio de viento, pero diferente promedio en el tiempo. En los Cuadros 2, 3a y 3b aparecen los diferentes términos usados en cada región.

Designación de nombres a los ciclones tropicales

La asignación de un nombre o número a un ciclón tropical se hace siempre que su intensidad alcance un umbral de 63 km/h (34 nudos), con la finalidad de facilitar su identificación. Como una excepción, el Programa de Ciclones Tropicales para la bahía de Bengala, usa un umbral de intensidad de 52 km/h (28 nudos).

Los nombres de los CT son obtenidos de listas pre-establecidas que son periódicamente utilizadas y actualizadas por los diferentes Centros Regionales. En la Región dentro de la cual está la República Mexicana, es el Centro Regional Especializado de Meteorología (CREM) de Huracanes de Miami el encargado de las funciones de vigilancia y aviso de CT. En los Cuadros 4 y 5 se muestran los nombres de las tormentas tropicales para las dos cuencas que flanquean a la República Mexicana.

Para la Asociación Regional I (ARI) los ciclones tropicales moderados (63 km/h, 34 nudos) son nombrados de acuerdo con una lista pre-determinada en el Servicio Meteorológico de Madagascar o Mauricio.

Cuadro 1. Nomenclatura de las cuencas, extensión areal y fuente principal de datos (OMM, 1993)

Número de cuenca	Nombre de la cuenca	Extensión areal	Fuente principal de datos
1	Atlántico Norte	O. Atlántico N, Mar Caribe y Golfo de México	Centro Nacional de Huracanes (CNH)
2	Pacífico Norte del E	América del N. a 180° E	CNH
3	Pacífico Norte del W	Oeste de 180° E, incluyendo el Mar Chino del S.	JTWC
4	Índico del Norte	Bahía de Bengala y Mar Arábigo	Departamento de Meteorología de la India
5	Índico del Sureste	Océano Índico del sur al oeste de 100° E La Reunión	Servicio Meteorológico
6	Índico del Sureste/ Australia	Hemisferio Sur 100 - 142° E	Oficina Meteorológica Australiana
7	Pacífico del Suroeste/ Australia	Hemisferio Sur 142° E - 120° W	RSMC en Fiji

JTWC: Centro Unificado de Aviso de Tifones.

RSMC: Centro Regional Especializado de Meteorología.

Los ciclones tropicales desarrollados entre 55° E y 90° E son nombrados por el Servicio Meteorológico de Mauricio y aquellos que se presentan al oeste de 55° E, por el Servicio Meteorológico de Madagascar.

En la AR V, la intensidad de 63 km/h (34 nudos) debe ser determinada primeramente en el Centro de Aviso de Ciclones Tropicales. Se usan tres listas separadas de nombres: para los Centros Australianos de Aviso (Darwin, Perth y Brisbane), para el Servicio Meteorológico de Fidji y para el Servicio Nacional del Tiempo de Papúa Nueva Guinea.

La identificación de CT en Asia y el Pacífico oeste difieren de la regla adoptada por los Comités de las Asociaciones Regionales. Nueva Delhi proporciona un número de identificación para todos los CT que se encuentran dentro de la región. El código usado consiste en las letras BOB o ARB para identificar los CT en la bahía de Bengala y el Mar Árabe respectivamente, seguido por el año y un número secuencial de dos dígitos. Por ejemplo, el segundo CT del año 1992 sobre el Mar Árabe se designa por medio de ARB 9202. El Comité oficial de la región no usa letras; de esta manera, el primer CT de 1992 se identifica como 9201 por el Centro de Tifones de Tokio, entidad responsable del área. Muchos países, por ejemplo Filipinas, usan nombres locales para los CT que afectan directamente su nación.

Si un CT alcanza notoriedad especial a causa de su intensidad, muertes o daños ocasionados u otras razones sobresalientes, su nombre es retirado de la lista por los interesados de cada Centro Regional.

Cuadro 2. Clasificaciones de los ciclones tropicales, depresiones tropicales y disturbios tropicales de acuerdo con la OMM

Vientos máximos sostenidos (nudos)	Menos de 34	entre 34 y 47	entre 48 y 63	64 y más	Término genérico
Número de Beaufort término descriptivo	arriba de 7	8. Racha y 9. Racha fuerte	10. Tormenta y 11. Tormenta violenta	12. Huracán	
CMM (WMO-Nº .471)	1. Depresión tropical	2. Tormenta tropical moderada	3. Tormenta tropical severa	4. Huracán o sinónimo local	1-4 Ciclón tropical
Región V- Hemisferio Sur	1. Disturbio tropical 2. Depresión tropical	3. Ciclón tropical (34 nudos y más)	4. Ciclón tropical severo (a)	5. Huracán	3-5 Ciclón tropical
Región I	1. Zona del disturbio 2. Disturbio tropical 3. Depresión tropical	4. Tormenta tropical moderada	5. Tormenta tropical severa	6. Ciclón tropical (64-90 nudos) 7. Ciclón tropical intenso (90-115 nudos) 8. Ciclón tropical muy intenso (>115 nudos)	3-8 Ciclón tropical
Pánel sobre ciclones	1. Baja, área de baja presión	4. Tormenta ciclónica	5. Tormenta ciclónica severa	6. Tormenta ciclónica severa con un núcleo de vientos de huracán	1-6 Disturbio ciclónico 4-6 Ciclón tropical
Tropicales	2. Depresión, depresión tropical (b) 3. Depresión profunda (b)				
Comité de tifones	1. Área de baja presión 2. Depresión, depresión tropical	3. Tormenta tropical	4. Tormenta tropical severa	5. Tifón	1-5 Ciclón tropical
Región IV	1. Disturbio tropical 2. Depresión tropical	3. Tormenta tropical		4. Huracán	2-4 Ciclón tropical
Vocabulario Internacional de Meteorología (1992)	1. Disturbio tropical 2. Depresión tropical.	3. Tormenta tropical	4. Tormenta tropical severa	5. Huracán, tifón ciclón tropical (c)	1-5 Ciclón tropical

(a) Término no definido específicamente, pero aparecen para relacionar a los vientos de fuerza de tormenta, definidos por ARV como de 48-63 nudos

(b) Depresión o depresión tropical: vientos máximos sostenidos están entre 17 y 33 nudos, excepto para los términos usados nacionalmente en Bangladsh, India y Pakistán donde el sistema puede ser llamado depresión si el viento máximo sostenido está entre 27 y 33 nudos.

(c) En el Océano Índico suroeste.

Cuadro 3a. Comparación de la clasificación de los ciclones tropicales para las regiones donde éstos se presentan

Océano Índico Suroeste		Océano Índico Norte		Pacífico Noroeste		Pacífico Sur / Índico Este		CUAT		Atlántico Norte / Pacífico Noreste	
0		Baja		Depresión tropical	Depresión tropical	Depresión tropical	Depresión tropical				0
10											20
20	Depresión tropical	Depresión					Depresión tropical	Depresión tropical		Depresión tropical	40
30			Depresión profunda								60
40	Depresión tropical moderada / tormenta	Tormenta ciclónica		Tormenta tropical	Tormenta tropical con vientos arrachados	Tormenta tropical		Tormenta tropical		Tormenta tropical	70
50											80
60	Depresión tropical severa / tormenta	Tormenta ciclónica severa		Tormenta tropical severa	Ciclón tropical con vientos de tormenta						90
70											100
80	Ciclón tropical										120
90											140
100		Tormenta ciclónica severa con vientos de huracán en el núcleo									160
110	Ciclón tropical intenso			Tifón	Ciclón tropical con vientos de huracán o ciclón tropical severo o huracán			Tifón		Huracán	180
120											200
130	Ciclón tropical muy intenso										220
140									Super Tifón		240
RAI		Panel de países		Comité de tifones		RAV		CUAT		RA IV	

Vientos máximos (nudos)

Vientos máximos (km/h)

En el panel de países están incluidos India, Bangladesh, Pakistán Sri Lanka y Tailandia. Las líneas discontinuas indican el umbral para nombrar o numerar a los ciclones tropicales.

Cuadro 4. Nombres* de las tormentas para el Océano Pacífico noreste

1998	1999	2000	2001	2002	2003
Agatha	Adrián	Aletta	Adolph	Alma	Andrés
Blas	Beatriz	Bud	Bárbara	Boris	Blanca
Celia	Calvin	Carlotta	Cosme	Cristina	Carlos
Darby	Dora	Daniel	Dalila	Douglas	Dolores
Estelle	Eugene	Emilia	Erick	Elida	Enrique
Frank	Fernanda	Fabio	Flossie	Fausto	Felicia
Georgette	Greg	Gilma	Gil	Genevieve	Guillermo
Howard	Hilary	Héctor	Henriette	Hernan	Hilda
Isis	Irwin	Ileana	Ismael	Iselle	Ignacio
Javier	Jova	John	Juliette	Julio	Jimena
Kay	Kenneth	Kristy	Kiko	Kenna	Kevin
Lester	Lidia	Lane	Lorena	Lowell	Linda
Madeline	Max	Miriam	Manuel	Marie	Marty
Newton	Norma	Norman	Narda	Norbert	Nora
Orlene	Otis	Olivia	Octave	Odile	Olaf
Paine	Pilar	Paul	Priscilla	Polo	Pauline
Roslyn	Ramón	Rosa	Raymond	Rachel	Rick
Seymour	Selma	Sergio	Sonia	Simon	Sandra
Tina	Todd	Tara	Tico	Trudy	Terry
Virgil	Verónica	Vicente	Velma	Vance	Vivian
Winifred	Wiley	Willa	Wallis	Winnie	Waldo
Xavier	Xina	Xavier	Xina	Xavier	Xina
Yolanda	York	Yolanda	York	Yolanda	York
Zeke	Zelda	Zeke	Zelda	Zeke	Zelda

*Estos nombres se reciclan cada seis años.

Cuadro 5. Nombres* de las tormentas para el Océano Atlántico

1998	1999	2000	2001	2002	2003
Alex	Arlene	Alberto	Allison	Arthur	Ana
Bonnie	Bret	Beryl	Barry	Bertha	Bill
Charley	Cindy	Chris	Chantal	Cristóbal	Claudette
Danielle	Dennis	Debby	Dean	Dolly	Danny
Earl	Emily	Ernesto	Erin	Edouard	Erika
Frances	Floyd	Florence	Félix	Fay	Fabián
Georges	Gert	Gordon	Gabielle	Gustav	Grace
Hermine	Harvey	Helene	Humberto	Hanna	Henri
Iván	Irene	Isaac	Iris	Isidore	Isabel
Jeanne	Jose	Joyce	Jerry	Josephine	Juan
Karl	Katrina	Keith	Karen	Kyle	Kate
Lisa	Lenny	Leslie	Lorenzo	Lili	Larry
Mitch	María	Michael	Michelle	Marco	Mindy
Nicole	Nate	Nadine	Noel	Nana	Nicholas
Otto	Ophelia	Oscar	Opal	Omar	Odette
Paula	Philippe	Patty	Pablo	Paloma	Peter
Richard	Rita	Rafael	Roxanne	Rene	Rose
Shary	Stan	Sandy	Sebastien	Sally	Sam
Tomas	Tammy	Tony	Tanya	Teddy	Teresa
Virginie	Vince	Valerie	Van	Vicky	Víctor
Walter	Wilma	William	Wendy	Wilfred	Wanda

*Estos nombres se reciclan cada seis años.
Los huracanes notables se retiran de la lista.

II. CICLONES TROPICALES

Formación de un ciclón tropical

Aunque el número de huracanes es pequeño comparado con los ciclones de otras latitudes (fuera de los trópicos), la posibilidad para su desarrollo en cada temporada es siempre alta –80 en promedio– en el mundo. Su formación rara vez ocurre sorpresivamente; las áreas de nubes y lluvia que se encuentran en los océanos tropicales, que tienen condiciones ideales para el desarrollo de tormentas. En el presente, las imágenes de satélite muestran todas las áreas lluviosas alrededor del mundo, un maravilloso avance tecnológico del siglo xx. Los sistemas nubosos relacionados con la ocurrencia de lluvia frecuentemente cubren por lo menos un área aproximada de 500 x 500 km. De esta manera, las perturbaciones que deben ser observadas son de un tamaño fácilmente identificable.

En la era pre-satelital, el meteorólogo se basaba principalmente en las observaciones realizadas desde los barcos para deducir el fortalecimiento de un área de lluvia. Los pronosticadores buscaban indicios de presión inusualmente baja; vientos más intensos de 40 km/h (22 nudos); precipitaciones anormalmente altas. En nuestros días, las imágenes de satélite muestran masas de nubes que son rodeadas por grandes áreas relativamente secas, mientras que las nubes forman un patrón circular con el centro libre de nubosidad. Tan pronto como las áreas nubosas de los océanos Atlántico y Pacífico oeste muestran señales de intensificación, se envían aviones de reconocimiento; el

uso de las aeronaves para estas peligrosas tareas es otro ejemplo de la benéfica aplicación de la tecnología moderna a la meteorología.

La historia de la formación de un *CT* empieza cuando un sistema nuboso se encuentra sobre una parte del océano donde la temperatura superficial excede el umbral de 26-27° C; y si la atmósfera circundante no presenta inversión de temperatura (temperatura que aumenta con la altura); en estos alrededores tampoco deben existir capas muy secas y calientes que inhiban o debiliten el desarrollo de las torres nubosas hasta grandes alturas. Una vez cumplidos estos requerimientos, es necesario que el aporte de energía para el subsecuente desarrollo sea obtenido de un mecanismo externo, cualquiera que sea su forma, para que la proporcionen por medio del hundimiento de aire relativamente frío en sus propios núcleos y aceleren el flujo superficial en la dirección del área potencial de desarrollo.

La concentración de masas ascendentes de nubes en apretadas bandas alrededor del centro puede producir calentamiento del aire en el área lluviosa, con descensos de presión hasta llegar a 1 000 mb, coincidiendo además con vientos arrachados. El océano se agita, produciendo olas y espuma. La presencia de flujo anticiclónico en un nivel situado alrededor de 12 km (200 mb) ayuda a acelerar la masa de aire hacia arriba, que será expulsada hacia fuera, produciendo de esta manera un equilibrio e inclusive un exceso de flujo saliente contra el incremento del influjo en los niveles inferiores.

La transferencia de energía desde el océano levanta aire que puede seguir patrones ascendentes sucesivamente más calientes, estableciendo una diferencia de temperatura entre el núcleo (que ahora tiene una forma circular) y sus alrededores. Esta diferencia asume la función del contraste normal de temperatura entre altas y bajas latitudes, utilizada por los ciclones de latitudes medias para su crecimiento. Dependiendo de la diferencia de temperatura, el huracán resultante puede ser de intensidad mínima, con presión de 990 - 980 mb en el centro; o la presión puede caer hasta 950 mb o menos, lo cual corresponde a vientos de 150 o hasta 200 nudos (360 km/h). El famoso ojo del huracán, bien conocido aun antes de las imágenes de satélite, produce subsidencia que lo mantiene y aporta otro mecanismo para continuar disminuyendo la presión.

Se cree que la principal razón para la mayor existencia de ciclones extratropicales que tropicales, yace en el hecho de que la fuente de energía de los primeros es tomada de la diferencia de temperatura (entre círculos de latitud) preexistente, mientras que, para los segundos, la mayor parte de esa diferencia de temperatura debe ser creada principalmente del proceso de condensación del vapor de agua que se lleva a cabo en los sistemas de tiempo tropicales (según Simpson y Riehl, 1981).

La fuente oceánica de calor representa un pequeño porcentaje del total de la energía transferida a los huracanes, el principal aporte de ésta se debe buscar en el calor latente de condensación. El calor latente de condensación liberado al condensarse el vapor de agua en su movimiento ascendente es máximo en las cercanías del centro. Se estima que un huracán maduro produce 1.5 cm de lluvia en un día dentro de un círculo de radio de 165 km (Gray, 1981; si convertimos esta cantidad de precipitación a volumen tendremos $2.1 \cdot 10^{16}$ cm³/día = $2.1 \cdot 10^{10}$ toneladas de agua por día. Esta cantidad de lluvia producida equivale a $5.2 \cdot 10^{19}$ Joules/día; tomando en cuenta que el calor latente de condensación del agua es $2.5 \cdot 10^6$ Joules/kg, se tendrán $6.0 \cdot 10^{19}$ watts generados en un día, esto equivale a 200 veces la capacidad de generación de energía eléctrica en todo el mundo en un día).

Condiciones meteorológicas para la formación de un ciclón tropical

Las siguientes situaciones atmosféricas indican condiciones propicias para el desarrollo de un CT:

- Presencia o preexistencia de una zona de convergencia en los niveles bajos y baja presión superficial, de escala sinóptica.
- Una atmósfera tropical cálida y húmeda que favorezca la inestabilidad de las capas de aire cuando se saturan (esto es una condición favorable para el desarrollo de nubes *cumulonimbus*).
- Una superficie oceánica con temperaturas por encima de 26° C, que aporta suficiente humedad y calor para el sostenimiento de los *cumulonimbus*.

- Débil cizalladura vertical del viento (horizontal). Menos de 15 nudos entre la troposfera baja y la troposfera alta dentro de un radio de 4° de latitud, centrado en el área de convección profunda. El máximo calentamiento debido a los *cumulonimbus* debe permanecer sobre la región de mínima presión.
- Que el fenómeno se encuentre suficientemente alejado del ecuador (generalmente más de $4-5^\circ$, respectivamente, de latitud) de manera que el aire tienda a moverse (en una trayectoria espiral) hacia dentro en los niveles bajos hacia la baja presión, y hacia fuera anticiclónicamente en los niveles superiores.
- El desarrollo o superposición de un anticiclón de gran escala en la parte alta de la baja presión superficial es necesario para evacuar masa desde la región del ciclón, permitiendo que la presión en superficie continúe disminuyendo.

Una vez que un ciclón tropical ha alcanzado la categoría de huracán, no se debilitará a menos que:

- Su abastecimiento de calor y humedad se debilite como resultado de su paso sobre agua relativamente fría o sobre tierra.
- Se transporte aire frío y seco al sistema. Esto inhibiría la formación de los *cumulonimbus*.
- El anticiclón en los niveles superiores sea reemplazado por una circulación ciclónica. Esto produciría que entrase masa en lugar de evacuarla. Ya que la convección de los *cumulonimbus* tiende a perpetuar el anticiclón superior, se requieren cambios en escala atmosférica mayor para removerlo.

Estructura de un ciclón tropical

La característica más sobresaliente de un ciclón tropical es que parece un embudo estrecho. Aunque su periferia puede llegar hasta un diámetro de 1 000 km aproximadamente, casi todo lo importante ocurre dentro de un radio de 100 km. Aquí, los vientos superficiales se incrementan hasta su máximo, la mayor intensidad puede estar confinada a un estre-

cho anillo de 2-4 km que rodea al borde del ojo y se localiza en promedio a 30 km del centro, aunque su rango va de 10 a 80 km (Figura 6).

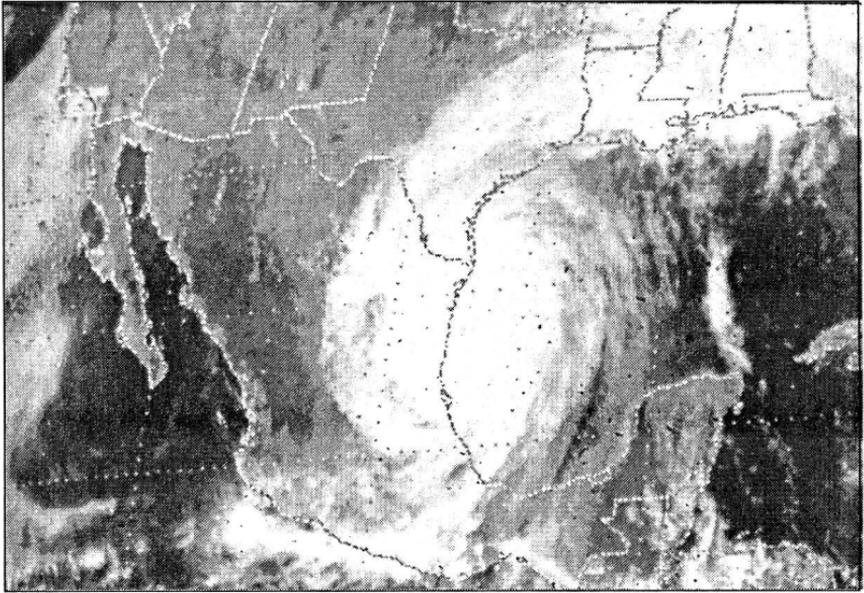


Figura 6. Imagen GOES del huracán Gilberto. 15 de septiembre de 1988, 6: 01 hora local.

La mayor parte del incremento de temperatura asociado a la elevación de las masas nubosas ocurre en este anillo, así como también la rápida caída de la presión. Se habla de una espectacular “pared nubosa del ojo”, vista en fotografías de radar como el rasgo interior más sólido en un ciclón; sin embargo, no todos estos meteoros tienen una pared del ojo completa, e incluso en tormentas bien formadas se observan fluctuaciones continuas de la pared del ojo y de la intensidad del viento. Esta variación es del orden del 10% en períodos de 1 a 2 hr (Figura 7).

Casi todo el aire que entra sale por la parte superior del embudo—que puede llegar de 5 a 10 km—curvándose hacia fuera. Pero alguna parte de este aire se introduce al ojo y ahí produce algunas hermosas nubes bajas, formando espirales inferiores que pueden terminar en una nube central más alta, cuya cima puede alcanzar hasta 2 km. Esta elevación es el límite de la entrada del aire descen-

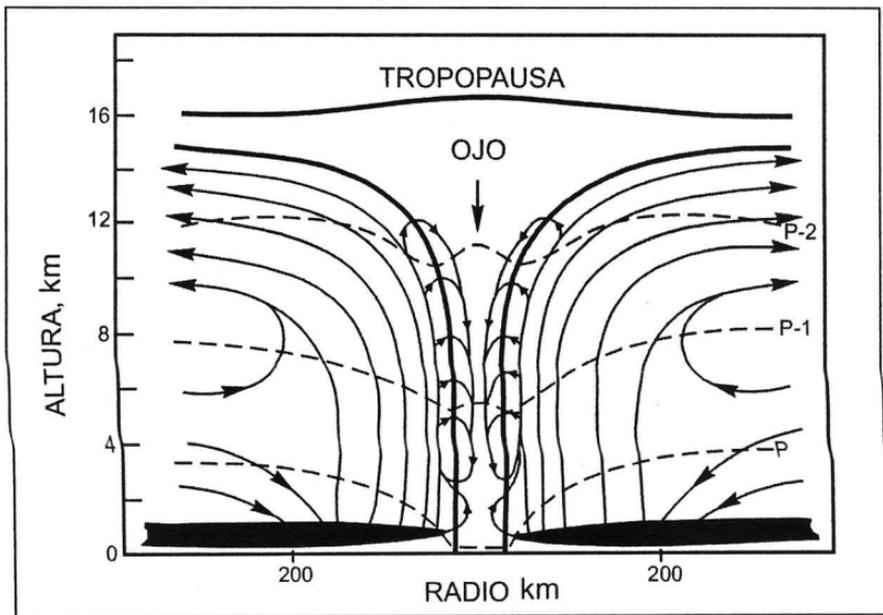


Figura 7. Modelo de un huracán maduro (sección vertical), viento radial contra radio, se supone el caso simétrico, influjo superficial (zona negra), tropopausa y pared del ojo (líneas negras). La inclinación de las superficies de presión está representada por líneas discontinuas.

diendo en el ojo desde los niveles superiores. Cuando es posible ver el ojo en las imágenes de satélite, grandes masas de nubes altas, *cirrus* (nubes de hielo) pueden identificarse fluyendo hacia el centro y descendiendo como cascadas de hielo.

El gran vórtice –gira en sentido contrario a las manecillas del reloj en el hemisferio norte e inversamente en el sur– se extiende, casi sin disminuir su fuerza desde la superficie, hasta por lo menos 7-8 km. En contraste, el influjo que produce las espectaculares bandas nubosas en forma de espirales vistas en los radares, se concentra en los niveles más bajos. En la atmósfera media el aire rota alrededor del eje del huracán como un carrusel. Por encima de los 7-8 km, la caída de presión interior disminuye en conexión con la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior; el aire empieza a salir desde el centro y la rotación disminuye. En alturas de 10-15 km y

radios de 150-200 km, el viento sopla directamente hacia fuera, la rotación es cero, aun cuando en los niveles bajos los vientos convergentes a esta distancia, alcanzan de 54 a 90 km/h (30 a 50 nudos).

Las presiones barométricas superficiales más bajas sobre la superficie terrestre se han encontrado asociadas con los huracanes. Los valores más bajos conocidos (en los barcos o de instrumentos lanzados por aviones) se encuentran en el rango de 860-890 mb, los cuales, comparados con la presión superficial estándar de 1 013mb, son aproximadamente 10% más bajos. Uno de los huracanes más severos que ha afectado a la República Mexicana, Gilberto en 1988, alcanzó una presión mínima de 888 mb. Afortunadamente esta presión sólo ocupa una reducida área con respecto a la extensión total del fenómeno, aunque a distancias tan lejanas como 700 km del centro pueden existir vientos con intensidad de 54 a 72 km/h (figura 8). Por

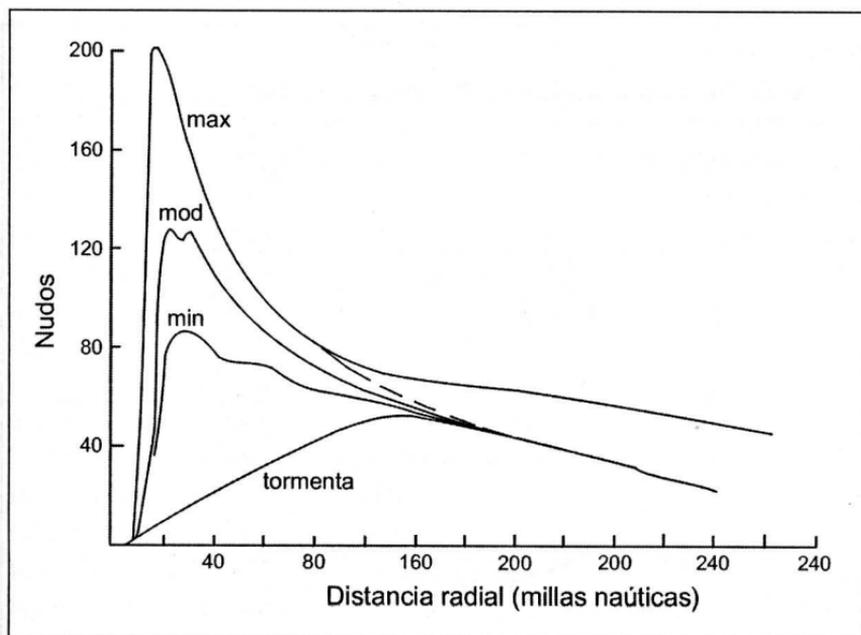


Figura 8. Perfiles radiales de la rapidez del viento para tres diferentes intensidades de huracán y tormenta.

lo general, mientras más baja es la presión en un ciclón tropical, más intensos son los vientos asociados a él.

El campo de viento. La siguiente figura es una gráfica donde se muestra el comportamiento de la intensidad del viento en la dirección radial. En ella podemos apreciar que el radio de vientos máximos se encuentra entre los 30 y 50 km; a partir de ese punto disminuye (casi) exponencialmente, para permanecer estable entre los 120-240 km.

Cuando un huracán se encuentra inmerso dentro de lo que se conoce como *corriente conductora*, la rapidez de ésta y la del vórtice son –aproximadamente– sumadas. A la derecha de la dirección del movimiento del CT, la corriente conductora y el movimiento del vórtice coinciden, mientras que por el lado izquierdo son opuestos; por esta razón, casi invariablemente la intensidad del viento es mayor a la derecha que por la izquierda de la dirección del movimiento del ciclón (Figuras 9a y 9b).

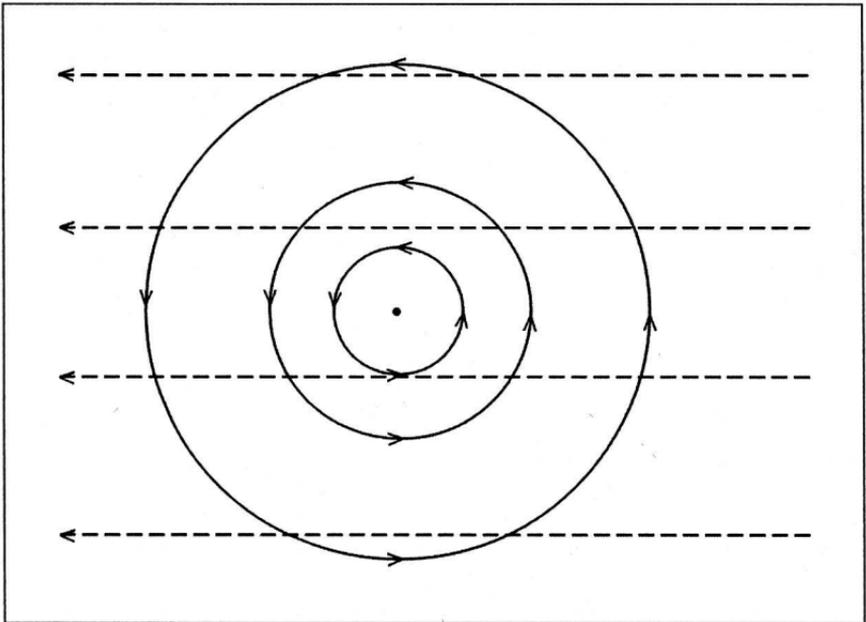


Figura 9a. Superposición lineal de un vórtice ciclónico y una corriente conductora lineal.

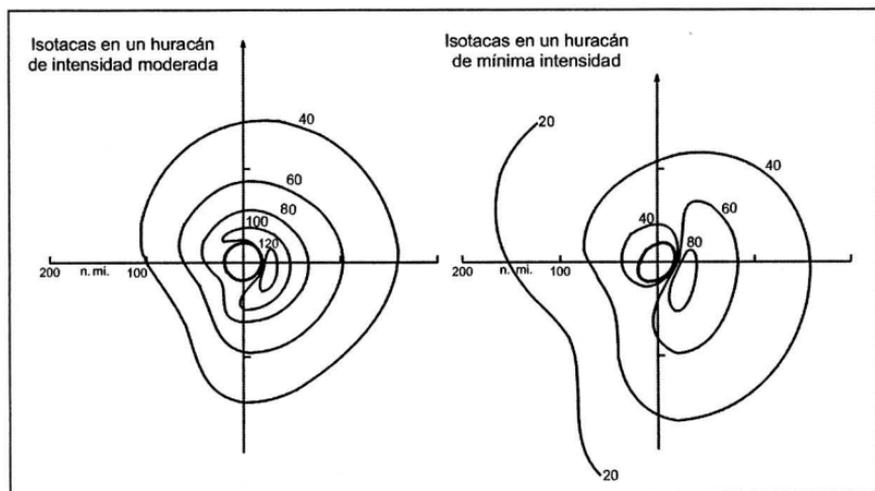


Figura 9b. Distribución de la intensidad de los vientos para un huracán maduro y uno de mínima intensidad. La flecha indica la dirección del movimiento del huracán.

El viento en el ciclón tropical converge formando una espiral hacia el ojo. En el hemisferio norte lo hace en sentido contrario a las manecillas del reloj y la espiral se observa en todos los huracanes. Una distribución típica de la intensidad del viento se puede apreciar en la Figura 9b. En ella se nota que a la derecha de la dirección del movimiento del huracán, la intensidad del viento es mayor que a la izquierda. El tamaño del ojo no indica de ninguna manera la intensidad del huracán, ya que han existido huracanes intensos con ojos de radio pequeño o radio grande (Figura 10).

La altitud difícilmente afecta la intensidad del viento; se nota que es aproximadamente constante desde la superficie hasta 6 o 7 km.

Nubes. Las nubes, especialmente en los bordes exteriores, forman largas bandas espirales hacia dentro. En la parte alta se puede apreciar un gran yunque, producto del viento sobre las cúspides de los *cumulonimbus*. En la época actual los satélites pueden ver la espiral más ancha saliendo en sentido de las manecillas del reloj, en el hemisferio norte, producto del exflujo en el borde superior del huracán (y en sentido contrario en el hemisferio sur). La mejor imagen de las espirales de influjo proviene de las observaciones de radar.

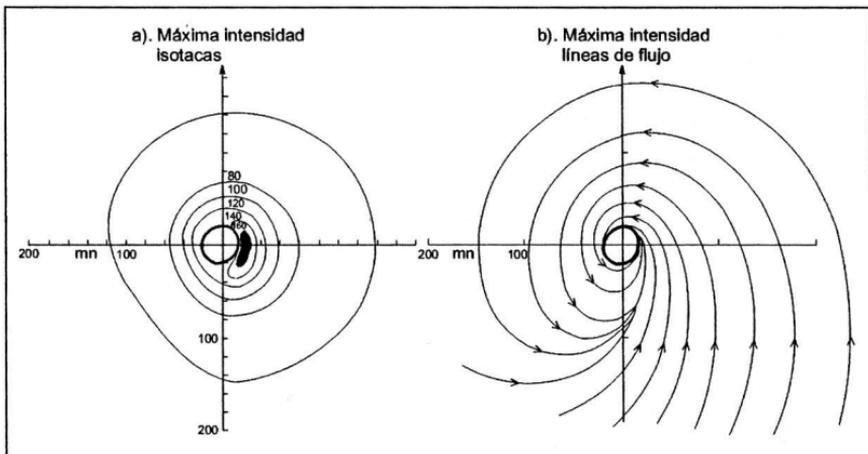


Figura 10. Modelo de distribución de la rapidez del viento (a) y líneas de flujo (b) para un huracán intenso, trazado con respecto a la dirección del movimiento.

Precipitación. Aunque la precipitación es el elemento más espectacular de la tormenta tropical, es lo más difícil de medir. La mayor cantidad de lluvia ocurre en la zona donde los vientos son más intensos y, sin embargo, es muy difícil obtener medidas precisas, ya que con viento de arriba de 50 nudos (90 km/h), más de la mitad de la precipitación es llevada o arrastrada por el viento y sólo el resto cae dentro del pluviómetro. Los edificios o algún otro obstáculo introducen errores en la medida. También influye el movimiento del ciclón con respecto al pluviómetro (sí pasa por la derecha o por la izquierda), la rapidez de traslación de la tormenta, su intensidad y su tamaño. Es decir, es muy difícil establecer un rango de validez de la cantidad de precipitación producida por un cr .

Se puede decir, en general, que la mayor cantidad de precipitación está asociada a las bandas nubosas; unas veces se encuentra cercana a la pared de nubes del ojo y otras tan lejos como 100 o 300 km, especialmente en el lado derecho con respecto a su movimiento.

Los cálculos más aceptados, basados en vuelos de reconocimiento, refieren que la precipitación varía en círculos concéntricos alrededor del centro. Aun cuando la precipitación decrece conforme se

aleja del centro, el área afectada aumenta con el cuadrado del radio, dando así que, la mayor contribución no se deriva del área central.

Se ha observado que una tormenta tropical de menor intensidad puede provocar tanta o más precipitación que un huracán. Los huracanes no contribuyen significativamente a la lluvia total de una localidad tropical. A menos que exista manera de almacenar los flujos de agua que provoca, la precipitación podría causar mayor cantidad de daños que de beneficios a la población.

Estructura térmica. En la etapa de madurez, la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de un ciclón tropical no supera los 2° o 3° C. Es difícil que las torres nubosas produzcan una gran elevación de temperatura sobre el ambiente, ya que tienden a mezclarse con aire más frío y seco de altitudes más altas, que inhibirá el efecto de la liberación del calor latente de condensación.

La fuente de energía está disponible en la superficie del océano, por medio de la transferencia de calor sensible y calor latente del agua hacia la atmósfera. Si existe una gran área con vientos intensos, éstos agitan el agua produciendo diminutas gotas que transportan calor a la atmósfera. La temperatura deja de variar cuando se han alcanzado 2-3° C de diferencia entre el océano y el aire.

Estructura vertical del viento. El viento tangencial se incrementa conforme se acerca al centro. A una distancia de 1° (100 km) del ojo, ya se tiene intensidad de huracán, permanece constante al elevarse hasta 500-400 mb (6 000-7 000 m) y entonces empieza a decrecer rápidamente (Figura 11).

En un radio de 4° (400 km) y a una altura de 12 km (200 mb), el sentido de rotación ya ha cambiado de ciclónico a anticiclónico. A un radio de 2° (200 km) todavía existe rotación ciclónica, aunque débil, y a un radio de 1° (100 km) todavía alcanza la intensidad cercana a los 40 nudos (72 km/h). Se puede asegurar, con base en la información proporcionada por sondeos, que a los 100 mb (16 km) –base de la estratosfera– ha desaparecido casi totalmente.

Más allá del radio de 150-200 km, el flujo en los niveles altos rota en sentido contrario a la dirección del flujo entrante, es decir, en el sentido de las manecillas del reloj (en el hemisferio norte). Algu-

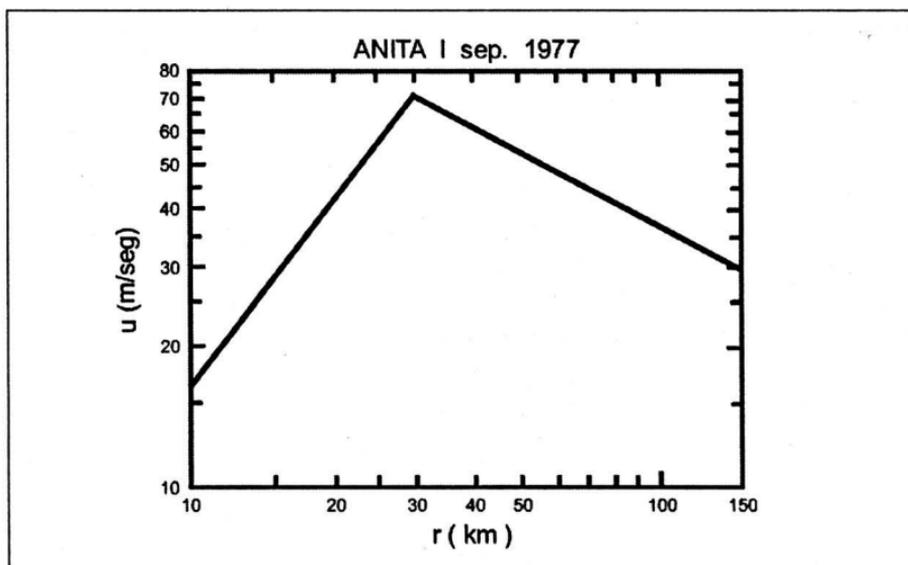


Figura 11. Rapidez del viento tangencial promediado en el huracán Anita y asentado logarítmicamente contra el radio.

nas de las más largas bandas espirales vistas en las imágenes de satélite son parte del flujo saliente. Ya que la vista del satélite es desde arriba, densas nubes que rodean el centro —en algunas ocasiones— llegan a cubrir las bandas de lluvia del flujo entrante.

Marea de tormenta (surgencia de tormenta). Es la elevación anormal del nivel del mar causada por las fuerzas del viento y por la baja presión de un huracán o ciclón extratropical. La anomalía del nivel del mar se mide por el registro de mareas y se refiere a la diferencia entre lo observado menos el nivel provocado a causa de la presencia del CT. Las surgencias de tormenta producen el mayor daño cuando su efecto coincide con aquél de la marea alta normal (Figura 12).

Muchas áreas de baja presión intensa que pasan por una línea costera incrementan el nivel del mar un metro o más; las elevaciones mayores a dos metros son raras y generalmente desastrosas. Aunque no existen registros exactos de la altura alcanzada por el nivel del mar, la surgencia mejor documentada es la de 6 o 7 m producida por el huracán Camille (1969) en las costas del Golfo de México. Existen informes no verificados de algunas que se estima

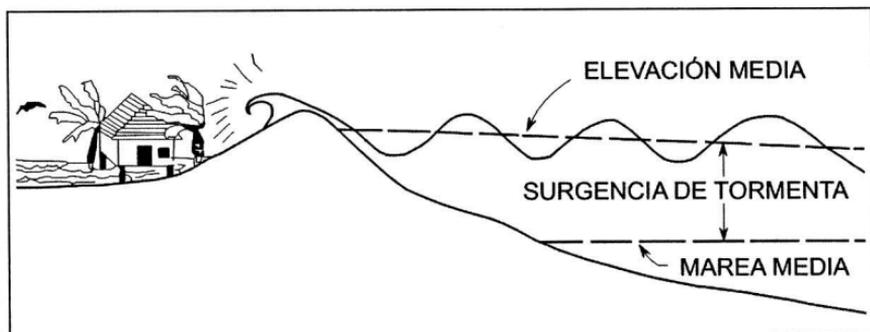


Figura 12. Esquema que muestra los cambios del nivel del mar por la marea y por la surgencia de tormenta.

han llegado hasta 12 m producidas por algunos de los 1 737 ciclones ocurridos en Calcuta, India. Muchas de las surgencias de tormenta más espectaculares han ocurrido durante los huracanes.

Las condiciones atmosféricas pueden afectar el nivel del mar en formas diferentes. Un efecto bien conocido es el llamado efecto del barómetro invertido que se puede explicar de la siguiente manera: si se construyese un tubo gigante y se pusiera sobre el océano, extrayendo el aire del tubo, el agua subiría exactamente como lo hace en un barómetro. Esto es lo que sucede en el ciclón, excepto que este meteoro no necesita ningún tubo gigante para mantener la presión baja. Se ha encontrado que por cada cien pascales (100 pascales es igual a un milibar) que baja la presión del aire, el agua se levanta un centímetro (Gedzelman, 1980). Esta es la razón por la cual muchos huracanes que tienen una presión de 50 a 75 milibares más baja que los alrededores, producirán que el efecto del barómetro invertido suba el nivel del mar tan sólo de 50 a 75 cm. Aun en los huracanes más intensos, únicamente se elevaría el nivel del mar 1.5 m debido a este efecto (Figura 13).

Obviamente hay otros fenómenos que deben ser sumados al efecto del barómetro invertido para producir las elevaciones más espectaculares del nivel del mar. Cada tormenta intensa tiene vientos fuertes. Cuando los vientos soplan contra una línea de costa apilan el agua enfrente de la playa; contrariamente, cuando el viento sopla

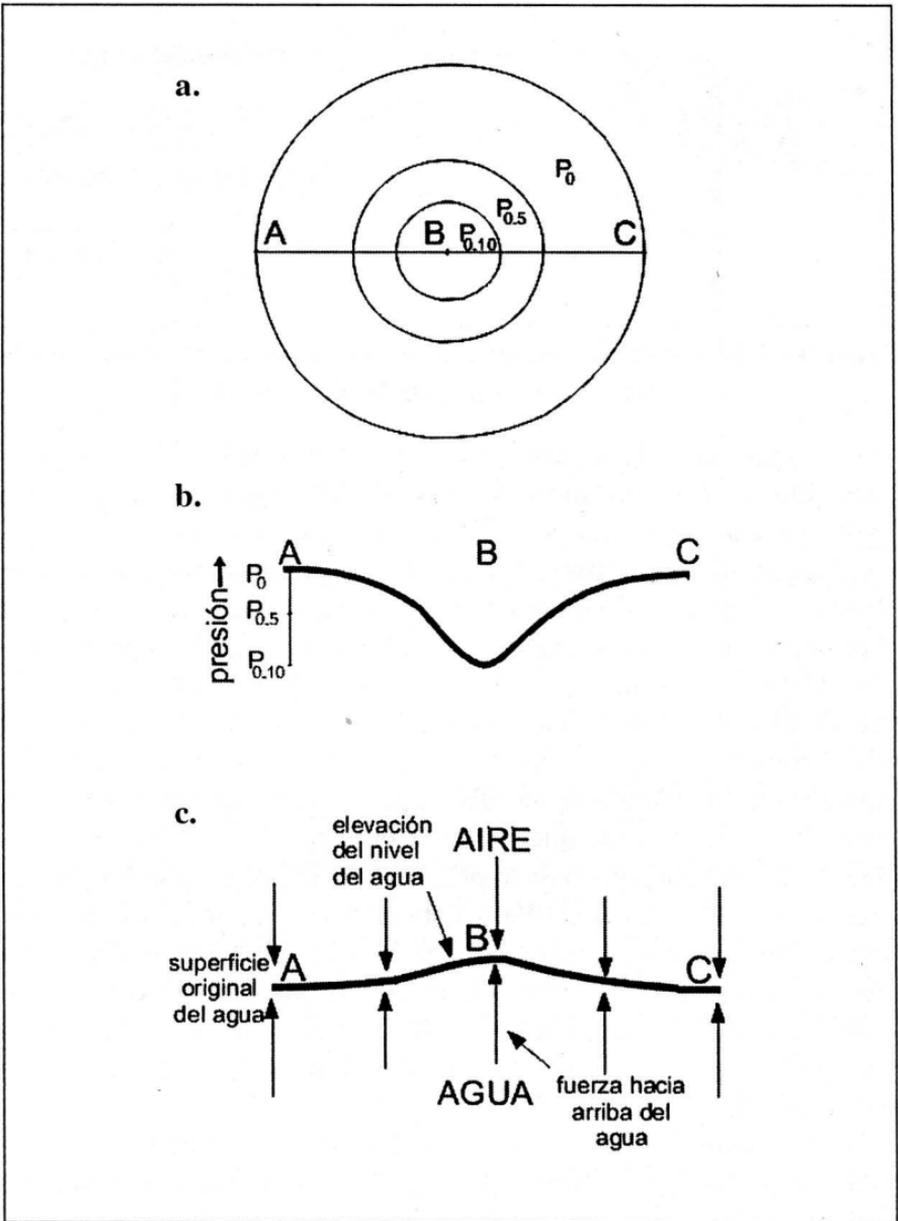


Figura 13. a. Área de baja presión. b. Gráfica de la presión superficial a lo largo de la línea ABC. c. Nuevo balance de las fuerzas en la superficie del agua mostrando el efecto de barómetro invertido.

contra el mar, arrastrará el agua lejos de la playa abatiendo su nivel. Este efecto del viento se ve realizado por la profundidad de las aguas, es decir, mientras más someras, mayor será la altura que pueda alcanzar la ola.

Otro factor que puede sumarse para incrementar el nivel del mar es el llamado *efecto de resonancia*. Hay veces que una tormenta se mueve a lo largo de una línea costera, con el viento soplando hacia fuera de la playa, pero, una vez que el centro de la tormenta pasa, la dirección del viento se invierte. Así que, inicialmente, el agua será impulsada hacia fuera de la playa, pero cuando el centro de la tormenta esté pasando, el viento dejará de soplar y el agua empezará a dar marcha atrás. Mientras el agua regresa sobre sí misma, el viento súbitamente empezará a soplar hacia la playa dándole al agua un empuje extra. De esta forma, se elevará más alto que si un viento sostenido hubiese soplado hacia la playa todo el tiempo. El efecto de resonancia ha provocado desastres sobre las costas del Golfo de México y también ha causado inundaciones alrededor de los lagos Okkechobee en Florida y Ponchartrian en Luisiana.

Hay otro caso del efecto de resonancia que es un poco más complejo: el montículo de agua, incrementado por el efecto del barómetro invertido, puede actuar igual que una ola grande del océano si el área de baja presión desaparece súbitamente. Esta onda daría un largo viaje hacia fuera, tal como las olas que emanan desde el lugar en que una roca cae al agua. Ahora, si el área de baja presión se mueve, se produce el mismo efecto y el montículo levantado empieza a viajar hacia fuera; la resonancia ocurrirá si el área de baja presión se mueve con la misma rapidez que la ola. Esto sólo sucede en aguas poco profundas, y puede producir serias consecuencias, por ejemplo las inundaciones que ocurren en la boca de la bahía de Bengala, a lo largo de las costas de la India y Bangladesh.

Ojo del ciclón tropical

El centro del ciclón tropical aparece como “un punto singular” (área pequeña): la presión deja de disminuir, el viento deja de soplar, la

lluvia cesa, las nubes desaparecen, así como las olas del océano. Todo esto se refleja en la imagen de satélite como un pequeño y oscuro hoyo central. Estas condiciones hacen presuponer que el peligro ha pasado; sin embargo, la segunda y frecuentemente más intensa parte, todavía está por arribar.

El diámetro del ojo puede variar de 5 a 60 km, dependiendo de la rapidez de traslación del huracán; es decir, la calma relativa puede durar desde unos cuantos minutos hasta horas. Dentro del ojo, la temperatura puede ser tan alta como fuera de él, a pesar de la presión tan baja. En algunos informes se dice que la temperatura puede ser hasta 10° C más alta en el ojo que fuera de él.

El ojo siempre se encuentra cambiando de forma: algunas veces forma ojos dobles, se intensifica, o se debilita. Las bandas de lluvia, con sus intensos vientos, lo empujan, dan forma circular e intensifican. Por el contrario, cuando estos vientos disminuyen, el ojo tiende a crecer y debilitarse. Estos cambios están ligados a variaciones de presión.

III. CLIMATOLOGÍA DE LOS CICLONES TROPICALES

La preparación de una climatología global completa de los CT ha sido posible gracias al uso de los satélites meteorológicos. Esto se debió a que la documentación de los CT en áreas remotas del globo era muy fragmentada y mucho dependía de la oportunidad de encontrarse con barcos o áreas de tierra pobladas. Los aviones de reconocimiento, que empezaron en la mitad de los años 40, han proporcionado documentación excelente, pero sólo sobre porciones de las cuencas del Atlántico norte y del Pacífico nor-occidental.

Zonas ciclogénicas

En la Figura 14 se puede apreciar que las regiones con mayor número de ciclones se encuentran en el Pacífico este y oeste, siendo menor la cantidad en el Atlántico norte y en el hemisferio sur. También es notable el hecho de que en las costas de América del Sur la presencia de ellos es nula.

La máxima incidencia de ciclones tropicales (303 en 100 años) ocurre en el Océano Pacífico noreste cerca de 16° N, 112° W. Otro máximo notable (238 en 100 años) se encuentra al este de Luzón, en las Filipinas. La frecuencia más alta en el hemisferio sur se halla situada en la costa noroeste de Australia con 124 ciclones en 100 años, mientras que el valor más bajo corresponde al Océano Índico central, aproximadamente de 88 (OMM, 1993).

Tabla 1. Ciclones tropicales que se presentaron en los océanos Atlántico y Pacífico, período 1968-1998. Dentro del paréntesis aparecen los que alcanzaron la categoría de huracán y los que entraron a las costas mexicanas, respectivamente

Año	Atlántico N	Pacífico NE	A + P	
1968	8 (5 , 0)	18 (6 , 4)	26 (11 , 4)	
69	18 (12 , 1)	10 (4 , 1)	28 (16 , 2)	
70	10 (5 , 3)	19 (4 , 3)	29 (9 , 6)	
71	13 (6 , 3)	18 (12 , 6)	31 (18 , 9)	
72	7 (3 , 1)	14 (9 , 2)	21 (12 , 3)	
73	8 (4 , 2)	12 (7 , 4)	20 (11 , 6)	
74	11 (4 , 2)	18 (11 , 4)	29 (15 , 6)	
75	9 (6 , 2)	17 (9 , 2)	26 (15 , 4)	
76	10 (6 , 0)	15 (9 , 4)	25 (15 , 4)	
77	6 (5 , 1)	8 (4 , 1)	14 (9 , 2)	
78	12 (5 , 3)	19 (14 , 3)	31 (19 , 6)	
79	9 (5 , 1)	10 (6 , 2)	19 (11 , 3)	
80	11 (9 , 2)	14 (7 , 0)	25 (16 , 2)	
81	12 (7 , 0)	15 (8 , 5)	27 (15 , 5)	
82	6 (2 , 0)	23 (12 , 1)	29 (14 , 1)	
83	4 (3 , 1)	21 (12 , 1)	25 (15 , 2)	
84	13 (5 , 0)	21 (13 , 2)	34 (18 , 2)	
85	11 (7 , 0)	23 (13 , 0)	34 (20 , 0)	
86	6 (4 , 0)	17 (9 , 0)	23 (13 , 0)	
87	7 (3 , 0)	20 (10 , 1)	27 (13 , 1)	
88	12 (5 , 3)	15 (7 , 0)	27 (12 , 3)	
89	11 (7 , 0)	17 (9 , 3)	28 (16 , 3)	
90	14 (8 , 1)	21 (16 , 1)	35 (24 , 2)	
91	8 (4 , 0)	14 (10 , 0)	22 (14 , 0)	
92	7 (4 , 0)	27 (16 , 3)	34 (20 , 3)	
93	8 (4 , 1)	15 (11 , 4)	23 (15 , 5)	
94	7 (3 , 0)	20 (10 , 1)	27 (13 , 1)	
95	19 (11 , 3)	10 (7 , 1)	29 (18 , 4)	
96	13 (9 , 1)	9 (5 , 4)	22 (14 , 5)	
97	8 (3 , 0)	19 (9 , 4)	27 (12 , 4)	
98	14 (10 , 2)	13 (9 , 2)	27 (19 , 4)	
Total	31	312 (174,33)	512 (288, 70)	824 (462, 103)
Promedio	10.06 (5.6, 1.06)	16.52 (9.3,2.25)	26.58 (14.9,3.32)	
	3.42	4.48	4.65	

ra columna se señala lo mismo que en la segunda, pero para el Océano Pacífico nororiental, la suma de los dos océanos se muestra en la cuarta columna.

Para el período analizado (31 años) se presentaron 312 ciclones tropicales nombrados con un promedio de 10.06 por año para el Océano Atlántico. En el mismo período para el Océano Pacífico, se observa que el promedio es mayor (16.52 ciclones tropicales nombrados por año) con un total de 512. Un comportamiento similar se nota en aquellos ciclones que entran a la República Mexicana; es decir, el promedio para el Océano Pacífico es mayor en estos 31 años (2.26 por año) que aquel del Océano Atlántico (1.06 por año).

Si se tomaran a los océanos Atlántico y Pacífico nororiental como una sola cuenca, el número total de ciclones es de 812 para los 31 años, con un promedio de casi 26.6 por año.

Movimiento de los ciclones tropicales

Los huracanes son “conducidos” por los anticiclones de los océanos tropicales, se mueven aproximadamente en una trayectoria parabólica (Panchev, 1985). Entre los 10° y 20° de latitud norte y sur los huracanes se mueven hacia el oeste por acción de los alisios, acoplados con una tendencia a derivar hacia el norte y tarde o temprano los lleva al límite geográfico de los trópicos, donde los alisios cambian a vientos del oeste. De esta manera, los huracanes cambian de dirección de movimiento hacia el este, aun si ya han entrado a tierra, y regresan sobre el mismo océano, pero más al norte, sobre el cual se habían movido hacia el oeste.

Aunque básicamente correcto, este esquema es muy simple. Se puede decir que el cinturón de los vientos alisios se traslada hacia latitudes extratropicales desde primavera hasta la mitad del verano y entonces se regresan hacia el ecuador. De esta manera, las trayectorias más largas hacia el oeste se encuentran a media temporada. En las etapas inicial y final de la temporada, el movimiento puede dirigirse directamente hacia el norte (en el hemisferio norte) o hacia el sur (en el hemisferio sur) desde su comienzo, pero pronto adquiere una componente hacia el este (Figura 15).

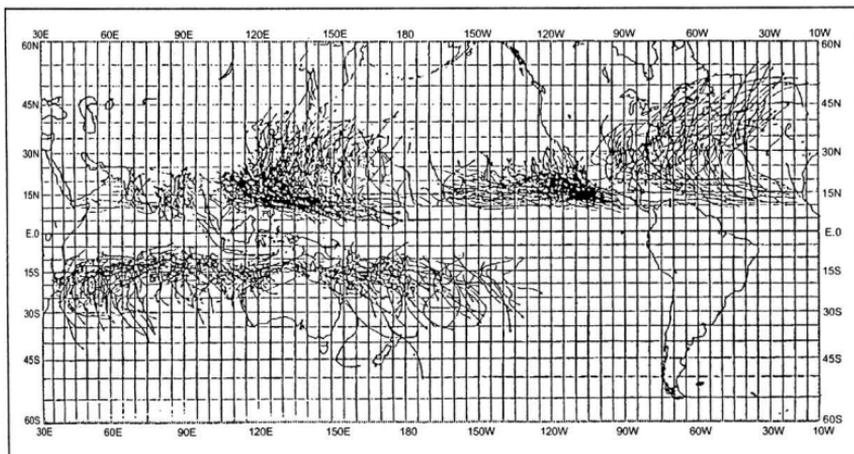


Figura 15. Trayectoria de ciclones tropicales (vientos máximos > 63 km/hr, 34 nudos) para el período 1979 - 1988 (OMM, 1993).

Cuando los ciclones tropicales llegan a las regiones subtropicales, sus trayectorias son influidas por el flujo de las latitudes medias de gran escala. Cuando una vaguada profunda de niveles superiores se extiende hacia las bajas latitudes, los fenómenos tropicales son arrastrados por los vientos en la parte este de la vaguada, alejándolos de los trópicos. Con un flujo de los vientos del este, el movimiento hacia el oeste de los ciclones tropicales puede extenderse indefinidamente y no recurrar. Bajo un débil flujo atmosférico, un ciclón sobre el cual no actúe ningún mecanismo que lo obligue a desplazarse en alguna dirección determinada, puede permanecer estacionario por días, o con un movimiento indeterminado.

Los mayores problemas para el pronóstico de trayectoria se tienen si el flujo en las latitudes más altas no es estable. Un pronóstico satisfactorio de la trayectoria de huracanes depende grandemente de una correcta estimación de lo que sucede a grandes distancias de ellos. Una vaguada profunda puede arrastrar un ciclón tropical en dirección hacia el polo un día, pero al siguiente puede desaparecer y dejar en su lugar un anticiclón. El ciclón primero se moverá hacia el polo –en un patrón “normal” de recurva– se detendrá y entonces, se

moverá más rápidamente en una vuelta hacia el oeste. Tal suceso es más o menos frecuente. Se pueden describir otras trayectorias de mayor complejidad, aunque la trayectoria básica de parábola se mantiene (Figura 16).

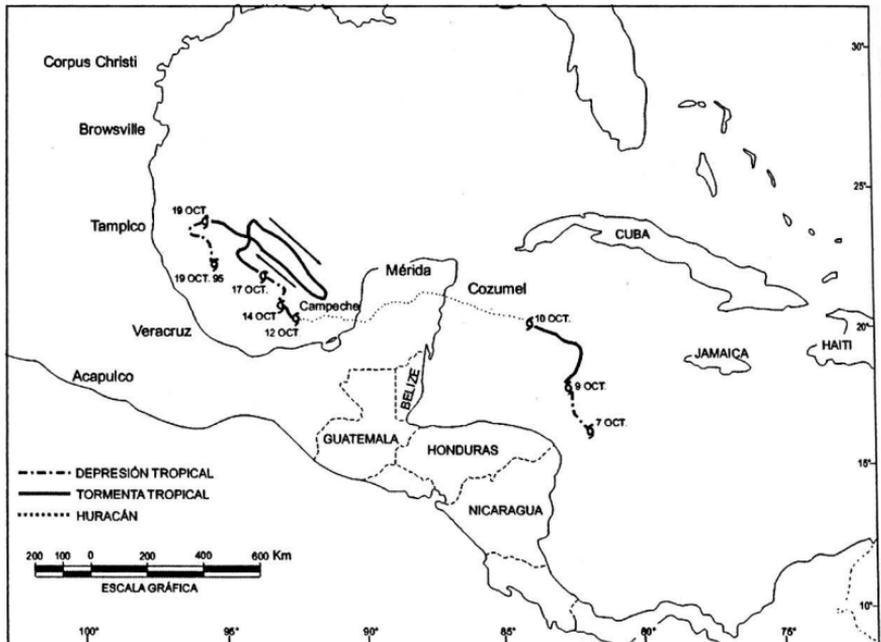


Figura 16. Algunas trayectorias «normales» de huracanes, 1995.

En suma, aun cuando –climáticamente– la trayectoria común de los ciclones tropicales se acerca a una parábola, no se puede acreditar para un ciclón en especial, el cual muy frecuentemente es un caso particular y debe ser tratado como tal, por ejemplo tómense las trayectorias “anómalas” de la Figura 17.

Los ciclones tropicales de México

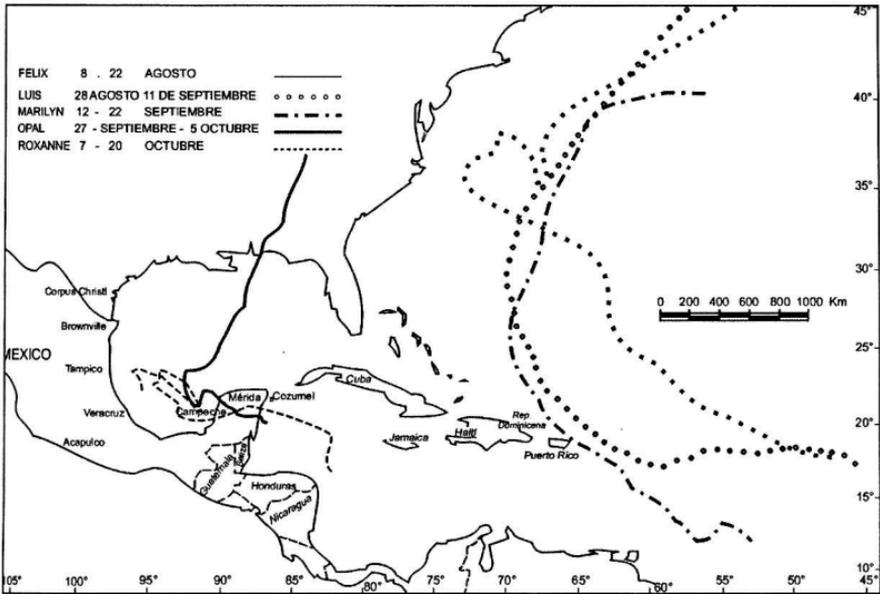


Figura 17. Trayectoria “anómala”. Huracán Roxanne, 1995.

IV. PRONÓSTICO DE LA TRAYECTORIA DE LOS CICLONES TROPICALES

Métodos para pronosticar la trayectoria de los ciclones tropicales

Para que un meteorólogo realice un pronóstico de trayectoria de un ciclón tropical, debe disponer de la mayor cantidad de información posible: datos sinópticos, imágenes de satélite, observaciones de radar, datos del avión de reconocimiento y resultados de los modelos de pronóstico numérico del tiempo.

En los países desarrollados, la infraestructura computacional permite que el procesamiento de los datos sinópticos produzca cartas analizadas automáticamente y que el despliegue de las imágenes de satélite no tome más de treinta minutos, el acceso a las observaciones de radar tome un corto tiempo y los modelos de pronóstico sean de uso común. En los países en desarrollo, la información sinóptica es –generalmente– asentada y analizada a mano, las imágenes de satélite son ahora de uso común, raramente están disponibles las observaciones de radar y los modelos de pronóstico numérico son escasos. De acuerdo con estas circunstancias, el meteorólogo –muchas veces– trabaja bajo una gran presión y le queda poco tiempo para emitir el aviso del ciclón tropical.

Para pronosticar, se piensa que los huracanes en superficie son guiados por las corrientes de la troposfera media y superior, a la cual se le conoce como *corriente conductora*. Pero realmente no se cuenta aún con una información clara que nos indique la dirección de movimiento con base en las corrientes superiores. Para paliar

esta imprecisión, se ha asumido que la corriente promediada verticalmente sería una estimación más adecuada de la velocidad y dirección del flujo y la velocidad con la que es arrastrado el vórtice.

Otro elemento con que se cuenta para poder realizar el pronóstico de la trayectoria, es la climatología de los ciclones tropicales. Se puede notar que en ciertas regiones y temporadas, los CT se mueven a lo largo de trayectorias similares. La aproximación más sencilla consiste en calcular el movimiento medio de todos los CT por grados de latitud/longitud para un período específico de tiempo. Una variación de este método consiste en desarrollar histogramas para los rangos de rapidez y dirección y presentarlos de forma similar a la *rosa de los vientos* sobre cartas de pronóstico. Se pueden elaborar estas cartas para períodos mensuales o estacionales según las necesidades de cada región.

La persistencia es el otro factor importante que se tiene que considerar, ya que las tormentas tropicales tienden a continuar con la misma dirección y rapidez durante algún tiempo. El método más simple es usar el movimiento actual o inmediatamente pasado, manteniéndolo constante, ya sea en la dirección o en la rapidez meridional o zonal. A causa de las incertidumbres inherentes al análisis, se recomienda una aproximación conservadora al utilizar el movimiento de al menos un período de 6 a 12 horas en lugar del movimiento actual.

El siguiente nivel de complejidad consiste en tomar el movimiento actual o patrón de trayectoria. Puede realizarse manualmente manteniendo la curva, aunque es preferible usar alguna aproximación objetiva: el ajuste de una función a la trayectoria usando mínimos cuadrados es una opción, o por medio de una función polinomial

Los métodos sinópticos reconocen patrones de circulación alrededor de los cuales se mueven los CT. Generalmente, aunque no siempre, una fuerte cresta subtropical colocada hacia el lado polar del CT resultará en un movimiento hacia el oeste. Similarmente, en presencia de una vaguada del oeste en los niveles superiores, localizada al oeste del ciclón, es una buena indicación de que puede recurvar.

Como se ha visto, las trayectorias que siguen los ciclones tropicales tienen una componente principal hacia el oeste, pero frecuentemente recurvan hacia el norte, en el hemisferio norte. Es en esta situación cuando el pronosticador se encuentra en graves dificultades, ya que al analizar los mapas aparece una distribución de isohipsas conocida como “collado” o punto silla; es decir, dos anticiclones simétricamente a este y oeste del ciclón tropical, y dos vaguadas una al norte y otra al sur, sin saber qué sistema tendrá mayor influencia en su desplazamiento.

A continuación se muestra un listado de los pasos considerados para emitir un aviso de CT basado en un pronóstico de ciclones tropicales. Se puede apreciar que no sólo se trata del conocimiento de los principios científicos y la aplicación de técnicas, sino también asuntos prácticos. Para proporcionar un aviso lo más efectivo posible se necesita:

1. Un equipo humano capacitado para realizar el pronóstico en una oficina diseñada con este fin.
2. Un equipo de comunicación para el acceso a la información.
3. Tecnología adecuada para el manejo de la información meteorológica.
4. Emisión del pronóstico.
5. Interacción con los medios de comunicación.
6. Preparación antes de la temporada.
7. Evaluación del pronóstico.

Cualquier plan óptimo y eficiente de un Centro de Pronóstico de CT debe incidir en la capacidad de recursos del Servicio Meteorológico en general. Ciertamente los factores económicos pueden ser difíciles de vencer, aun cuando las deficiencias han sido identificadas.

Predicción numérica

La predicción numérica tiene como objetivo pronosticar el estado futuro de la atmósfera sobre la base de su estado actual usando las

ecuaciones de movimiento, de conservación de energía y de masa. La predicción numérica es un campo altamente especializado y en pleno desarrollo. Existen modelos que se pueden aplicar a corto plazo, de los cuales se han derivado los de pronóstico de la trayectoria de los ciclones tropicales.

El primer intento de realizar un pronóstico numérico del tiempo fue hecho por el meteorólogo inglés Richardson en 1922 y reportado en su libro *Weather prediction by numerical process*. Richardson mostró cómo podrían adecuarse las ecuaciones diferenciales que describen el estado general de la atmósfera como ecuaciones algebraicas. Se puede conocer la distribución de tendencias del viento horizontal o la altura de alguna superficie isobárica, dando como conocidos los valores iniciales del viento, de la presión o de la altura geopotencial en una rejilla de puntos que cubren una región determinada. Extrapolando las tendencias en el tiempo se puede lograr una nueva distribución del campo de la variable en cuestión. Este nuevo campo puede recibir el mismo tratamiento para obtener nuevas tendencias y así llegar a un pronóstico de las variables a un período de 12, 24, 36 o 48 del campo inicial.

Sin embargo, aunque la región sea pequeña y el tiempo de pronóstico sea corto, el número de operaciones matemáticas necesarias es enorme. Richardson realizó un pronóstico de las tendencias de presión, obteniendo resultados incongruentes, éstos provocaron que se abandonara todo intento de realizar un pronóstico numérico. Fue hasta después de la Segunda Guerra Mundial que el pronóstico numérico tomó interés, ya que se contaba con un nuevo instrumento: la computadora digital. También se habían mejorado las observaciones y las comunicaciones.

Al mismo tiempo, se descubrió que las ecuaciones de Richardson no sólo describen los movimientos meteorológicamente importantes sino que también contienen ondas de sonido y de gravedad que son amplificadas en el proceso de cálculo, oscureciendo a las ondas meteorológicas.

Charney en 1948 mostró que, mediante lo que conocemos como aproximación geostrofica e hidrostática, se puede filtrar a las ondas

sonoras y gravitatorias; las ecuaciones de Charney se conocen como el modelo “casi geostrófico”. Este modelo pronostica el campo de altura geopotencial en un nivel que se encuentra aproximadamente a 500 mb, es decir, no pronostica el tiempo en el sentido usual, sino los cambios de este campo.

Con el desarrollo de las computadoras se han diseñado modelos más detallados, llegando a utilizar las ecuaciones de Richardson que se conocen actualmente como modelos de ecuaciones primitivas. Para pronosticar la trayectoria de los ciclones tropicales se han desarrollado modelos tanto de ecuaciones primitivas como modelos filtrados. En el Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos se cuenta con varios modelos de pronóstico numérico (Cuadro 6). De éstos, el CLIPER se basa en la climatología y la persistencia, sus resultados se usan como medida de la habilidad de otros modelos, sus predictores son latitud y longitud de la tormenta, el vector de

Cuadro 6. Modelos en operación en el NHC de Estados Unidos

Modelo	Significado	Tipo
CLIPER	<i>CL</i> imatology and <i>PER</i> sistence	Estadístico
NCH90	<i>N</i> ational <i>H</i> urricane Center 90	Estadístico
NCH91	<i>N</i> ational <i>H</i> urricane Center 91	Estadístico
AVN	<i>A</i> viation (<i>E</i> stados Unidos)	Baroclínico global
NOGAPS	<i>N</i> avy (<i>E</i> stados Unidos)	Baroclínico global
UKMET	Meteorología (Reino Unido)	Baroclínico global
GFDL	<i>G</i> eophysics <i>F</i> luids <i>D</i> ynamic <i>L</i> aboratory	Barotrópico de área limitada
GFDI	Interpolado (del GFDL)	Barotrópico de área limitada
LBAR	<i>L</i> imited <i>BAR</i> otropic	Barotrópico de área limitada
BAM	<i>B</i> eta <i>A</i> dvection <i>M</i> odel	Barotrópico de trayectoria
BAMS	<i>BAM</i> <i>S</i> hallow (somero)	Barotrópico de trayectoria
BAMM	<i>BAM</i> <i>M</i> edium (medio)	Barotrópico de trayectoria
BAMD	<i>BAM</i> <i>D</i> eep (profundo)	Barotrópico de trayectoria

movimiento, el día juliano y la intensidad. El modelo NCH90 se utiliza para pronóstico de la trayectoria de los huracanes que se producen en el Océano Atlántico, mientras que para el Pacífico nororiental se hace uso del NHC91; los modelos baroclínicos como el AVN, el NOGAPS y el UKMET incluyen procesos de la capa límite y de convección, así como de radiación. Los de área limitada usan campos de viento promediados en la vertical.

Los pronósticos se han realizado a 12, 24, 36, 48 y 72 hr y actualmente hasta cinco días, aunque también existen a plazos más cortos, con errores que se tratan de disminuir año tras año. En 1997 Mark DeMaria reportó los errores que se obtuvieron en el pronóstico de la trayectoria de los huracanes para las temporadas 1996 y 1997 en las cuencas del Pacífico nororiental y del Atlántico.

En esta tabla se nota que para el Atlántico los mejores resultados los produce el modelo LBAR, mientras que en el Pacífico nororiental tienen mejor desempeño el NCH91. En general, con el modelo CLIPER los errores son menores en el Pacífico que en el Atlántico, respetando el hecho de que en el Pacífico los ciclones tropicales describen trayectorias más uniformes, mientras que en el Atlántico son más sinuosas y frecuentemente recurvan al norte.

En nuestro país, la predicción numérica del tiempo se ha desarrollado desde finales del siglo xx (Buendía y Delgado, 1981), en el caso particular del pronóstico de la trayectoria de los ciclones tropicales, se integró un modelo Baroclínico de dos parámetros aplicado a la AR IV, en el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA de la UNAM).

Los logros obtenidos al aplicar este modelo baroclínico son evaluados estadísticamente y se cuenta con resultados desde 1981, año en que se ejecutó con éxito el primer pronóstico numérico en México. En 1988 se realizó el primer pronóstico de la trayectoria de un ciclón, el caso de Gilbert, que se presentó en el Mar Caribe y que afectó a la península de Yucatán, Golfo de México y a la ciudad de Monterrey (Buendía *et al.*, 1992).

El modelo en operación en el CCA, que se basa en la teoría “casi-geostrófica”, tiene una resolución de 108 km y se ejecuta para obtener pronósticos de la trayectoria de los ciclones tropicales tanto del

Tabla 2. Errores de pronóstico en millas náuticas (mn), para 1996 y 1997 (DeMaria, 1997)

Modelo	Atlántico					Pacífico nororiental				
	12	24	36	48	72 (hr)	12	24	36	48	72 (hr)
CLIPER	51	103	161	120	351 (mn)	42	80	122	165	235 (mn)
NCH90	46	85	129	180	285	—	—	—	—	—
NCH91	—	—	—	—	—	41	74	103	135	209
BAMS	61	114	168	22	336	51	91	129	163	211
BAMM	49	91	133	177	268	47	83	113	144	208
BAMD	47	88	132	183	293	48	87	120	152	233
GFDI	42	69	98	128	200	55	93	119	154	230
LBAR	41	75	111	159	284	43	80	112	148	229
Núm. de casos	346	310	279	255	207	289	244	197	166	110

Atlántico como del Pacífico, a 12, 14, 36 y 48 horas. Son enviados a diferentes dependencias del gobierno como: el Centro Nacional para la Prevención de Desastres (CENAPRED), la Secretaría de Marina, la Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA), el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM).

Al obtener estos resultados, se contribuye a mejorar las predicciones emitidas por los servicios meteorológicos y así tratar de disminuir los daños que ocasionan estos fenómenos, principalmente en lo que se refiere a vidas humanas, ya que un aviso con 24 horas de anticipación resulta extremadamente valioso.

Pronóstico estacional en la cuenca del Atlántico

La actividad ciclónica está dada fundamentalmente por el número de sistemas tropicales con lluvia y vientos fuertes asociados. Un conocimiento *a priori* de la frecuencia de los CT durante una temporada ciclónica, en una región determinada, es de interés, ya que per-

mite estar alerta sobre todo en aquellos años en que se predice un número de ciclones por encima de lo normal. De ahí que ésta sea la característica más importante, como elemento a pronosticar. También resulta interesante averiguar con antelación la fecha aproximada en que debe surgir el primer CT y disiparse el último, teniendo en cuenta que para México, al principio y al final de la temporada son períodos de alto riesgo. Atendiendo a lo antes dicho, son elementos a pronosticar: el número de CT, el número de huracanes y los días en que se forma la primera tormenta tropical, además del día en que se disipa el último.

La cuenca Atlántica presenta grandes variaciones cada año, tanto en el número de ciclones tropicales, como en la intensidad que alcanzan. Por ejemplo, 1996 fue extremadamente activo, con nueve huracanes, seis de los cuales afectaron a la región del Mar Caribe. En contraste, 1997 fue un año muy tranquilo, con sólo tres huracanes, ninguno de los cuales afectó el Caribe. En los trabajos de Gray (1984a, 1984b y 1992) se mostró que los huracanes del Atlántico están determinados por “El Niño” –Oscilación del Sur–, la oscilación casi bianual estratosférica y algunos otros factores locales, tales como: temperatura de la superficie del mar, la intensidad del monzón y la lluvia asociada a él, las presiones superficiales y por la cizalladura vertical del viento.

Problemas teóricos por resolver

El ciclón tropical maduro puede idealizarse como “una máquina de Carnot” (Emanuel, 1986; 1990), que transforma la energía calorífica extraída del océano en energía mecánica. El aire es transportado radialmente en espiral en la capa límite hacia el centro, casi en equilibrio termodinámico con el océano; luego sube adiabáticamente a altitudes mayores, donde el exceso de calor es perdido por radiación electromagnética al espacio, el ciclo se cierra al bajar el aire hasta la superficie calentándose adiabáticamente.

La eficiencia de este ciclo es:

$$E = (T_s - T_0) / T_s,$$

donde T_s es la temperatura de la superficie del mar y T_0 es la temperatura en la cima de la tormenta, su magnitud típica es $E=1/3$.

Mientras que la fuente de energía para un ciclón tropical maduro ha sido reconocida desde mediados del siglo xx, la polémica persiste en cuanto a los mecanismos energéticos y dinámicos de la génesis del ciclón. La evidencia observada y la experiencia pronosticadora favorecen la idea de que el huracán resulta de una inestabilidad de amplitud finita: las perturbaciones débiles están decayendo a menudo incluso dentro de condiciones ambientales favorables, y los ciclones son, después de todo, raros, no obstante la presencia de un almacén de energía.

En el principio de los años sesenta del siglo xx, la teoría conocida como Inestabilidad Condicional de Segunda Clase (ICSC) fue propuesta para explicar la génesis del ciclón. En esta teoría, la superficie oceánica sirve como un sumidero para el *momentum* pero no como una fuente de calor. La ICSC se basa en que existe energía convectiva almacenada en la atmósfera. Sin embargo, análisis cuidadosos de la atmósfera marítima tropical muestran almacenamiento pequeño de energía convectiva, y las pocas zonas localizadas (América Central norte en primavera), aunque exhiben aumentos grandes de almacenamiento de energía convectiva, no son productoras de ICSC. También, el ICSC es una inestabilidad fundamentalmente lineal; predice que los ciclones incipientes serían características determinantes de todas las atmósferas convectivamente inestables.

Emanuel (1986) propuso una teoría alternativa que contempla a la ciclogénesis como resultante de inestabilidad por "Intercambio de Calor Superficial Inducido por el Viento" (ICSV) de amplitud finita en la atmósfera tropical, mantenida por una retroalimentación positiva entre los flujos superficiales de calor y el desplazamiento superficial adiabático del aire de la capa límite. Por tanto, no tiene almacenada energía convectiva. La re-evaporación del agua condensada en el aire de entropía baja de la troposfera media parece ser

la razón para la naturaleza de la amplitud finita de la inestabilidad. El arrastre hacia abajo resultante importa aire de baja entropía dentro de la capa límite, a una razón que excede el flujo de entalpía de la superficie del océano. La intensificación ocurre cuando la entropía del aire de la troposfera media, ha sido suficientemente levantado para debilitar sustancialmente el flujo bajo de entropía dentro de la capa límite por el arrastre hacia abajo. Mientras estas ideas son consistentes con la compleja simulación numérica, todavía tienen que ser probadas sistemáticamente en los ciclones tropicales reales.

Aunque las razones para la naturaleza de amplitud finita de ciclogénesis tropical son identificadas correctamente, el problema de cómo explicar la iniciación de una perturbación persistiría. Las observaciones indican que una variedad de circulaciones de origen dinámicamente independiente puede iniciar los ciclones tropicales. Esto incluye las ondas del este, que son perturbaciones ondulantes en el flujo aéreo del este, especialmente sobre el oeste de África y en el Pacífico central; los desarrollos baroclínicos en los subtropicos y las complejas tormentas continentales de mesoescala que ocasionalmente derivan hacia el mar. Una teoría completa de amplitud finita de los huracanes presumiblemente especificaría las características requeridas de la iniciación de las perturbaciones.

Además del problema de la génesis, algunos aspectos del comportamiento del huracán se han entendido muy poco, como es el que unos CT tengan mayor intensidad que otros. Una vez que las condiciones iniciales han ocurrido y un ciclón se desarrolla, muy pocos alcanzan la categoría de mayor intensidad. Por otro lado, las simulaciones numéricas las intensifican consistentemente. ¿Por qué es diferente la naturaleza? Una posibilidad es que casi todos los huracanes están limitados por el agua fría, que invariablemente se mezcla hacia arriba desde debajo de la termoclina oceánica estacional. Los cambios de temperatura observados en la superficie del mar son tan grandes como 5° C; pero tan sólo se requiere de 2.5° C de enfriamiento para dar marcha atrás al desequilibrio termodinámico aire-mar. Los estudios preliminares muestran que el enfriamiento inducido puede, desde luego, limitar la intensidad de muchos ciclones; sin

embargo, una simulación comprensiva con un modelo acoplado océano-atmósfera debe ser llevada a cabo.

Las bandas espirales de las nubes convectivas que dan al ciclón su apariencia característica en las fotografías de satélite no han sido satisfactoriamente comprendidas. Las teorías existentes incluyen la inestabilidad de la Capa de Ekman y ondas de gravedad inercial propagándose hacia fuera desde la pared del ojo. Estas teorías no han sido rigurosamente probadas con las observaciones. Algunos ciclones exhiben paredes concéntricas del ojo que están sometidas a una evolución característica en que contraen al ojo hacia dentro, la pared interior se disipa y una pared nueva se forma a un radio mayor (Willoughby *et al.*, 1982). No hay explicación aceptada para este fenómeno.

Finalmente, el movimiento del ciclón pertenece al enfoque de investigación teórica y experimental. Muchas teorías se enfocan sobre la deriva de los vórtices barotrópicos sobre el plano Beta (en donde la componente vertical de la rotación de la Tierra varía linealmente con la latitud). Estas teorías predicen que los ciclones se moverían hacia el oeste y hacia el polo con respecto al viento medio. No explican la no-uniformidad del gradiente potencial de vorticidad en que estos fenómenos están embebidos, ni reconocen ciclones como vórtices fuertemente baroclínicos con anticiclones en la troposfera más alta, dando como resultado que para explicar tales efectos, se altera radicalmente el entendimiento del movimiento del ciclón.

Los ciclones presentan un buen número de problemas fascinantes e insolubles que han recibido poca atención de los teóricos. Todos ellos permanecen como materia de investigación fértil e importante.

V. EFECTOS DE LOS CICLONES TROPICALES

Todavía a principios del siglo xx, un ciclón tropical podía tomar por sorpresa a una población; sin embargo, actualmente con los instrumentos y técnicas de monitoreo atmosférico, esta situación es diferente. Ahora se cuenta con los conocimientos científicos y tecnológicos para poder conocer con cierta antelación sobre la posible incidencia de estas tormentas, así como las medidas para hacerle frente a los daños generados por estos fenómenos. La capacidad destructiva de un ciclón tropical se deriva de cuatro aspectos principales: viento, marea de tormenta, oleaje y precipitación pluvial.

Efectos del viento

El viento es, sin lugar a dudas, lo que fundamentalmente caracteriza a un ciclón tropical y lo diferencia de otros tipos de tormentas severas. De hecho, directa o indirectamente, el viento es también el productor de otros efectos de peligro como el oleaje, la marea de tormenta y la precipitación.

Los vientos de un ciclón tropical son muy fuertes y arrachados, y pueden persistir muchas horas o días. Es importante tener en cuenta que cuando el ojo del huracán pasa por un punto, a los vientos fuertes que soplan en una dirección, sigue un período de calma y, luego, reinician los vientos fuertes soplando en dirección opuesta.

La energía cinética de los vientos huracanados ocasiona una gran parte de los daños debido a que su fuerza aumenta en forma

geométrica con respecto a su velocidad y así, si la velocidad se duplica, la fuerza se cuadruplica. La velocidad de las rachas de viento es siempre mayor a su velocidad sostenida, y en el contexto de los ciclones tropicales puede llegar hasta un 30 o 35% por encima del viento sostenido. La diferencia entre ambas se magnifica al entrar el ciclón a tierra, pues la turbulencia es mayor ahí que en alta mar. Ambas velocidades de viento son importantes. Algunos daños por viento se encuentran asociados a fuerzas constantes de larga duración ejercidas por el viento sostenido, mientras que otros se encuentran asociados a los máximos extremos del viento en rachas.

Los daños que pueden ocurrir por efecto del viento son reconocidos como mecanismos de falla, éstos se clasifican en totales, parciales o locales. Las fallas totales producen un colapso completo o casi completo de una estructura de forma abrupta, debido a que las fuerzas del viento que actúan sobre ella rebasan su resistencia. Las fallas parciales se presentan cuando partes específicas de la estructura (el techo por ejemplo) son separadas de la misma, debido a que la resistencia del anclaje a ella fue rebasada por las fuerzas que actuaban sobre dicha parte. Las fallas locales son de menor magnitud, ocurren en lugares específicos donde se concentran altas velocidades de viento (por ejemplo, las tejas de un techo). No siempre es obvio el tipo de falla presentada, una estructura que se observa colapsada al final del paso de un CT pudo haber presentado fallas locales en un principio, mismas que pudieron haberse propagado hasta crear una falla parcial y, eventualmente, haber ocurrido la falla total.

No todo los daños por viento son estructurales; una gran cantidad del valor económico de los daños ocurre en el interior de las construcciones al romperse la ventanería y crearse fuertes corrientes de viento en el interior del inmueble.

Aunque cualquier estructura se ve afectada, de mayor o menor grado, por vientos intensos, existen algunos tipos que son especialmente vulnerables como los anuncios publicitarios llamados espectaculares, y aunque no representan una pérdida económica significativa, sí ponen en peligro a los habitantes de su alrededor; al convertirse en fuente de piezas que al ser suspendidas por el viento,

se vuelven proyectiles muy peligrosos y producen fallas secundarias en líneas de electricidad o teléfonos, entre otras.

Otro ejemplo corresponde a la vegetación, en particular a los árboles que pueden sufrir fallas parciales (ramas aisladas) y totales (colapso del tronco). En ambos casos, son importantes como un peligro directo a la población, pero también por el hecho de que producen daños secundarios a las líneas de servicios aéreos (teléfonos y electricidad) y subterráneos (gas, agua potable y alcantarillado). En los últimos ocurre cuando el sistema de raíces del árbol falla y extrae el terreno en el que se encontraba empotrado, junto con todas las líneas de servicios cercanas. Por supuesto, los árboles altos, frondosos, viejos o en deficiente estado de salud y aislados son los más susceptibles a los daños.

Las edificaciones con grandes ventanales son muy sensibles a los daños directos y secundarios por viento, sobre todo al fallar masivamente las ventanas, pues permiten una grave intemperización de los interiores. Otra circunstancia que hace a una obra muy vulnerable al viento es el hecho de que se encuentre en construcción, por el carácter temporal de cimbras, grúas, etcétera. Éstos pueden sufrir graves daños, e inclusive actuar como proyectiles.

Las principales zonas consideradas de mayor vulnerabilidad por viento son:

- a. La periferia de las áreas urbanas, ya que no cuentan con la protección adicional de las edificaciones vecinas que reducen la velocidad del viento.
- b. Zonas donde topográficamente se espera un aumento local del viento, como en el caso de lugares localizados en la pendiente ascendente.
- e. Estructuras sujetas a mayores velocidades de viento por su altura, edificaciones altas, postes, árboles de gran altura, etcétera.
- d. Áreas donde se puedan esperar encañonamientos severos del viento, como en cañadas o calles angostas.
- f. Zonas viento abajo de otras que puedan proveer gran cantidad de proyectiles (desechos de estructuras o vegetación) y producir daños por impacto.
- g. Lugares directamente en la costa y en islas.

Uno de los mayores peligros que un ciclón tropical ofrece a las personas sorprendidas al aire libre sin protección alguna, es precisamente el ser golpeados por objetos voladores arrastrados por el viento, pues éste puede levantar toda clase de objetos. Entre los muy comunes se encuentran muebles de jardín, mangueras, bicicletas, láminas desprendidas de techos, anuncios, pedacería de vegetación, etcétera.

Los daños producidos por el viento en campos agrícolas en general, no son fáciles de evaluar, debido principalmente a su amplia distribución geográfica y al hecho de que muchos de los daños se dan por combinación de varios efectos: viento, lluvias, etc. De todas formas es lógico prever que vientos muy intensos producen daños significativos a campos agrícolas en zonas amplias y descubiertas.

La mejor medida de prevención de desastres asociada a viento es, definitivamente, el construir estructuras que resistan los flujos máximos de éste, a los que probablemente se verán sujetas en su vida útil. Esto debe reflejarse en las especificaciones técnicas que aparezcan en los reglamentos de construcción, sobre todo en regiones costeras. Otro aspecto que destaca en la prevención, es la aplicación de poda de árboles, previo al inicio de la temporada de ciclones tropicales; esto no sólo minimiza el riesgo del desprendimiento de ramas, sino el colapso total del árbol. Además, se debe considerar un programa de reforestación que incluya plantas nativas adaptadas de mejor manera a la resistencia de vientos fuertes.

Principales recomendaciones en caso de viento intenso para la población (Rosengaus, 1998).

1. No menospreciar el peligro que ofrecen los vientos intensos, ya que por ejemplo, si alguien quiere caminar contra viento de 115 km/h, requiere inclinarse 45° hacia delante de la dirección del viento y en vientos mayores necesita sujetarse de un pasamanos para poder hacerlo. Asimismo, protegerse del peligro que representan pequeños proyectiles, que incluso pueden causar la muerte.
2. Deben resguardarse sólo en edificaciones de características adecuadas, idealmente de mampostería con estructura de concreto armado, sin grandes ventanas y con techos de losa.

3. Proteger las ventanas con cubiertas, o en su defecto colocarle cinta adhesiva (ancha y resistente) de extremo a extremo en forma de asterisco. Esto no evitará roturas, pero minimizará la posibilidad de vidrios volando en el interior del inmueble.
4. Recoger absolutamente todo objeto en el exterior que pueda salir volando arrastrado por el viento (muebles de jardín, bicicletas, mangueras, etc.) y colocarlos en el interior.
5. Podar ramas viejas de toda vegetación alrededor del inmueble para disminuir su resistencia al viento.
6. Pensar en resguardar a mascotas y animales de granja, con agua y alimento suficiente para, por lo menos, tres días.

Efectos del oleaje

El oleaje se genera cuando la energía del viento se transfiere al mar. La magnitud del oleaje en aguas profundas depende de la velocidad y duración del viento. En la práctica es común que se utilicen mapas de superficie para obtener la altura de la ola ciclónica. Éstos están elaborados con base en el análisis de datos meteorológicos observados simultáneamente en diferentes puntos de un área muy amplia y muestran curvas de igual presión atmosférica.

Cerca de la costa, en aguas poco profundas, el oleaje no puede aumentar más allá de ciertos límites que son determinados por la profundidad, la fricción que se desarrolla en el fondo y la condición del rompiente. Estos factores son los que se presentan típicamente en la costa norte de la península de Yucatán. En ella, la plataforma continental alcanza cientos de kilómetros de extensión; el oleaje, afectado por su interacción con el fondo, cambia de dirección y altura por la refracción y, finalmente, se producen los rompientes debido a la fricción que se genera a bajas profundidades (rompientes de aguas someras). Por ello, para iguales condiciones de viento se puede esperar un oleaje máximo reportado en alta mar, mucho mayor al que se pueda alcanzar en la costa.

El analizar las condiciones específicas de la costa también es importante para delimitar las zonas con alta vulnerabilidad; por ejem-

plo: franjas costeras con zonas de manglares, lagunas costeras o bancos de arena naturales frente a las costas, producirán atenuaciones significativas en el tamaño de las olas que llegan a éstas.

Los daños provocados por el oleaje que produce un ciclón tropical pueden clasificarse en dos grandes grupos:

- a. Los derivados de la agitación del mar, que afectan sobre todo a las embarcaciones, inclusive de gran tamaño, a distancias significativas del ojo del *CT*. Sin embargo, es importante estar conscientes de que las olas en alta mar no son rompientes, como las que observamos directamente sobre la costa. El peligro mayor en las condiciones ciclónicas es que muchas de las crestas de las olas rebasan momentáneamente el nivel de la cubierta de muchas embarcaciones y pueden arrastrar cualquier objeto en ellas. Asimismo, el oleaje de gran magnitud sujeta a los cascos de los barcos a esfuerzos extremos, pudiendo producir fallas en sus estructuras, e inclusive si se conjugan el viento y el oleaje en la misma dirección, generan un arrastre extraordinario sobre las embarcaciones, llevándolas a encallar en la costa.
- b. Los que se producen al trasladarse la ola rompiente tierra adentro por la marea de tormenta, que afecta al litoral, como a las edificaciones cercanas a la costa. El oleaje es un movimiento oscilatorio sobre la superficie del mar que tiene un cierto alcance tierra adentro dependiendo tanto del nivel del mar como del relieve del terreno. El efecto destructivo de las olas ciclónicas (ya sea por impacto y arrastre de materiales) puede alcanzar grandes distancias tierra adentro, siendo comunes franjas de 100 a 500 m dentro de la línea normal de costa.

El daño más obvio sobre una costa atacada por un ciclón tropical intenso incluye: la erosión generalizada de la costa, eliminación de material suelto en las playas, depósitos de arena en lugares que previamente no la tenían, modificaciones de la morfología de la costa, apertura de nuevas bocas a lagunas costeras. También una de las principales causas de fallas de estructuras costeras es la erosión del

terreno sobre la que se encuentran asentadas. En general, durante un ciclón tropical, la erosión y la deposición no son despreciables; pueden producir cambios claramente visibles en el orden de horas. Por supuesto que el impacto del oleaje sobre el material de la costa misma puede remover grandes bloques rocosos y pulverizar rocas de ciertos tipos.

Asociado al oleaje se encuentra el tema de los reglamentos de construcción y uso del suelo en zonas costeras, aunque es usual comprobar que éstos son ignorados por la población, pues los intereses económicos y turísticos hacen que las franjas costeras tiendan a poblarse con una alta proximidad al mar. Por tanto, lo ancho de la franja que debe permanecer sin construcciones cerca del litoral depende fuertemente no sólo de la topografía, la vegetación, los depósitos naturales de arena, etc., sino también de la topografía submarina cercana.

Es por ello que toda construcción que se encuentre en la posibilidad de ser atacada por el oleaje, debe tener la estructura suficiente para soportarlo y la decisión de construir debe basarse en los criterios de seguridad y económicos que consideren el riesgo al que se encuentra expuesta.

Otro de los elementos de prevención de gran relevancia es la evacuación oportuna de las franjas costeras que serán afectadas por oleaje intenso, como una de las acciones más importantes a realizar al enfrentar la emergencia de un ciclón tropical. La extensión de la zona de evacuación depende de la topografía de la costa, ya que la penetración del oleaje será mayor en zonas llanas que en lugares de topografía accidentada.

Las principales recomendaciones a la población ante el oleaje ciclónico son:

1. Evacuar una franja costera amplia (aproximadamente 200 m) y la primera línea de edificaciones.
2. Nunca ir a observar el espectáculo del oleaje ciclónico incidiendo sobre la costa, pues las olas individuales pueden ser mucho mayores que el promedio y pueden sorprender y arrastrar a los observadores con suma facilidad.

3. No colocarse en terrenos o lugares sujetos a deslaves por incidencia directa del oleaje sobre de ellos.
4. Evitar circular en carreteras costeras y puentes bajo condiciones de oleaje severo.
5. Ser muy cuidadosos con el oleaje incidente en forma independiente a la velocidad local del viento.
6. En caso de verse atrapado en una zona sujeta a oleaje directo, resguardarse en los segundos niveles de edificaciones con muros de gran espesor.
7. Evitar los deportes acuáticos en las zonas de incidencia de oleaje ciclónico.

Efectos de la marea de tormenta (surgencia de tormenta)

La marea de tormenta es la manifestación menos obvia de un ciclón tropical para la población en general, pero, a la vez, se considera con base en estadísticas mundiales, como la que genera un mayor número de muertes. La dificultad de percibir a la marea de tormenta como el peligro que realmente representa proviene del hecho de estar siempre mezclada con otras manifestaciones, como el oleaje y la variación regular del nivel del mar.

Las tormentas en general, y especialmente los ciclones tropicales con sus intensos vientos y bajas presiones, provocan variaciones del mar que se encuentran superpuestas a las variaciones comunes (astronómicas). Éstas son denominadas marea de tormenta.

La manifestación más clara y peligrosa de la marea de tormenta en un ciclón tropical, es el incremento del nivel del mar en ciertas zonas, lo que produce una invasión de las aguas marinas sobre zonas normalmente terrestres. Esto no es fácil de percibir para la población, ya que sólo observa que el oleaje avanza tierra adentro sin identificar que se trata de una inundación con oleaje superpuesto.

El efecto destructivo de la marea de tormenta corresponde a la inundación masiva de aguas marinas sobre zonas terrestres, no se trata de una invasión pacífica de agua, debido a la velocidad a la que ocurre en unas cuantas horas, y se generan fuertes corrientes en la

inundación que producen fallas de estructuras, erosiones, arrastre de objetos, etcétera.

La forma de la costa es un factor importante a considerar. En el caso de una bahía, se dificulta el libre flujo de las corrientes producidas por los vientos ciclónicos, acumulándose más agua en la zona y aumentando de altura de la marea de tormenta. Asimismo, si la costa es abierta, la marea que se produce es de menor importancia.

La inundación producida por la marea de tormenta se caracteriza porque se presenta con una enorme cantidad de agua disponible para inundar la zona terrestre; es salada y produce contaminación por sal a los acuíferos y pozos, además de dañar la ecología local; no es posible conocer con precisión el área posiblemente afectada por la marea.

Uno de los peligros más importantes es la superposición del oleaje (extraordinario) sobre el nivel del mar incrementado por la marea de tormenta. El resultado final es que el oleaje puede incidir sobre estructuras en las que jamás se pensó podrían ser afectadas.

La marea astronómica y la marea de tormenta producen variaciones en el nivel del mar que deben ser superpuestas para llegar a una estimación del máximo nivel del mar, tanto para actividades de prevención de desastres como de toma de decisiones de emergencia.

En contraste con el caso de los efectos destructivos del oleaje, las zonas inundables por marea de tormenta son en general suficientemente extensas y es difícil prohibir la construcción en las franjas costeras consideradas de alto riesgo. Sin embargo, se puede prohibir la edificación en zonas muy bajas cercanas a la costa que pueden quedar completamente bajo el agua o incomunicadas con tierra firme durante una tormenta. Las construcciones esenciales para la atención de la población durante la emergencia (centros de operación, refugios temporales, hospitales, etc.) o de peligro (por ejemplo, plantas o laboratorios de químicos peligrosos), deberán estar prohibidas en estas zonas de alto riesgo.

Durante los ciclones tropicales, uno de los sectores más afectados es el de los pescadores y el de embarcaciones para otros usos (pesca deportiva, transporte, recreativas, etc.). Éstas sufren daños debido al estado de agitación del mar (oleaje). Para proteger las

embarcaciones durante tormentas se construyen las llamadas bahías de abrigo (lugar en la costa con uno o varios rompeolas, además de presentar alguna protección natural), en ellas se reduce la agitación del mar.

Sin embargo, la marea de tormenta que se presenta durante un ciclón tropical produce varios problemas como: *a)* las embarcaciones se sueltan de las amarras o anclajes debido a su flotación y, cuando no lo hacen, estas amarras pueden producir el hundimiento de la embarcación; *b)* el oleaje intenso rebasa los rompeolas y genera un estado de agitación imprevisto en el interior de la bahía, produciendo que las embarcaciones se suelten y navegan a la deriva.

Las manifestaciones destructivas y daños son importantes en la marea de tormenta, pero la información de destrozos es escasa, hasta el punto de ser prácticamente ignorada. Esta enorme deficiencia, probablemente se debe más a la ignorancia sobre el fenómeno que a cualquier otra razón.

Las medidas posibles para la protección de centros de población contra la marea de tormenta se reducen a barreras de protección costera y a la sobre elevación del nivel del suelo en centros de población de interés; sin embargo, estas medidas son muy costosas y de poca efectividad.

En condiciones de marea de tormenta es importante recordar la delimitación de las zonas a evacuar y el tiempo disponible para hacerlo, ya que debe considerarse que las zonas a evacuar son mayores a las que realmente el fenómeno afecta, así como que el tiempo disponible para realizar las maniobras de evacuación tienen un límite práctico.

Las recomendaciones más relevantes para la población en el caso de la marea de tormenta son:

1. No menospreciar el peligro de inundación costera, sobre todo por las fuertes corrientes que pueden generarse, además de que junto con el oleaje superpuesto, puede ser sumamente destructiva.
2. No trasladarse bajo condiciones de inundación, pues las corrientes pueden arrastrar a personas y vehículos.

3. No caminar sobre las zonas inundadas descalzo o con calzado ligero. Una gran cantidad de peligros puede estar ocultos bajo el agua (objetos punzo-cortantes, hoyos, cables, etc.).
4. Las personas atrapadas por la inundación deben buscar refugio en plantas altas de edificaciones sólidas o en montículos naturales del terreno.
5. No arriesgar la seguridad personal intentando proteger en el último momento a una edificación de la inundación con sacos de tierra.
6. Cerrar o desconectar servicios de gas y electricidad en el interior de las construcciones, ya sea que éstas sean evacuadas o no.
7. Considerar el posible cambio de nivel al anclar, amarrar o retirar del agua alguna embarcación.
8. Proteger los pozos y cisternas de agua potable cerrando y sellando sus bocas.
9. No tomar agua de la inundación aunque aparente estar limpia. Lo mismo se recomienda para lavado de alimentos, limpieza de trastos, etcétera.

Efectos de la precipitación

En países de gran extensión y zonas no eminentemente costeras, la población en general percibe a la intensa precipitación como el único de los peligros que un CT ofrece. Esto se debe a que ésta tiene una gran penetración continental y permanencia aun bajo condiciones de disipación del ciclón. Así pues, un gran porcentaje de la población considera importantes a los ciclones tropicales únicamente por la lluvia que producen. Asimismo, en países continentales y zonas no costeras, la mayor parte de los daños ocasionados por los ciclones se deben directa o indirectamente a su precipitación.

Sin embargo, la precipitación es el efecto destructivo de los ciclones más difícil de modelar, estimar en el tiempo real y pronosticar. Simplemente, la estructura instantánea de las lluvias alrededor del centro de giro de un ciclón tropical y su evolución en el tiempo resultan mucho más caóticas que en el caso del viento, oleaje y ma-

rea de tormenta, sobre todo cuando el fenómeno ya ha incidido sobre tierra e interactúa con la topografía local.

Las grandes cadenas montañosas interfieren el libre flujo de un ciclón tropical destruyendo eventualmente su organización y el mecanismo por el que una enorme cantidad de humedad se encuentra suspendida en la atmósfera. Por ello, aun en etapa de plena disipación, las lluvias ciclónicas pueden resultar de gran magnitud en las zonas montañosas. Por otro lado, las montañas fungen como rampas de ascenso del aire húmedo y con ello amplifican la actividad convectiva, es así que debe esperarse una mayor concentración de lluvia en las laderas de las sierras, en las que el flujo ciclónico lleva aire húmedo.

De los efectos destructivos, la lluvia es el más difícil de pronosticar, pues aunque existe un campo de lluvia con cierta estructura alrededor del ojo, la ubicación precisa de los núcleos convectivos de gran intensidad sobre las espirales es difícil de establecer, además de ser altamente cambiante. Por ello, aun con un pronóstico adecuado de la trayectoria e intensidad, la lluvia no puede ser pronosticada con buena precisión. Se considera que los ciclones más terribles son aquellos que tienen una baja velocidad de traslación, pues dichas tormentas actúan durante más tiempo en cada sitio y permiten una acumulación de lluvia mayor.

El aumento de escurrimientos ocurre al deforestar una cuenca, implica un aumento consecuente en el riesgo de inundación aguas abajo; asimismo, incrementa la erosión producida por el agua. En cuencas con pendientes altas, los sedimentos incluyen rocas de gran tamaño, al encontrar la corriente un obstáculo natural o artificial, pueden taponar los caminos usuales del agua, sacando a la corriente de su cauce natural o esperado; más aún, los sedimentos que permanecen suspendidos pueden producir problemas de sedimentación masiva en las partes bajas de la cuenca.

Por supuesto que las acumulaciones locales de lluvia, aun en un caso extremo como el de los ciclones tropicales, no producen directamente las condiciones de peligro y los daños; esto se genera cuando el agua fluye a las zonas más bajas. Es por ello que el desbordamiento de los ríos es la manifestación destructiva de los ciclones tropicales más difundida en la población, ya sea en el caso de su

cauce principal o de su llanura de inundación. Existe también un tipo de inundación que ocurre de manera rápida y sorpresiva conocida como “inundación relámpago”, considerada como de alta peligrosidad y difícil de controlar.

La coincidencia entre las lluvias intensas y la marea de tormenta puede producir inundaciones inesperadas en las llanuras costeras, debido al incremento en el nivel del río, que a su vez es producido por la marea de tormenta. Otras de las situaciones de sumo peligro durante eventos ciclónicos es el de la ruptura abrupta de alguna estructura específicamente dedicada a restringir el avance del agua, como lo es un bordo o presa, así como los deslaves, derrumbes y deposición de sedimentos (Figura 18).

Las recomendaciones principales para la población asociadas con la precipitación extrema durante ciclones tropicales son:

1. Conocer la localización de las cañadas, arroyos y cauces cercanos, para ubicar sitios altos y llegar a ellos en caso de presentarse una inundación relámpago.

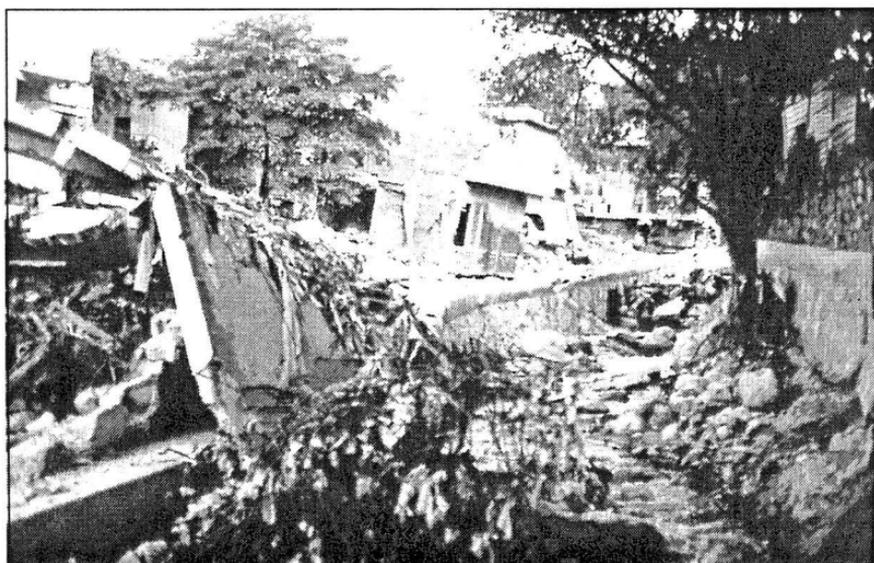


Figura 18. Efectos del paso del huracán Pauline en Acapulco, Guerrero. (foto: Lugo, 1997, octubre 21).

2. Si vive en la llanura de inundación de un cauce cuya cuenca será afectada por las lluvias intensas constantes de la parte principal de un cr, no dude en evacuar.
3. Por más espectacular que sea observar la crecida de un río, no lo haga directamente desde sus bordes, pues son altamente erosionables y puede quedar atrapado por la corriente.
4. No cruce en vehículos sobre caminos que lleven una corriente, aunque parezca poco profunda, ya que puede ser arrastrado por la fuerza del agua.
5. Si vive en zona habitualmente anegadiza, prepare un mecanismo razonable para subir al techo de su casa si esto fuera necesario, así como para proteger muebles o bienes en la parte alta de la construcción.
6. Si habita en el piedemonte, especialmente si éste ha sufrido cortes para ampliar el terreno plano disponible, se considera una zona de riesgo por deslave durante las lluvias intensas.

Escala Saffir-Simpson de daño potencial

Estados Unidos diseñó una escala de daño potencial producido por los huracanes que los afectan (escala SAFFIR-SIMPSON); sin embargo, otros países como México, la han adoptado:

Categoría uno: huracán mínimo (poco intenso)

Vientos: 74-95 mph, 64-83 nudos, 119-153 km/h

Presión superficial mínima: mayor de 980 mb

Altura de la surgencia: 3-5 pies, 1.0-1.7 m

Los daños se ven principalmente en los arbustos, árboles y casas no fijas. Perjudica las señales mal sostenidas. Los caminos costeros pueden inundarse, los embarcaderos se pueden dañar. Las lanchas pueden ser arrastradas tierra adentro. No existe daño a otras estructuras. Ejemplo: huracán Jerry (1989).

Categoría dos: huracán moderado

Viento: 96-110 mph, 84-96 nudos, 154-177 km/h

Presión superficial mínima: 979-965 mb

Altura de la surgencia: 6-8 pies, 1.8-2.6 m

Daño considerable a los arbustos e inclusive algunos árboles son arrancados. Daños mayores a las casas móviles. Las señales son bastante dañadas, aunque los edificios no. Los caminos de escape y las carreteras costeras sufren daños e inclusive desaparecen en algunas partes. Los techos de las casas pueden resentirse. De dos a cuatro horas antes de que el centro de la tormenta llegue a tierra, se inundan y perjudican los caminos costeros. Se requiere evacuar las casas ubicadas en las costas y las zonas bajas.

Ejemplo: Huracán Bob (1991).

Categoría tres: huracán intenso

Viento: 111-130 mph, 97-113 nudos, 178-209 km/h

Presión mínima superficial: 964-945 mb

Altura de la surgencia: 9-12 pies, 2.7-3.8 m

Grandes árboles son derribados o se desprenden sus ramas. Prácticamente todas las señales mal fijadas son derribadas. Se dañan los techos y puentes, además de sus estructuras. Las casas móviles son completamente derruidas. Las casas o estructuras pequeñas construidas cerca de las costas son destruidas, así como las grandes estructuras son afectadas por el oleaje y los escombros levantados por el viento. Los lugares y caminos bajos se inundan de 3 a 5 horas antes de que el centro del huracán llegue a tierra. Los terrenos planos de hasta 2 m o menos de altitud son inundados hasta cerca de 12 km tierra adentro o más. Se debe evacuar a la población residente en la franja costera y las tierras bajas anexas a ésta. Ejemplo: huracán Pauline (1997)

Categoría cuatro: huracán muy intenso

Viento: 131-155 mph, 114-135 nudos, 210-249 km/h

Presión superficial mínima: 944-920 mb

Altura de la surgencia: 13-18 pies, 3.9-5.6 m

Las señales, arbustos y árboles son derribados extensivamente. Los techos de las casas y edificios pequeños pueden sufrir cuarteaduras, además de que las puertas y ventanas son destruidas. Completa destrucción de las casas móviles. El terreno plano de altitud menor de 3 m se inunda hasta 9 km tierra adentro. En las cercanías de las costas, las estructuras bajas y los pisos inferiores de las grandes estructuras son seriamente dañadas por la inundación, oleaje y escombros. Las rutas de escape bajas aun tierra adentro, son interrumpidas (cortadas) por subida del nivel del agua desde tres o cinco horas antes de que el centro del huracán entre a tierra. Las playas se erosionan. Se requiere que las casas localizadas hasta los 500 m de la línea de costa sean evacuadas y posiblemente aquéllas dentro de los 3 km. Ejemplo: huracán Mitch (1998).

Categoría cinco: huracán catastrófico

Vientos: más intensos de 155 mph, 135 nudos, 249 km/h

Presión superficial mínima: 944-920 mb

Altura de la surgencia: más alta de 18 pies, 5.6 m

Los arbustos, árboles y señales (anuncios) son derribados, los techos de los edificios son dañados. Se rompen (fallan) los techos, ventanas y puertas de muchas casas y edificios industriales. Rompimiento extensivo de los vidrios de puertas y ventanas. Algunas casas de madera pequeñas son volteadas o completamente arrancadas por el viento. Las casas móviles son completamente destruidas. Daños considerables a los pisos bajos de todas las estructuras más bajas de 5 m de altitud ubicadas hasta 500 m de la línea de costa. Las rutas de escape de baja altitud son inundadas por las aguas de tres a cinco horas antes de que el centro del huracán entre. Es posible que se deba evacuar las zonas bajas dentro de ocho y hasta 16 km de la costa. Ejemplo: huracán Gilberto (1988).

VI. RELACIÓN DE “EL NIÑO”- OSCILACIÓN DEL SUR (ENOS) CON LA ENTRADA DE CICLONES A MÉXICO

Cada año, en diferentes lugares de la Tierra, se experimentan anomalías climáticas regionales, tales como sequías, fríos invernales extraordinarios e inusual número de tormentas. Algunos años están caracterizados por grandes anomalías climáticas sobre gran parte del globo terrestre. El rasgo inherente a estas anomalías ha sido reconocido solamente hasta después de un período de décadas, como resultado de coleccionar y analizar muchos datos climáticos diferentes. Los procesos de reconocimiento climático han sido el ensamble de un rompecabezas de escala global.

Algunas piezas del enigma están implícitas en la Oscilación del Sur: un patrón coherente de presión, temperatura y fluctuaciones de lluvia, que fue descubierta y nombrada por Sir Gilbert Walker hace más de medio siglo. La primera manifestación de la Oscilación del Sur es un desbalance en la presión atmosférica a nivel del mar entre la alta subtropical del Pacífico suroriental y la región de baja presión que se extiende sobre el Océano Índico desde África hasta el norte de Australia.

Otra parte del rompecabezas es lo ocurrido a los pescadores del Perú: en ciertos años, las aguas donde pescan son más calientes de lo normal. Como la anomalía positiva de la temperatura de la super-

ficie del mar se inicia en diciembre, los pescadores asociaron esta corriente de agua a la llegada de El Niño Jesús, por estar próxima la Navidad, la cual produce que especies de peces, como la anchoveta, emigren hacia regiones donde la temperatura es más baja, menguando las pescas peruanas. Además de El Niño, se habla de su contraparte, La Niña, que corresponde a anomalías negativas en la temperatura superficial del Pacífico tropical central hasta las costas del Perú y Ecuador.

Los estudios descriptivos del evento de El Niño de 1957-1958, en parte basados en los datos de las rutas de los barcos mercantes del Pacífico tropical, fueron primordiales para revelar la unión entre El Niño y la Oscilación del Sur. La interacción de gran escala entre la atmósfera y el océano fue confirmada por los estudios estadísticos de episodios pasados.

El fenómeno ENOS fue caracterizado por las investigaciones de Bjerknes. Él fue el primero en usar las imágenes de satélite para definir la región de lluvia anormalmente fuerte y las zonas secas del Pacífico ecuatorial central y del este que aparecen durante los episodios en que aumenta la temperatura de la superficie del mar, mostrando que estas fluctuaciones de la temperatura y las lluvias están asociadas a variaciones de gran escala en los sistemas de vientos alisios ecuatoriales. Estas últimas reflejan las variaciones mayores del patrón de presión de la Oscilación del Sur (Bjerknes, 1969).

El acoplamiento de El Niño con la Oscilación del Sur fue vista como la evidencia de que la circulación oceánica juega a ser un timón en el sistema del clima, siendo responsable de la persistencia extraordinaria de las anomalías atmosféricas mensuales y algunas veces estacionales. Una multitud de estudios se han realizado después de los trabajos de Bjerknes y proporcionan una descripción mucho más completa del fenómeno ENOS, que surge como la señal dominante del clima global sobre escalas de tiempo de unos cuantos meses a unos cuantos años.

La Figura 19 (de Webster, 1983) muestra dos secciones transversales a lo largo del ecuador. En ella se representan las dos épocas (valores positivo y negativo) del Índice de Oscilación del Sur (IOS).

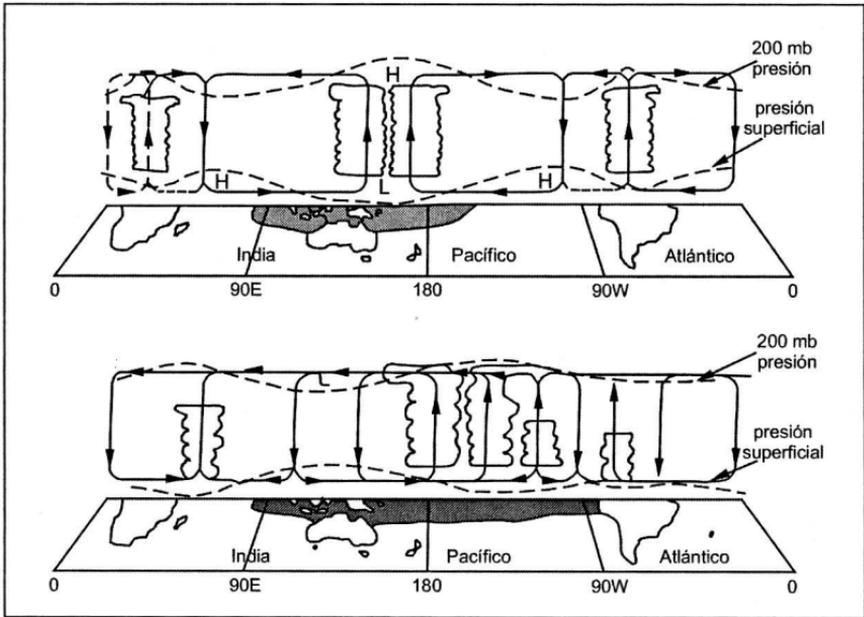


Figura 19. Diagrama esquemático de las circulaciones zonales (“Circulaciones de Walker”) a lo largo del ecuador durante períodos cuando el IOS > 0 (panel superior) y el IOS << 0 (panel inferior). Tomado de Webster, 1983.

El ios se define como la diferencia normalizada entre la presión superficial de Tahití y Darwin. La Niña y El Niño corresponden a anomalías térmicas frías y calientes respectivamente, en el Océano Pacífico tropical. El área sombreada denota la temperatura de la superficie del mar superior a 28° C. Sobre este cuerpo de agua caliente se localizan las regiones de aire ascendente, que junto con los ascensos sobre los continentes forman una serie de celdas este-oeste a lo largo del ecuador (o Circulaciones Walker).

Comparando estas dos situaciones, es obvio que la localización de las celdas y los vientos del este y del oeste asociados poseen una variación considerable.

En los océanos Pacífico y Atlántico, el flujo general del este de los vientos alisios y vientos superficiales cercanos al ecuador ejercen un esfuerzo que produce una pendiente ascendente en el agua

superficial desde el este al oeste. Durante el ENOS, los cambios causan en el sistema océano-atmósfera el aumento de la pendiente en la fase de La Niña (esto es $10S \gg 0$) y reduce la pendiente durante El Niño. La reducción de esta pendiente hace que una gran cantidad del agua acumulada al norte de Australia se recorra hacia el este y produzca la corriente de agua caliente asociada con El Niño. Con los cambios en la distribución de la altura del nivel del mar, se dan también variaciones en el contenido de calor del océano superior y en la distribución de la temperatura superficial del mar.

Algunos investigadores (Landsea y Gray, 1989) han encontrado que la actividad ciclónica tropical en el Atlántico norte es muy sensible a la influencia de El Niño. En la Figura 20 se puede apreciar la trayectoria de los ciclones tropicales en años de El Niño (b), un año anterior a El Niño (a) y un año después de El Niño (c). Se puede observar que durante la presencia de El Niño el número de ciclones tropicales se reduce notablemente, el Golfo de México y el Mar Caribe muestran esta reducción claramente.

En la cuenca del Océano Pacífico noreste ocurre lo contrario, con un ligero aumento en la actividad ciclónica, debido al incremento de la temperatura superficial del océano, que es uno de los factores principales en la producción de los sistemas ciclónicos tropicales. Landsea y Gray (1989) realizaron estudios con cinco años de El Niño y cinco de La Niña, en los que verifican el hecho de que en años con El Niño, el número de tormentas tropicales es mayor que en años de La Niña.

En territorio mexicano, al parecer, estos dos fenómenos El Niño y La Niña provocan eventos climáticos opuestos, es decir, durante El Niño hay sequía y en años de La Niña llueve más de lo normal; pero nunca es la misma respuesta climática de un año de El Niño (o La Niña) a otro. Es decir, no se pueden definir con buena precisión los efectos que se esperan de estos fenómenos, ya que las variaciones climáticas obedecen también a otros factores.

Para tener una idea de lo difícil que es establecer el número de ciclones que entran al territorio nacional, con un evento determinado (El Niño o La Niña), se analizó el período 1949-1998. En él se encontra-

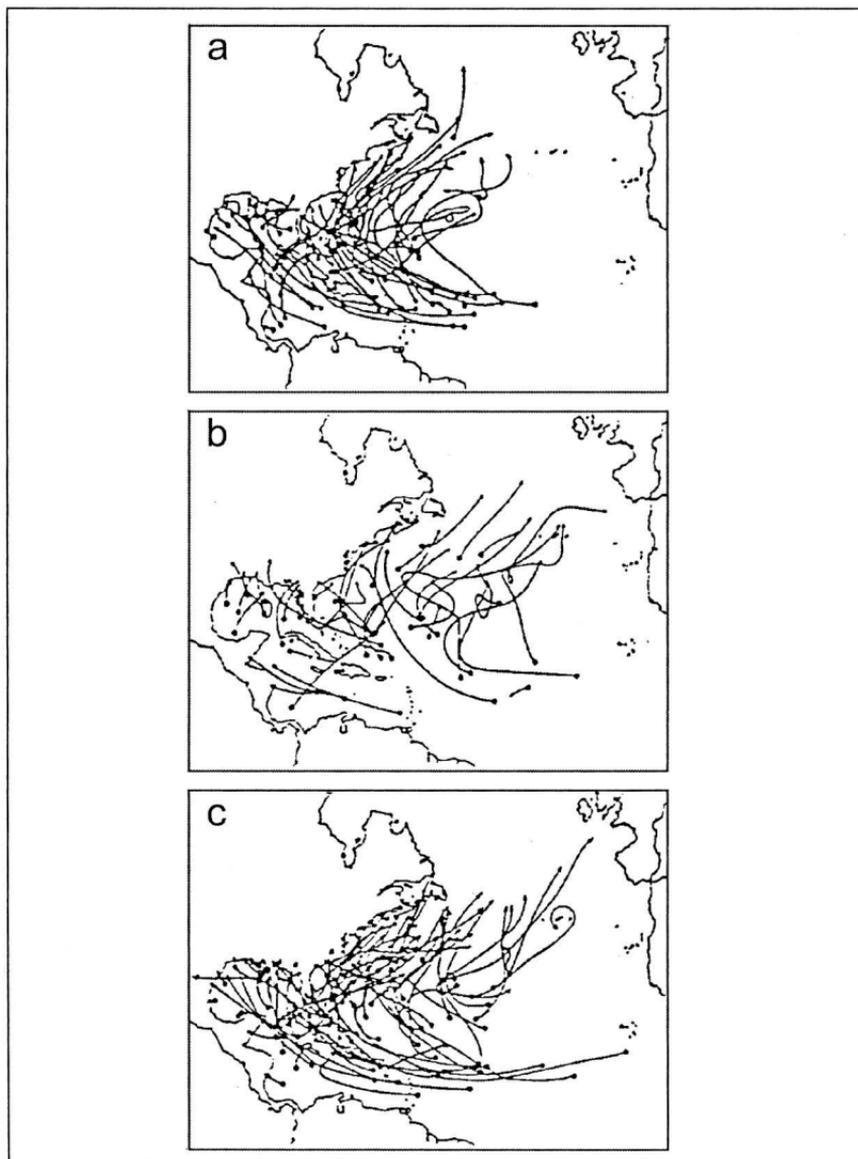


Figura 20. Trayectoria de los sistemas con intensidad de huracán en el Atlántico norte para el período 1900 a 1976, en relación con años de El Niño: a. un año antes de El Niño, b. año de El Niño y c. un año después de El Niño.

ron tres categorías fácilmente distinguibles al considerar el los, a saber: a) El Niño; b) La Niña y; c) La Niña débil o El Niño débil.

En este período existieron 13 años con evento La Niña, 13 con El Niño y 24 con la tercera categoría. El número de CT que invadieron a la República Mexicana fue de 61, 41 y 65, respectivamente. En otras palabras, se esperaría que en años de La Niña entraran a México de 2.5 a 7.5 CT nombrados, en años de El Niño de 0.5 a 5 CT y para el tercer caso, de 1.3 a 3.75 CT, con promedios de 4.4, 2.9 y 2.7 CT, respectivamente.

En la tabla siguiente (3) se presenta la estadística del número de CT que entraron a las costas mexicanas. La primera columna indica la fecha, la segunda la duración del evento, la columna "A" se refiere a los CT nombrados que penetraron por la costa Atlántica, similarmente la columna "P", para el Pacífico y la "T" indica la

Tabla 3. Variación en el número de ciclones tropicales nombrados que entraron a la República Mexicana en presencia de eventos de a) La Niña, b) El Niño y c) El Niño débil o La Niña débil. (A: Costa del Océano Atlántico, P: Costa del Océano Pacífico, T: suma de A + P por año)

a.		La Niña		
Evento	Duración en años	A	P	T
49-50	2	1-1	2-1	3-2
54-55	2	3-3	2-2	5-5
64-65	1.5	1-1	1-2	2-3
70-71	2	3-3	3-6	6-9
73-74	1.5	2-2	4-4	6-6
75-76	2	2-0	2-4	4-4
88-89	2	3-0	0-3	3-3
7 Total	13	15-10	14-22	29-32
Promedio		2.1-1.4	2.0-3.1	4.1-4.6

Los ciclones tropicales de México

<i>b.</i>		El Niño		
Evento	Duración en años	A	P	T
57-58	2	0-1	3-3	3-4
65-66	1.5	1-2	2-5	3-7
72-73	1.5	1-2	2-4	3-6
82-83	2	0-1	1-1	1-2
86-87	2	0-0	0-1	0-1
91-92	2	0-0	0-3	0-3
97-98	2	0-2	4-2	4-4
7 Total	13	2-8	12-19	14-27
Promedio		0.3-1.1	1.7-2.7	2-3.8

<i>c.</i>		La Niña débil o El Niño débil		
Evento	Duración en años	A	P	T
51-53	3	2-1-0	1-0-0	3-1-0
56	1	3	0	3
59-63	5	1-1-1-0-0	2-0-0-2-3	3-1-1-2-3
67-69	3	2-0-1	2-4-1	4-4-2
77-81	5	1-3-1-2-0	1-3-2-0-5	2-6-3-2-5
84-85	2	0-0	2-1	2-1
90	1	1	1	2
93-96	4	1-0-3-1	4-1-1-4	5-1-4-5
8 Total	24	25	40	65
Promedio		1.04	1.67	2.71

suma de las dos cuencas. Por ejemplo: en la columna A de la parte c, en el primer renglón 2-1- 0 indican que dos CT nombrados penetraron el año 1951, uno el año 1952 y cero en 1953 por la costa del Atlántico.

VII. EFECTOS DE LOS CICLONES TROPICALES EN MÉXICO

Crecimiento demográfico de las costas mexicanas

En las últimas décadas, caracterizadas por un proceso de urbanización acelerado, se han vuelto más evidentes los daños potenciales que pudieran provocar los ciclones tropicales en grandes áreas de concentraciones humanas. Pueden verse afectados también los medios de comunicación y de transporte, así como las actividades económicas.

Para evaluar la situación del crecimiento de la población en los litorales de México, es necesario considerar que las costas constituyen un espacio que se ha urbanizado muy tardíamente. A principios de siglo sólo estaban ocupadas por 166 mil habitantes, equivalentes a 10% de la población urbana total de la época (Gutiérrez y González, 1999).

A mediados del siglo xx se registra un gran desarrollo urbano; de 1940 a 1950 se duplicó la población urbana que vivía en localidades costeras: de 606 mil a 1.2 millones de habitantes. En 1995, aumentó a 12.7 millones de personas, equivalente a 20.9% de la población urbana total; el número de localidades costeras entre 1900 y 1995 se incrementó de 9 a 175.

El tamaño de las localidades de las costas mexicanas ha variado notablemente en el transcurso de este siglo. En 1900, toda la población urbana costera se encontraba distribuida en las nueve localidades que eran de tamaño pequeño y muy pequeño. Sin embargo, un

cambio notable se aprecia a partir de 1950, cuando se clasifican dos ciudades como grandes, ambas localizadas en la costa del Golfo de México; a partir de ese año las grandes ciudades aumentan hasta llegar a 19 en 1995.

El otro cambio notable en las costas se observa a partir de 1990, cuando se registran las primeras seis ciudades muy grandes, algunas de ellas ya como zonas metropolitanas (Tampico, Veracruz, Coahuila, Mérida, Tijuana y Acapulco), en 1995, se integran a la zona costera otras tres ciudades muy grandes, para dar un total de ocho ciudades de estas dimensiones (Mazatlán, Tapachula y Cancún).

La concentración de la población se ha presentado en ciudades grandes o muy grandes, pues en 1995, más de 9.1 millones de habitantes, equivalentes a 71.8% de la población urbana en las costas, se encontraban viviendo en tan sólo 27 de las 175 localidades costeras.

Los movimientos migratorios son un componente importante en los cambios de población que se realizan en las ciudades de las costas mexicanas. En años recientes, algunas localidades costeras urbanas se han convertido en importantes puntos de atracción para los migrantes procedentes de las diferentes entidades del país.

En 1995, la población urbana total de las costas era de 12.6 millones de personas, distribuida de la manera siguiente: en el Atlántico 6.7 millones, equivalentes a 53.4% de total, y en el Pacífico 5.9 millones, equivalente a 46.6%; los porcentajes entre sí no representan gran diferencia, pero cuando ésta se relaciona con la extensión de ambas costas y el número de ciudades, el contraste adquiere mayor significancia. La extensión del litoral del Pacífico aunada a la del Golfo de California alcanza 8 475 km, cerca de tres veces la extensión del litoral del Atlántico que mide 3 117 km, por lo que el alejamiento entre las 83 ciudades de la costa del Pacífico es mayor que el alejamiento entre las 92 ciudades de la costa atlántica.

La población de las costas del Atlántico siempre ha sido superior a la del Pacífico; de 1900 a 1940 representó más del doble. Sin embargo, la diferencia se hace menor a partir de 1950, cuando la población urbana del Atlántico fue sólo una y media veces mayor que la del Pacífico. A partir de 1960 crecen casi paralelas, hasta

alcanzar en 1995 el Atlántico 6.7 millones de habitantes, y la costa Pacífica 5.9 millones.

Vulnerabilidad de las costas mexicanas

La plataforma continental es una especie de meseta de aguas poco profundas que se encuentra alrededor de las masas continentales. En su extensión las pendientes son relativamente suaves y al terminarse se presenta una profundización abrupta. Es común que la plataforma continental se defina con la línea batimétrica de 200 m (o sea, la línea que limita las zonas de menos de 200 m de profundidad de las zonas de más de 200 m de profundidad).

Las zonas con extensa plataforma continental (aquéllas donde esta línea se encuentra lejos de la costa) pueden esperar que el oleaje ciclónico sea reducido al arribar a la costa, mientras que aquéllas con reducida plataforma continental (donde la línea de profundidad de 200 m se encuentra muy cerca de la costa) pueden esperar oleaje ciclónico poco atenuado al arribar a la costa, así pues, la distancia entre la costa y el límite de la plataforma continental se convierte en un índice de peligrosidad del oleaje ciclónico en la zona costera.

Por ejemplo, en México las costas norte y oeste de la península de Yucatán presentan mayor protección contra el oleaje, mientras que su costa este se encuentra desprotegida, estando toda ella sujeta con frecuencia al oleaje ciclónico. Por otro lado, la zona de la costa sur en el Pacífico, desde Puerto Ángel, en Oaxaca hasta Cabo Corrientes, en Jalisco, tiene una plataforma continental muy estrecha, lo mismo que la costa este de la península de Baja California, aunque estas zonas no se encuentran sujetas a oleaje ciclónico intenso tan frecuente por su ubicación con respecto a la incidencia y trayectorias típicas de los ciclones. La punta sur de la península de Baja California (por ambos lados) es una excepción, ya que cuenta con escasa protección de su plataforma continental y frecuente incidencia de oleaje ciclónico. El resto de las costas de México se puede clasificar con una protección moderada, debido a su plataforma continental.

El análisis de las condiciones específicas de la costa de interés es también importante para delimitar zonas de alta vulnerabilidad. Por ejemplo, franjas costeras con relativamente extensas zonas de manglares, lagunas costeras someras y barras de arena naturales frente a la costa producirán atenuaciones significativas en los efectos de los ciclones tropicales que pueden arribar a los poblados que se encuentran en su trayectoria. Las zonas abiertas de la costa son lugares de mayor riesgo, mientras que las bahías tienen un menor riesgo. Los poblados costeros producen un efecto similar a los manglares, al proteger significativamente la primera línea de construcciones sobre la costa a las que se encuentran tras ellas.

México es uno de los países más afectados por los ciclones tropicales y es quizá la única región que puede recibir efectos de ciclones provenientes de dos zonas ciclogénicas, la del Atlántico norte y la del Pacífico nororiental. Es por ello que ninguna parte de las costas de México está totalmente libre del riesgo de los efectos de un ciclón tropical. Como se puede observar en la Figura 21, ambos litorales presentan en cada temporada la posibilidad de que entre a tierra alguno de estos fenómenos tropicales.

En la vertiente del Pacífico los ciclones presentan trayectorias del sureste al noroeste, paralelas a las costas mexicanas. Sólo ocasionalmente algunas de estas perturbaciones adoptan trayectorias más hacia el norte o recurvan para llegar a las costas, desde Chiapas hasta Baja California. Durante el período 1921-1999 tocaron tierras mexicanas un total de 214 ciclones tropicales, las entidades que presentan una mayor entrada de estos fenómenos fueron Baja California Sur con 55 (25.7 %) y Sinaloa con 36 (16.8 %), seguidos por los estados de Oaxaca, Guerrero y Michoacán con 9.8, 8.9 y 8.9 %, respectivamente (Figura 22).

Para el Golfo y el Caribe Mexicano, aunque es menor el número de tormentas que penetraron a tierra en el período 1871-1999, sólo 150, los efectos que generan pueden ser devastadores para estas regiones de nuestro país. Como indica el mapa (Figura 20), la península de Yucatán, en particular el estado de Quintana Roo, es más propensa a ser afectada por los ciclones tropicales que entran a tie-

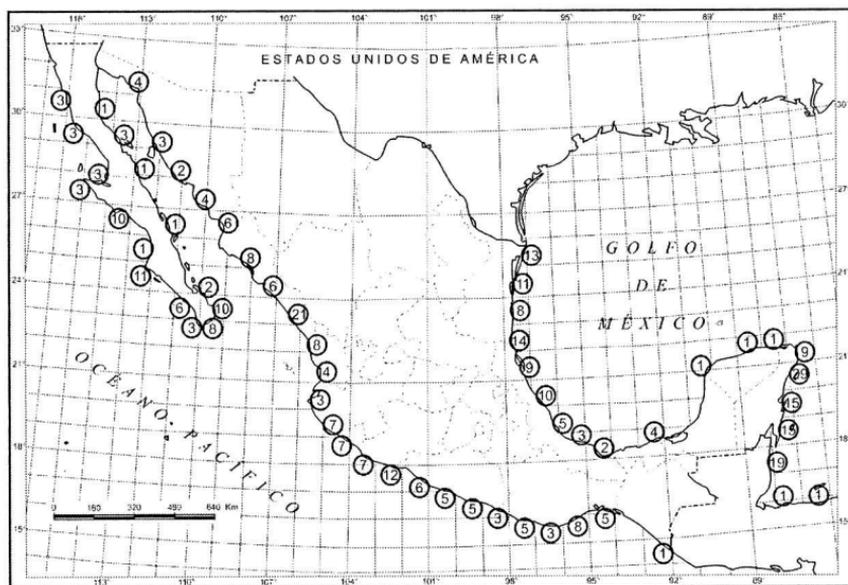


Figura 21. Ciclones tropicales que entraron a tierra. Océano Pacífico (1921-1999). Océano Atlántico (1871-1999; actualizado de Arroyo, et al., 1985).

rra con un valor de casi la mitad (45.3%) del total. Asimismo, aunque los estados vecinos muestran valores menores (Yucatán 1.3% y Campeche 0.7%), éstos también sufren los efectos de las perturbaciones que atraviesan la península, aunque hayan entrado por la costa oriente. La costa de Tamaulipas es la segunda zona en cuanto al número de ciclones que inciden con 30.7%; ya con un valor menor (19.3%) se ubica el estado de Veracruz. La razón principal de que las costas más afectadas sean estas entidades, se debe principalmente a que se ubican en la trayectoria que con frecuencia siguen los grandes ciclones, como el caso de Gilberto en 1988. Por ello se justifica que nuestro país deba contar con un sistema de protección para el manejo adecuado de las emergencias generadas por estos meteoros.

Dadas las características de daños con amplia distribución geográfica y los efectos sobre la población y la actividad económica, el enfrentar adecuadamente este tipo de emergencias requiere que, a todos los niveles afectables, se cuente con una cultura de protección

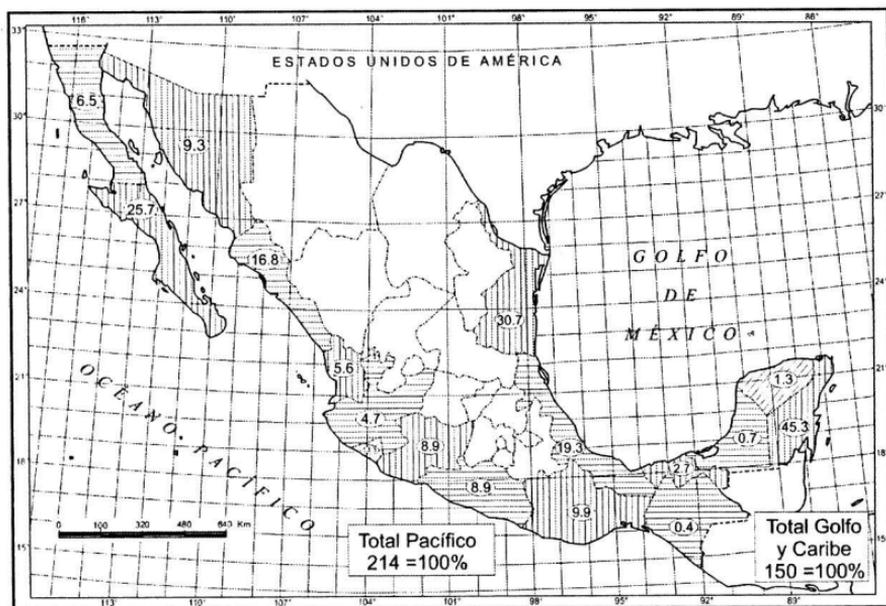


Figura 22. Frecuencia de entrada de ciclones por estados. Océano Pacífico: 214 ciclones, período 1921-1999. Océano Atlántico y Caribe: 154 ciclones, período 1871-1999.

de CT congruente con la importancia de este fenómeno en la vida de muchos mexicanos.

En contraste con otros fenómenos, en el caso de los ciclones tropicales siempre tendremos un cierto lapso de pre-aviso que permita tomar decisiones y realizar maniobras de prevención ante la emergencia

Efectos de los ciclones tropicales antes del uso de los satélites

Con los datos de cada año (de 1921 a 1955) se formó la Tabla 4, en la que se hace un resumen del número anual de CT y aciclomamientos que entraron al territorio nacional. Los mapas diarios usados en México para el análisis y el pronóstico del tiempo a corto plazo y que fijan la extensión dentro de la cual se ha hecho el recuento de las perturbaciones, abarcan en su límite sur, desde el paralelo 5° de latitud norte y la longitud desde el meridiano 60° oeste hasta el meridiano 140° oeste.

El término “aciclonamiento”, que convencionalmente empleaban los previsores mexicanos, designa aquellas perturbaciones tropicales cuyas características, aunque semejantes a las del huracán por las lluvias intensas y los vientos, no asegura que se trata de un ciclón tropical con todos los atributos de vorticidad de la forma clásica. Se presentan a veces como formas ciclónicas incipientes, que luego se disipan; pero otras veces persisten produciendo lluvias extraordinariamente copiosas. Uno de estos casos parece ser el que se registró entre el 26 y 29 de septiembre de 1954 en el sur del Golfo de México y que siguió una trayectoria hacia las costas del estado de Veracruz. Al llegar produjo lluvias muy intensas que causaron inundaciones en una gran extensión.

El examen de las estadísticas respectivas —en el período de 1921 a 1955— (Tabla 4) pone de manifiesto, entre otras cosas, los casos singulares de algunos años; por ejemplo, el de 1942 en que el número de perturbaciones observadas es el mínimo dentro del período: sequía muy intensa y extendida con producción agrícola muy baja; sin embargo, los cuatro únicos ciclones completamente desarrollados que se dieron, entraron por diferentes puntos de los litorales y produjeron fuertes inundaciones. Es decir, 1942 fue un año con doble calamidad, por una parte, la sequía muy extendida, y por la otra, las inundaciones perjudiciales, aunque en áreas restringidas. En cambio, 1954 ha sido el año con mayor número observado de perturbaciones y el de mayores rendimientos agrícolas, y sólo cuatro de los catorce huracanes observados entraron en el país. A pesar de los destrozos que produjeron, especialmente el Alice en la región fronteriza del bajo río Bravo y el Florence en el estado de Veracruz; este año fue de grandes beneficios para la economía de la República.

Gran cantidad de los ríos mexicanos son de régimen torrencial, las lluvias que los crean en las altas montañas caen en verano y otoño en forma de violentos aguaceros de origen orográfico y convectivo. Por esta razón, aun sin lluvias extraordinarias, en algunas regiones de las costas se producen inundaciones a fines del otoño, en tanto que permanecen secos los cauces de los arroyos y ríos durante parte del invierno y la primavera. Si a estas circunstancias

Tabla 4. Número anual de perturbaciones tropicales en México, 1921-1955 (Contreras, 1955)

Año	A	B	C	D	E	F	Explicación y resumen
1921	7	5	12	3	2	5	A: número de ciclones observados dentro del mapa sinóptico
22	5	6	11	4	1	5	
23	7	1	8	3	0	3	B: número de aciclomamientos observados dentro del mapa sinóptico
24	8	2	10	3	1	4	
25	8	2	10	5	0	5	C: suma A+B
26	13	0	13	7	0	7	D: número de ciclones que entraron al territorio
27	10	1	11	5	0	5	
28	14	0	14	6	0	6	E: número de aciclomamientos que entraron al territorio
29	7	6	13	3	3	6	
30	11	3	14	4	1	5	F: suma D+E
31	9	5	14	6	2	8	
32	10	6	16	2	1	3	Columna A, años de Máxima 1937 (16)
33	11	6	17	4	2	6	
34	13	7	20	3	1	4	Columna A, años de Mínima 1942 (4)
35	10	9	19	1	2	3	Columna B, Máxima 1936 (10)
36	11	10	21	8	2	10	
37	16	3	19	2	2	4	Columna B, Mínima 1926, 1928, 1943, 1945, 1946 (0)
38	8	7	15	2	2	4	
39	14	4	18	5	1	6	Columna C, Máxima 1954 (23)
40	7	3	10	2	0	2	
41	10	2	12	3	0	3	Columna C, Mínima 1942 (7)
42	4	3	7	4	1	5	Columna D, Máxima 1936 (8)
43	12	0	12	1	0	1	
44	10	1	11	3	1	4	Columna D, Mínima 1948, 1952 (0)
45	11	0	11	3	0	3	
46	8	0	8	2	0	2	Columna E, Máxima 1929 (3)
47	10	1	11	2	0	2	Columna E, Mínima 1923, 1925, 1926, 1927, 1928, 1940, 1941, 1943, 1945, 1946, 1947, 1948, 1953 (0)
48	5	4	9	0	0	0	
49	11	5	16	1	1	2	Columna F, Máxima 1936 (10)
50	15	7	22	1	1	2	
51	9	8	17	2	1	3	Columna F, Mínima 1948 (0)
52	7	9	16	0	2	2	
53	10	2	12	2	0	2	Columna F, Mínima 1948 (0)
54	14	9	23	4	1	5	
55	12	9	21	4	2	6	

se agregan los escurrimientos producidos por las copiosas precipitaciones, propias de un huracán, la magnitud de la catástrofe aumenta.

Aunque en muchos años se han registrado inundaciones catastróficas originadas por huracanes, las de 1955 en la región sur del estado de Tamaulipas, especialmente en el puerto de Tampico, son seguramente las mayores del período 1921-1955. En este caso se suman los efectos de tres ciclones tropicales: Gladys, Hilda y Janet, que con pocos días de diferencia entraron al país por lugares muy próximos. La región más inundada fue la que rodea a la desembocadura del río Pánuco, donde los destrozos fueron enormes, ya que allí se encuentra ubicada la ciudad de Tampico, primer centro petrolero de la República. Por la extensión del área inundada y por la altura que alcanzaron las aguas en el caserío de la población, la magnitud del desastre fue muy superior al que sufrió esta misma ciudad en 1933, a causa de otro huracán del Caribe. La pérdida de vidas, sin embargo, fue atenuada grandemente por la generosa ayuda internacional, mediante el envío de un formidable equipo de salvamento constituido por barcos, aeroplanos de transporte, helicópteros, provisiones y un personal militar que dio ejemplo de un elevado espíritu humanitario.

La región de Tampico se encuentra en condiciones especialmente adecuadas para que se produzcan inundaciones graves de este tipo, —como lo pone de manifiesto no sólo esta inundación sino también la de 1933, con proceso semejante. En el territorio mexicano la regla general es que los efectos más temibles de los huracanes son las inundaciones en las costas y algunas veces también en la altiplanicie. Ellas son producidas no por las lluvias caídas en la región inmediata a la localidad que las sufre, sino por lluvias ocurridas a grandes distancias sobre la sierra y, por consiguiente, mucho después de sentirse el paso del CT sobre una localidad, puede presentarse una desastrosa inundación.

La evaluación de los perjuicios causados en vidas y haciendas, dada por las autoridades municipales y la Cámara de Comercio, por estos tres ciclones tropicales en la región de Tampico son:

se agregan los escurrimientos producidos por las copiosas precipitaciones, propias de un huracán, la magnitud de la catástrofe aumenta.

Aunque en muchos años se han registrado inundaciones catastróficas originadas por huracanes, las de 1955 en la región sur del estado de Tamaulipas, especialmente en el puerto de Tampico, son seguramente las mayores del período 1921-1955. En este caso se suman los efectos de tres ciclones tropicales: Gladys, Hilda y Janet, que con pocos días de diferencia entraron al país por lugares muy próximos. La región más inundada fue la que rodea a la desembocadura del río Pánuco, donde los destrozos fueron enormes, ya que allí se encuentra ubicada la ciudad de Tampico, primer centro petrolero de la República. Por la extensión del área inundada y por la altura que alcanzaron las aguas en el caserío de la población, la magnitud del desastre fue muy superior al que sufrió esta misma ciudad en 1933, a causa de otro huracán del Caribe. La pérdida de vidas, sin embargo, fue atenuada grandemente por la generosa ayuda internacional, mediante el envío de un formidable equipo de salvamento constituido por barcos, aeroplanos de transporte, helicópteros, provisiones y un personal militar que dio ejemplo de un elevado espíritu humanitario.

La región de Tampico se encuentra en condiciones especialmente adecuadas para que se produzcan inundaciones graves de este tipo, —como lo pone de manifiesto no sólo esta inundación sino también la de 1933, con proceso semejante. En el territorio mexicano la regla general es que los efectos más temibles de los huracanes son las inundaciones en las costas y algunas veces también en la altiplanicie. Ellas son producidas no por las lluvias caídas en la región inmediata a la localidad que las sufre, sino por lluvias ocurridas a grandes distancias sobre la sierra y, por consiguiente, mucho después de sentirse el paso del CT sobre una localidad, puede presentarse una desastrosa inundación.

La evaluación de los perjuicios causados en vidas y haciendas, dada por las autoridades municipales y la Cámara de Comercio, por estos tres ciclones tropicales en la región de Tampico son:

Personas fallecidas, 40 y heridas, 400.

Cabezas de ganado perdidas: 20 000.

Daños materiales a comercios: 60 millones de pesos.

Daños materiales a industrias: 30 millones de pesos.

Casas destruidas y dañadas: 3 677.

Casas destruidas y dañadas en Ciudad Madero: 2 333.

Área de la zona inundada, estimada en cerca de 6 400 km².

Con todo y haberse evitado una mayor pérdida de vidas, por los avisos emitidos con suficiente anticipación al peligro y la generosa ayuda internacional prestada durante la inundación, el monto de los daños fue considerable. Este era motivo suficiente para que la población mexicana se interesara en estar al tanto de los estudios acerca de los ciclones tropicales y de las medidas de protección ensayadas en otras naciones.

Efectos de los ciclones tropicales en los últimos años

De acuerdo con los registros de diversas perturbaciones tropicales, la Comisión Nacional del Agua ha identificado áreas o entidades federativas de México en las que al menos un huracán ha entrado a tierra, indicando los períodos de recurrencia.

Con base en las zonas de ingreso, se infiere que las entidades de Baja California Sur, Michoacán, Sinaloa, Sonora y Tamaulipas, presentaron una mayor ocurrencia de penetración (dos a cuatro años en promedio). Debido a la existencia de importantes centros de población asentados a lo largo de sus costas, se ha estimado que aproximadamente cuatro millones de personas están expuestas al fenómeno, lo que representa el 40 % de la población total de estos estados, ubicada en un total 31 municipios costeros. En otras entidades, la recurrencia de penetración ciclónica oscila entre los cinco y siete años; en ellos se estima que aproximadamente dos millones de personas están expuestas a sufrir sus efectos. Este grupo lo integran los estados de Baja California, Campeche, Colima, Quintana Roo y Jalisco, en donde en 19 municipios costeros se asienta el 26.3 % de su

población total. Por último, el grupo conformado por las entidades de Nayarit, Guerrero, Tabasco, Oaxaca, Veracruz, Chiapas y Yucatán, tienen un período de recurrencia de entrada de ciclones de ocho a 26 años. Este grupo se caracteriza por una mayor dispersión de su población costera, ya que se ha estimado que cuatro millones de personas están expuestas al riesgo en 176 municipios, población que corresponde al el 23.9 % del total.

En septiembre de 1988, a pesar de los enormes avances que la humanidad ha realizado, el huracán Gilberto mostró lo vulnerable que aún es el hombre ante la fuerza de la naturaleza. Con vientos superiores a los 300 km/h, un oleaje en altamar de más de 5 m de altura, una marea superior a los 2 m y precipitaciones acumuladas en 24 horas de más de 350 mm, Gilberto causó la pérdida de más de 250 vidas y daños económicos superiores al billón de pesos (Rosengaus, 1990). Desquició las actividades en cinco estados de la República Mexicana: Quintana Roo y Yucatán fueron los primeros afectados al ver paralizadas y dañadas sus instalaciones pesqueras y turísticas. Los vientos perjudicaron seriamente la producción agrícola y grandes áreas de bosque y vegetación fueron arrasadas. En Campeche, el oleaje y viento causados por el huracán impidieron la producción de petróleo y la actividad pesquera. En Nuevo León y Tamaulipas las precipitaciones causaron enormes crecientes que, a su vez, provocaron la pérdida de más de 200 vidas.

Las temporadas de ciclones en los últimos cinco años han sido muy diferentes, como se observa en el Cuadro 7. De manera general, se pueden señalar los daños causados en 1995 por “Ismael” en el Pacífico y los provocados por “Opal” y “Roxanne” en el Golfo de México.

Durante 1996 los daños fueron menores, y sólo es importante el caso de “Boris” en las costas del Pacífico. En el año 1997 (de El Niño) se presentó el huracán que más daño produjo en los últimos años: “Pauline”, con más de 400 muertos y 54 000 casas dañadas. La experiencia de este huracán sirvió para mejorar las formas de alertar a la población y concientizar a las autoridades ante estas situaciones extremas, o sea, de tomar decisiones rápidas y oportunas con base en la información emitida por el Sistema Nacional de Protección.

Para 1998 los daños más significativos se presentaron en la península de Yucatán, por el paso ya debilitado como tormenta tropical de “Mitch” que originó graves daños a su paso en América Central y, por último, en la temporada de 1999, la presencia de “La Niña” limitó la formación ciclónica en el Pacífico. En el Atlántico dos afectaron al país como tormentas tropicales, “Bret” y “Katrina”, sin embargo, la que más daños causó fue la depresión número 11, que junto con el frente No. 5, provocó fuertes precipitaciones durante tres días en la vertiente del Golfo de México, que generaron graves daños a las poblaciones de las laderas de la Sierra Madre Oriental.

Vigilancia de los ciclones tropicales en México

Durante la temporada de ciclones tropicales, el Servicio Meteorológico Nacional establece una vigilancia permanente, y mediante la emisión de pronósticos y avisos mantiene oportunamente informado al Sistema Nacional de Protección Civil, por medio de tres fases de alertamiento.

1. La primera o permanente, se establece a partir del 15 de mayo y termina el 30 de noviembre. Durante esta fase se producen avisos cada 12 horas, en caso de que exista un CT.
2. La segunda fase tiene lugar cuando se acerca el CT a menos de 500 km de las costas, en este caso los avisos se comunican cada seis horas.
3. Y la tercera fase se inicia cuando el CT amenaza las costas nacionales, y entonces los avisos oficiales son cada tres horas. Entre la información que se emite se incluye la posición del ciclón, su trayectoria, pronóstico y las zonas que deberán ser alertadas.

Cuando la población es afectada, la Secretaría de la Defensa Nacional presta auxilio, con la aplicación del Plan DN-III-E, el cual consiste en un plan de ayuda a la población, en caso de fenómenos naturales; sísmicos, volcánicos, hidrometeorológicos y hasta epidemias y plagas, asimismo los derivados por la acción del hombre, como accidentes ferroviarios, aéreos, carreteros, explosiones, etcétera.

Cuadro 7. Ciclones que afectaron a las costas de México en los últimos años

1995	Fenómeno	Efectos en tierra	Zonas de principales afectaciones, daños y muertes
5-7 agosto	Depresión tropical 6 Atlántico	Lluvia máxima en 24 hrs. 173 mm en San Luis Potosí. Viento de 18 km/h en Veracruz.	Hidalgo, San Luis Potosí, Tamaulipas y Veracruz
8-12 agosto	Tormenta tropical "Gabrielle"	Lluvia máxima en 24 hrs. 151 mm en Nuevo León. Viento 45 km/h en Ciudad Victoria, Tamaulipas.	Veracruz, Tamaulipas y Nuevo León.
1-8 septiembre	Huracán "Henriette"	Lluvia máxima en 24 hrs. 101 mm en Sinaloa. Vientos de 160 a 195 km/h en rachas.	Baja California Sur, Colima, Jalisco, Nayarit y Sinaloa. 2 muertos y 120 casas dañadas.
12-15 septiembre	Huracán "Ismael"	Lluvia máxima en 24 hrs. 197 mm en Sinaloa. Vientos de 130 a 160 km/h en rachas.	Baja California Sur, Nayarit, Sinaloa, Sonora y Chihuahua. 39 muertos y más de 10 000 casas afectadas, además de cultivos y embarcaciones.
27 sep -5 octubre	Huracán "Opal"	Lluvia máxima en 24 hrs. 254 mm en Campeche. Vientos de 250 a 300 km/h en rachas.	Quintana Roo, Yucatán, Campeche, Tabasco, Veracruz y Chiapas. 5 muertos y 240 casas y embarcaciones dañadas.
8-20 octubre	Huracán "Roxanne"	Lluvia máxima en 24 hrs. 204 mm en Tabasco. Viento de 185 a 215 km/h como rachas.	Quintana Roo, Yucatán, Campeche, Tabasco, Veracruz y Chiapas. 9 muertos y 600 casas dañadas, así como cultivos y embarcaciones.
1996			
20-27 junio	Huracán "Alma"	Lluvia máxima en 24 hrs. 250 mm en Michoacán. Viento máximo 160 km/h	Chiapas, Guerrero y Michoacán, 3 muertos y 1 800 casas dañadas.
28 jun-1 julio	Huracán "Boris"	Lluvia máxima en 24 hrs. 283 mm en Guerrero. Viento máximo 150 km/h	Colima, Guerrero, Jalisco y Michoacán. 7 muertos y 5 000 viviendas dañadas.
1-4 julio	Tormenta tropical "Cristina"	Lluvia máxima en 24 hrs. 193 mm en Tabasco. Viento máximo 110 km/h en Oaxaca.	Chiapas, Guerrero, Oaxaca y Tabasco. 5 muertos y 280 casas dañadas.
10-14 septiembre	Huracán "Fausto"	Lluvia máxima en 24 hrs. 150 mm en Sinaloa. Viento máximo 195 km/h en Baja California Sur.	Baja California Sur, Sinaloa y Sonora. 2 muertos y 400 casas dañadas.
30 sept-4 octubre	Huracán "Hernán"	Lluvia máxima en 24 hrs. 422 mm en Michoacán. Viento máximo 140 km/h en Jalisco.	Colima, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Nayarit y Zacatecas. 3 muertos y 1 050 viviendas dañadas.
19-24 agosto	Huracán "Dolly"	Lluvia máxima en 24 hrs. 328 mm en San Luis Potosí. Viento máximo 130 km/h en Quintana Roo.	Campeche, Nuevo León, Quintana Roo, San Luis Potosí, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán. 13 muertos y 765 viviendas dañadas.
1997			
16-25 septiembre	Huracán "Nora"	Lluvia máxima en 24 hrs. 337 mm en Baja California Sur. Viento máximo 205 km/h en Baja California Sur.	Baja California Sur, Baja California y Sonora, sin muertos y daños importantes.
26 sept-12 octubre	Tormenta tropical "Olaf"	Lluvia máxima en 24 hrs. 170 mm en Oaxaca. Viento máximo 110 km/h en Oaxaca.	Oaxaca, Colima y Jalisco. 4 muertos y 79 viviendas dañadas.
5-10 octubre	Huracán "Pauline"	Lluvia máxima en 24 hrs. 411 mm en Acapulco, Guerrero. Viento máximo 215 km/h en Oaxaca.	Oaxaca, Guerrero, Michoacán y Colima. Muertos 393 y 54 000 viviendas dañadas.

Cuadro 7. Ciclones que afectaron a las costas de México en los últimos años (continuación)

Fenómeno	Efectos en tierra	Zonas de principales afectaciones, daños y muertes
7-10 noviembre Huracán "Rick"	Lluvia máxima en 24 hrs. 243 mm en Oaxaca.	Oaxaca y Chiapas, sin reporte de muertos y daños a viviendas.
1998		
6-9 agosto Tormenta tropical "Frank"	Lluvia máxima en 24 hrs. 98.4 mm en La Paz, BCS. Viento de 65 km/h	Baja California Sur. Inundaciones y daños en construcciones.
1-3 septiembre Ciclón tropical "Isis"	Lluvia máxima en 24 hrs. 330 mm en San José del Cabo, BCS. Viento de 150 km/h	Baja California Sur, Sonora y Sinaloa inundaciones y daños en los tres estados.
1-5 noviembre Tormenta tropical "Mitch"	Lluvia máxima en 24 hrs. 341mm en Campeche. Viento máximo 95 km/h	Campeche, Yucatán con algunos daños menores e inundaciones.
1999		
2-3 julio Depresión No. 2	Lluvia máxima en 24 hrs. 371 mm en San Luis Potosí. Vientos de 55 km/h	Inundaciones en San Luis Potosí, Tamaulipas y Veracruz.
29-31 agosto Ciclón tropical "Bret"	Lluvia máxima en 24 hrs. 381 mm en Nuevo León. Vientos de 220 km/h	Inundaciones y daños en los estados de Coahuila y Nuevo León.
5-9 septiembre Ciclón tropical "Greg"	Lluvia máxima en 24 hrs. 400 mm en Colima. Vientos de 120 km/h.	Inundaciones y desbordamiento de ríos en Colima, Guerrero, Michoacán y Jalisco.
5-8 septiembre Depresión No. 7	Lluvia máxima en 24 hrs. 248 mm en Tamaulipas. Vientos de 55 km/h.	Daños menores en la costa de Tamaulipas. Lluvias fuertes en el noreste de México.
4-6 octubre Depresión No. 11	Lluvia máxima en 24 hrs. 420 mm en Puebla. Vientos de 55 km/h.	Graves daños provocados por inundaciones y desbordamiento de ríos, así como deslaves 120 muertos.
28 nov - 1 octubre Tormenta tropical "Katrina"	Lluvia máxima en 24 hrs. 146 mm en Tabasco. Vientos de 95 km/h.	Algunas inundaciones en el estado de Tabasco y península de Yucatán.

El plan DN-III-E contempla el despliegue inmediato de los recursos humanos y materiales del Instituto Armado, para reducir o mitigar los efectos de los fenómenos naturales o provocados, tanto en las personas como en sus bienes y su entorno. La premisa más importante del plan es la salvaguarda de la persona y la sociedad. Las fases de su aplicación son tres: prevención, auxilio y recuperación. El Plan está vinculado al Sistema de Protección Civil y en cada una de sus fases se contempla la coordinación y el apoyo de otras dependencias gubernamentales y de la misma sociedad.

Recomendaciones generales en caso de un ciclón tropical

Todos los alertamientos y avisos de los ciclones emitidos por el Servicio Meteorológico Nacional especifican la severidad del huracán. Los efectos en diferentes localidades pueden variar. Los daños a los lugares dependerán de: la lejanía de los vientos máximos, el tipo y resistencia de las construcciones del área y la naturaleza de la vegetación, el grado de peligro al que esté expuesta la localidad, la ocurrencia de la marea de tormenta y la naturaleza de la inundación.

Antes de la temporada de ciclones:

- Verifique la condición de su casa, en especial el techo.
- Poda las ramas de los árboles peligrosos.
- Limpie su propiedad de objetos pesados sueltos.
- Conozca el Plan Local de Protección Civil.
- En caso de marea de tormenta, conozca los lugares altos y seguros.
- Prepare el paquete de emergencia: radio portátil y baterías nuevas, antorchas, combustible, lámparas, velas y cerillos; contenedores de agua, alimentos enlatados, abrelatas y ropa de repuesto; botiquín de primeros auxilios, cintas adhesivas y bolsas de plástico.

Cuando hay un alertamiento:

- Escuche constantemente la radio o la televisión.
- Asegure su casa: puertas y ventanas.
- Asegure artículos sueltos dentro de la casa.

- Guarde documentos y objetos de valor en bolsas de plástico.
- Resguarde a sus animales.
- Llene contenedores de agua, y combustible en lugares seguros.
- Permanezca dentro de su casa.

En caso de evacuación:

- Conozca los lugares de resguardo o refugios.
- Desconecte la electricidad, gas, agua o en su caso, resguarde los materiales combustibles.
- Lleve su paquete de emergencia.
- Lleve su ropa, calzado y mantas resistentes.
- Siga la instrucciones del Comité de Protección Civil de su localidad.
- Atienda los avisos y alertamientos –no se dan a la ligera– hacerles caso es una responsabilidad.
- Si tiene la posibilidad de evacuar localidades, aun seguras, no lo piense: hágalo.

Cuando llega el ciclón tropical:

- Mantenga la calma y atienda los avisos.
- Busque el lugar más seguro de la casa.
- Si la casa empieza a dañarse, protéjase con colchones, mantas o bajo mesas o camas.
- Amárrese a elementos resistentes como tuberías de agua.
- Cúidese de la calma del ojo del huracán. No suponga que el ciclón ha pasado, si existe un período de calma debido al ojo, es de esperarse vientos violentos repentinamente en la dirección contraria.

Después de un ciclón:

- No salga hasta que oficialmente se avise que el ciclón haya pasado.
- Escuche la radio.
- Si ha evacuado, no regrese hasta que se avise, use la ruta oficial sugerida, tenga calma.
- No haga llamada telefónicas innecesarias.
- Cúidese de los postes de energía, árboles caídos y de las construcciones dañadas.

- En zonas cercanas a ríos y cuerpos de agua, tenga precaución con zonas inundadas y cauces de ríos.
- Las avenidas o crecidas de las corrientes de agua se producen después del paso del ciclón.
- No salga a averiguar que pasó.
- Sobre todo: no ignore los avisos y alertamientos.

GLOSARIO

Adiabático. Proceso termodinámico en el que no existe intercambio de calor entre dos sistemas.

Advección. Transporte de una propiedad, podría ser el calor o la humedad, por la componente horizontal del viento.

Altitud. Distancia vertical entre un punto y el nivel medio del mar.

Anemómetro. Instrumento que sirve para medir la rapidez del viento.

Anticiclón. Sistema atmosférico con presión alta en relación con sus vecindades. También se caracteriza por tener una circulación de viento en el mismo sentido de las manecillas del reloj, en el hemisferio norte.

Balance geostrófico. Se presenta en la atmósfera cuando existe equilibrio entre la fuerza de Coriolis y aquella debida al gradiente de presión. El viento se dirige paralelamente a las isobaras sin cambiar su rapidez.

Balance hidrostático. Se da en la atmósfera cuando se registra un equilibrio entre la fuerza de gravedad y la componente vertical de la fuerza del gradiente de presión.

Baroclínico. Es una atmósfera en que la densidad depende de la presión y de la temperatura.

Barotrópico. Es una atmósfera en la que la densidad solamente depende de la presión. Así que las superficies isobáricas son también superficies de densidad constante.

Capa límite planetaria. Capa de la atmósfera cuya base está en contacto con la superficie de la Tierra. Tiene una profundidad

que varía desde 30 m en condiciones de alta estabilidad estática, a más de 3 km, en condiciones de fuerte convección. La capa límite se divide en: capa superficial, que está cerca de la superficie y la capa de Ekman, situada por encima de la capa superficial hasta 1 km de altura, donde hay un triple balance entre la fuerza de Coriolis, la fuerza de gradiente de presión y la tensión viscosa.

Chubasco. Es una precipitación intensa que inicia y termina repentinamente, se produce a partir de nubes cumulonimbus, cúmulos y nimbostratus.

Ciclón. Sistema meteorológico de presión baja, donde los vientos giran en el sentido contrario a las manecillas del reloj en el hemisferio norte y, en el sentido de las manecillas del reloj en el hemisferio sur.

Ciclón extratropical. Cualquier ciclón de escala sinóptica que no sea ciclón tropical, se origina en latitudes medias y altas en un ambiente baroclínico. Afectan con mal tiempo un área más amplia que los ciclones tropicales.

Ciclón tropical. Ciclón casi circular de escala sinóptica que se caracteriza por formarse en las latitudes tropicales

Cizalladura. Variación del viento con la altura.

Collado o punto silla. En un mapa del tiempo, es la zona situada entre dos anticiclones y dos ciclones. Se caracteriza por una línea de confluencia y otra de difluencia de vientos.

Convección. Movimiento de ascenso o descenso producido térmicamente en una parte limitada de la atmósfera. Los movimientos convectivos son esenciales para la formación de nubes.

Convergencia. Zona de acumulación de aire, debido a vientos no paralelos.

Coriolis (Fuerza de). Cuando un objeto es observado desde un sistema que está rotando con el eje de rotación perpendicular al plano de movimiento, la trayectoria aparecerá como una curva. Es decir, en el hemisferio norte un movimiento de este a oeste, tendrá una desviación hacia el norte; mientras que si es de sur a norte se desviará hacia el este, lo contrario sucede en el hemisferio sur.

Corriente conductora. Zona de vientos intensos en la troposfera que predominan sobre perturbaciones de menor escala, a las cuales obligan a cambiar su movimiento.

Cresta. Área alargada de elevada presión atmosférica, forma una prolongación de un anticiclón o área de alta presión, de la misma forma que una cresta se proyecta desde una montaña.

Cúmulos. Masas nubosas redondeadas. Cúmulos (latín): montón; cúmulos humilis: pequeños, humildes; cúmulos congestus: excesivamente amontonados; *cumulonimbus*: nubes con precipitación.

Depresión. Zona de baja presión. En los mapas meteorológicos se caracteriza por isobaras cerradas de forma oval o circular, también se le conoce como ciclón. El tiempo en una depresión es una atmósfera inestable con nubosidad y precipitación.

Eficiencia termodinámica (e). En un sistema termodinámico la eficiencia se define como la relación entre la capacidad para realizar trabajo y el calor que se le suministra para este fin durante un ciclo. Matemáticamente está dado por $e=W/Q$. De la primera ley de la termodinámica para un ciclo se cumple que $W=Q_1-Q_2$, ya que $\Delta U=0$. Donde Q_1 es el calor cedido al sistema y Q_2 el calor cedido por el sistema, Por ello, tomando en cuenta la temperatura, se puede demostrar fácilmente que la eficiencia está dada por:

$$e = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Ekman (capa de). Capa situada sobre la capa superficial con un espesor aproximado de 1 km, donde existe un balance entre la fuerza de Coriolis, la fuerza del gradiente de presión y la fuerza viscosa.

Entalpia (H). Es una propiedad intrínseca de un sistema cuyos cambios son dados por los cambios de la energía interna más los cambios del producto de su presión por su volumen.

$$dH = dU + d(PV)$$

Entropía (S). Es una propiedad intrínseca de un sistema relacionado con coordenadas mensurables que caracterizan al sistema. Para un proceso reversible el cambio de entropía es proporcional al calor suministrado e inversamente proporcional a la temperatura del sistema.

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

Frente. Línea de separación en la superficie terrestre de dos masas de aire con diferentes características térmicas.

Frente caliente. Línea divisoria en la superficie terrestre entre una masa de aire caliente que avanza y se ve obligada a subir sobre la masa de aire frío. Este ascenso lleva a la formación de nubes y frecuentemente a precipitaciones delante del frente caliente. Los frentes calientes se producen principalmente en latitudes medias y altas, especialmente durante el invierno.

Frente frío. Línea divisoria en la superficie terrestre que separa al aire frío del caliente. En este caso el aire frío y denso avanza levantando bruscamente al aire caliente. Los frentes fríos se asocian al mal tiempo, intensas precipitaciones, descenso de temperatura y aumento de presión. Tanto el frente frío como el caliente están asociados con depresiones de latitudes medias y altas.

Gradiente. Cambio de una propiedad a lo largo de una distancia dada. Matemáticamente se expresa como.

$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z}.$$

Gradiente de presión. Cambio de la presión a una distancia dada.

Gradiente horizontal de presión. En los mapas sinópticos este gradiente es el cociente de la variación de las isobaras dividido por la distancia que los separa. Cuando las isobaras están muy cercanas, el gradiente horizontal de presión es fuerte; si las

isobaras están separadas el gradiente es débil. De la misma forma pueden calcularse el gradiente vertical de presión, gradiente horizontal de temperatura y otros.

Granizo. Granos de hielo que se producen en las nubes cumulonimbus. Tienen formas y dimensiones diversas, pudiendo alcanzar pesos mayores a 1 kg.

Inversión térmica. Al ascender en la troposfera se debe registrar un descenso de la temperatura con la altura pero, si el fenómeno es el contrario; es decir, si la temperatura aumenta con la altura, se dice que estamos ante una inversión térmica. Éstas se producen por irradiación, cuando en noches despejadas la superficie terrestre pierde energía, produciendo un considerable enfriamiento del terreno, y así también de la capa adyacente.

Isohípisa. En un mapa sinóptico de presión constante, es la línea que une iguales valores de altura geopotencial.

Isobara. En un mapa sinóptico, es la línea que une puntos con la misma presión atmosférica.

Isotaca. En un mapa sinóptico, es la línea que une puntos con la misma intensidad de viento.

Isoterma. En un mapa sinóptico, es la línea que une puntos con la misma temperatura.

Latitud. Distancia angular de un punto de la superficie de la Tierra al Ecuador, medida al norte o al sur desde el centro de la Tierra.

Longitud. Distancia angular medida a lo largo del Ecuador, entre el meridiano que pasa por un punto y otro meridiano patrón, que normalmente es el que pasa por Greenwich.

Llovizna. Precipitación líquida en la que las gotas son extremadamente pequeñas, parecen flotar siguiendo las corrientes de aire.

Lluvia. Precipitación líquida con gotas mayores que las de la llovizna. Pueden ser identificables a simple vista

Máquina de Carnot. En una máquina de vapor, el trabajo se efectúa entre una fuente de calor caliente (el mar) y otra fría (el aire superior), en la que el vapor se licúa antes de volver a la fuente caliente para completar el ciclo. El ciclo de Carnot proporciona el rendimiento máximo que la máquina puede dar teóricamente.

- Meteorología.** Ciencia que estudia el tiempo atmosférico, en particular los procesos físicos que tienen lugar en la atmósfera y los relacionados con ellos en la litosfera y la hidrosfera.
- Modelo.** Es un esquema ideal utilizado para describir algún fenómeno meteorológico.
- Momentum (*P*).** Cantidad física definida por el producto de la velocidad por la masa de un cuerpo: $P = \text{masa} \times \text{velocidad}$. También es conocido como ímpetu.
- Nudo.** Unidad de velocidad comúnmente usada en Meteorología. Un nudo equivale a 0.5144 m/s o 1.852 km/h o 1.151 mi/h.
- Ondas de gravedad.** Ondas caracterizadas por el desplazamiento de aire estable desde su nivel de equilibrio.
- Orográfico.** Relacionado o provocado por las variaciones del terreno.
- Perturbación tropical.** Zona de baja presión situada en la zona tropical.
- Presión atmosférica.** Es el peso de una columna de aire de sección unitaria que se extiende desde la superficie de la Tierra hasta el límite superior de la atmósfera. En Meteorología se usan comúnmente los milibares (mb) para medirla. Un mb es igual a 100 pascales (pa).
- Radiosonda.** Dispositivo automático para sondeo atmosférico, acoplado a un globo aerostático. Está destinado a medir perfiles de viento, temperatura, presión y humedad.
- Rocío.** Humedad depositada en la superficie terrestre o sobre objetos situados en ella. Al enfriarse las capas más bajas de la atmósfera por radiación de la tierra durante la noche, por debajo del punto de rocío, el vapor de agua se condensa formando las gotas de rocío.
- Solsticio.** Tiempo del verano o invierno en que el Sol se halla verticalmente encima del punto que representa su máximo desplazamiento al norte o al sur del Ecuador. Es decir, cuando el Sol alcanza su máxima o mínima declinación. El solsticio de verano se produce cuando el Sol alcanza el Trópico de Cáncer, sucede aproximadamente el 21 de junio y marca el inicio del verano del hemisferio norte. El solsticio de invierno se produce

el 22 de diciembre, aproximadamente cuando el Sol se encuentra verticalmente sobre el Trópico de Capricornio, señalando el inicio del invierno para el hemisferio norte.

Vaguada. Área de baja presión atmosférica alargada, formando normalmente una prolongación a una depresión o zona de baja presión, de modo parecido a como un valle asciende desde una cuenca profunda, a lo largo del centro de esta vaguada se extiende con frecuencia un frente. Constituye el fenómeno inverso a la cresta (sin frente) de alta presión.

Vientos alisios. Vientos del nordeste en el hemisferio norte y del sureste en el hemisferio sur. Se dan principalmente en los océanos tropicales.

Viento geostrófico. Véase balance geostrófico.

Vorticidad. Medida microscópica de la rotación de un fluido. Está definida por el rotacional de la velocidad.

BIBLIOGRAFÍA

- Arroyo, G. J., C. S. Serra y B. A. Estrada (1985), *Trayectorias de ciclones tropicales*, Centro de Ciencias de la Atmósfera, documento interno, UNAM, México.
- Bjerknes, J. (1969), "Atmospheric teleconnection from the equatorial Pacific", *Mon. Wea. Rev.*, 97, pp. 163-172.
- Buendía C., E. y O. Delgado (1981), "Integración del modelo baroclínico filtrado en la región IV", *Revista Geofísica*, IPGH, núm. 14-15, pp. 153-159.
- Buendía C., E., C. F. Villicaña, O. Delgado D., S. E. del Valle y A. F. Gómez (1992), "On the trajectory of cyclones likely to affect the mexican republic", *Atmósfera*, 5, pp. 21-30.
- CENAPRED (1994), *Hurricanes*, fascículo núm. 5, Secretaría de Gobernación, México.
- CENAPRED (1996), "Temporada de huracanes en México", *Prevención*, núm. 13, enero, Secretaría de Gobernación, México.
- CENAPRED, *Reseña periodística*, años 1995,1996,1997, Secretaría de Gobernación, México.
- CNA-SMN (1997), *Resumen general de las temporadas de ciclones 1995,1996 y 1997*, Informe técnico interno, Comisión Nacional del Agua-Servicio Meteorológico Nacional, México.
- Contreras A., A. (1956), "Los dos aspectos de efecto de la actividad ciclónica tropical sobre el territorio mexicano", *Seminario de huracanes del Caribe 1956*, Santo Domingo, República Dominicana, pp. 339-401.

- Charney, J. G. (1948), "On the scale of atmospheric motions", *Geophys. Publ.* 17, no. 2, pp. 3-17.
- DeMaria, M. (1997), "Summary of the tropical prediction center/ National Hurricane Center, Tropical cyclone track and intensity guidance models", *Informal resource*.
- Emanuel, K. A. (1986), "An air-sea interaction theory for tropical cyclones", Part I. *J. Atmos. Sci.* 43: 585-604.
- Emanuel, K. A. (1990), "Advances in the theory of hurricanes. Tropical-extra tropical interactions", *Seminar Proceedings*, European Centre for Medium Range Weather Forecasts.
- Fuentes M., O. y M. T. Vázquez C. (1997), "Probabilidad de presentación de ciclones tropicales en México", *Cuaderno de investigación*, núm. 42, CENAPRED, México.
- García Payón, J. (1973), "Los enigmas del Tajín INAH-SEP. Descripción del pueblo de Gueytlan, por el alcalde mayor Juan de Carrión", *Cuadernos de la Facultad de Filosofía, Letras y Ciencias*, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México.
- Gray, W. M. (1981), "Recent advances in tropical cyclone research from rawinsonde composite analysis", *World Program on Research in Tropical Meteorology*, World Meteorological Organization, Génova.
- Gray, W. M. (1984a), "Atlantic seasonal hurricane frequency: Part I: El Niño and 30 mb quasi-biennial oscillation influences", *Mon. Wea. Rev.*, 112:1649-1668.
- Gray, W. M. (1984b), "Atlantic seasonal hurricane frequency: Part II: Forecasting its variability", *Mon. Wea. Rev.*, 112:1669-1683.
- Gray, W. M., C. W. Landsea, P. W. Mielke, Jr. y K. J. Berry (1992), "Predicting Atlantic seasonal hurricane activity 6-11 months in advance", *Wea. Forecasting*, 7:440-455.
- Gedzelman, S. D. (1980), *The science and wonders of the atmosphere*, John Wiley and Sons, USA.
- Gutiérrez de MacGregor, M. T. y J. González S. (1999), "Las costas mexicanas y su crecimiento urbano", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 40, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 110-126.

- Jáuregui, E. (1995), "Rain fluctuations and tropical activity in Mexico", *Erkunde*, Berlin, pp. 39-48.
- Jáuregui, E. (1989), "Los huracanes prefieren México", *Información Científica y Tecnológica*, México, 11 (155): 40-44.
- Landsea, C. W. y W. M. Gray (1989), "Eastern north Pacific tropical cyclone climatology - low frequency variations. Report of W.G. 6.3 (Northeast Pacific Ocean) of IWTC-II", *World Meteorological Organization*, Génova.
- Mason, B. J. (1970), "Future developments in Meteorology: an outlook to the year 2000", *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 96, pp. 349-368.
- Mosiño, A. P. (1993), "Ciclones tropicales y extratropicales en la época del descubrimiento", INFOMMAC, Organización Mexicana de Meteorólogos, A. C., México, (6):5-10.
- Organización Meteorológica Mundial (1978), *Compendio de apuntes para la formación del personal meteorológico de la clase IV*, vol. 3, Meteorología.
- Panchev, S. (1985), *Dynamic meteorology*, Reidel Publishing Company.
- Patiño-Pérez, C. (1907), *Vocabulario totonaca*, Oficina tipográfica del gobierno del estado, Xalapa de Enríquez.
- Richardson, F. L. (1922), *Weather prediction by numerical process*, Cambridge University Press, University Press Londres y Nueva York (Dover publication, Nueva York).
- Riel, H. (1954), *Tropical meteorology*, McGraw Hill, Nueva York.
- Rosengaus, M. (1998), *Efectos destructivos de ciclones tropicales*, MAPFRE, IMTA, México.
- Rosengaus, M. y J. Sánchez (1990), "Gilberto, ejemplo de huracanes de gran intensidad", *Ingeniería Hidráulica de México*, 5(1):13-36, México.
- Saha, R. R. (1973), "Global distribution of double cloud bands over the tropical oceans", *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 99, pp. 551-555.
- Simpson, R. H. and H. Riehl (1981), *The hurricane and its impact*, Louisiana State University Press.

- Suárez Reinoso, G. (1993), “La investigación científica en el campo de desastres y su vinculación con la sociedad”, *Memorias del Ier. Congreso Nacional de Universidades en Protección Civil, Vinculación Universidad-Sociedad*, UNAM, pp. 11-12.
- Webster, P. J. (1983), “Seasonality in the local and remote response to sea surface temperature anomalies”, *J. Atmos. Sci.*, 39:41-52.
- Willoughby, H. E., Clos, J. A. y M. G. Shoreibah (1982), “Concentric eye walls, secondary wind maxima and evolution of the hurricane vortex”, *J. Atmos. Sci.*, 39:395-411.
- World Meteorological Organization (1986), “Tropical cyclone operational plan for the Bay of Bengal and the Arabian Sea”, *WMO/TD-No. 84, TCP-21*, Génova (nueva edición 1993).
- World Meteorological Organization (1993), “Global guide to tropical cyclone forecasting”, *WMO/TD-No. 560, TCP-31*, Génova.
- Zaleta, L. (1998), *Tajín: misterio y belleza*, Grupo Editorial Neón S. A. de C. V., 10ª. ed., México.

I. Textos Monográficos

1. Historia y Geografía

1. *Europa y el urbanismo neoclásico en la Ciudad de México. Antecedentes y esplendores*
Federico Fernández Christlieb
2. *México a través de los mapas*
Héctor Mendoza Vargas (coord.)
3. *La Geografía, arma científica para la defensa del territorio*
Luz Ma. O. Tamayo P. de Ham

3. Sociedad

1. *Aspectos sociales de la población de México: educación y cultura*
Lilia Susana Padilla y Sotelo

4. Urbanización

1. *El clima de la Ciudad de México*
Ernesto Jáuregui Ostos

5. Economía

1. *La ganadería en México*
Gregorio Villegas Durán *et al.*

7. Relaciones Internacionales

1. *Las relaciones diplomáticas de México*
Mercedes Pereña-García

9. Las costas y los mares de México

1. *Características físico-químicas de los mares de México*
Guadalupe de la Lanza Espino

II. Textos de Carácter General

1. *México: una visión geográfica*
Atlántida Coll-Hurtado

Los ciclones tropicales de México I.6.1

Se terminó de imprimir en noviembre de 2001.

Tiraje 1 000 ejemplares

Los ciclones tropicales, fenómenos meteorológicos de los mares calientes del mundo, son motivo de estudios profundos, debido a la pérdida de vidas humanas y a que a su paso devastan campos, poblados y ciudades, si bien es cierto que transportan el agua necesaria para diversas actividades del hombre.

Este libro va dirigido al público en general y personas interesadas en estudiar con más detalle estos fenómenos, en él se tratan las principales características, origen, desarrollo, climatología, efectos que generan y recomendaciones en caso de que se presenten estos meteoros en nuestro país.



ISBN 968-856-952-6

