

lluvia excesiva. La construcción de trabajos de protección y la creación de un sistema de delimitación de las zonas más propicias a las inundaciones, pueden contribuir a impedir los peores efectos del exceso de lluvia.

2.3 OCURRENCIA DE LOS CICLONES TROPICALES

En el noroeste del Pacífico se observa la mayor frecuencia de ciclones tropicales. También se producen en la parte septentrional del Océano Indico (Golfo de Bengala y Mar de Arabia), al sur del Océano Indico, frente a la costa noroccidental de Australia, en el Océano Pacífico Sur y en el Océano Atlántico Norte. No se observan ciclones en la zona suroeste del Océano Atlántico ni en la zona septentrional del Océano Pacífico central, en donde las temperaturas de la superficie del mar no son suficientemente elevadas.

2.3.1 Distribución mensual

En determinadas regiones, como por ejemplo en el Pacífico noroccidental y en el Golfo de Bengala, se puede producir un ciclón tropical en cualquier mes del año, aunque en cada una de estas zonas la probabilidad de que dichos ciclones se produzcan es mucho mayor en determinados meses que en otros.

La Tabla II indica la frecuencia mensual de la formación de ciclones tropicales en las diferentes regiones en que se producen. La tabla muestra claramente que algunas zonas son mucho más propensas a los ciclones tropicales que otras. Aproximadamente el 75% de todos los ciclones tropicales se desarrollan en el hemisferio norte. En el Pacífico noroccidental se puede esperar un promedio de seis de estos ciclones en septiembre, que es el mes de mayor frecuencia, mientras que en el Golfo de Bengala el mes más vulnerable, noviembre, tiene una frecuencia media de sólo ocho en un decenio, es decir, poco más de uno por año en el mes de noviembre. Sin embargo, estas comparaciones no deben motivar la idea de que el riesgo de desastre en una zona de frecuencia relativamente baja es menos importante que el que existe en las zonas que experimentan mayor número de ciclones tropicales. Esta deducción quedará inmediatamente corregida si recordamos que el que puede considerarse como más destructivo de todos los ciclones tropicales ocurridos hasta la fecha se produjo en el Golfo de Bengala y asoló el Paquistán Oriental (hoy Bangladesh) en noviembre de 1970. No obstante,

TABLA II
Frecuencia de formación de ciclones tropicales

Período aproximado (hemisferio norte)	Hemisferio Norte - Número medio por año					Período aproximado (hemisferio sur)	Hemisferio Sur-Número medio por año		
	Noroeste del Pacífico (1947-70)	Noreste del Pacífico (1964-73)	Atlántico noroccidental (1934-63)	Océano Índico septentrional			Océano Índico Meridional (1963-74)	Pacífico meridional (1950-69)	
				Golfo de Bengala	Mar de Arabia (1891- 1960)			105°E 135°E	135°E 165°E
Enero	0.5			.06	.03	Julio			0
Febrero	0.3		0.1	.01	0	Agosto			
Marzo	0.5			.06	0	Septiembre			
Abril	0.7			.26	.07	Octubre			
Mayo	1.3	0.3	0.2	.40	.19	Noviembre		0.1	0.3
Junio	2.3	1.6	0.5	.49	.19	Diciembre		0.5	0.8
Julio	4.2	3.2	0.7	.55	.04	Enero		1.5	1.6
Agosto	5.8	3.8	2.3	.36	.01	Febrero		1.6	1.3
Septiembre	6.2	2.8	3.4	.39	.06	Marzo		1.3	1.3
Octubre	4.4	1.5	2.0	.76	.24	Abril		0.4	0.8
Noviembre	3.4	0.3	0.3	.80	.30	Mayo		0.1	0.2
Diciembre	1.9		0.1	.37	.04	Junio			0.2
Total	31.6	13.5	9.4	4.5	1.2	Total		12.2	4.2* 5.5*

Frete a la costa noroccidental de Australia.

* Los totales son menores que la suma de los valores mensuales, porque si un ciclón ha persistido du un mes al siguiente, se ha contado dos veces.

merece la pena recordar que los ciclones tropicales y las correspondientes inundaciones y mareas de tempestad se concentran en Asia y afectan a buen número de países en desarrollo. Durante el período 1947-1973 Asia sufrió el 96% de todas las muertes conocidas causadas por los ciclones tropicales.

En términos generales y fundándose en los datos estadísticos que se resumen en la Tabla II, se puede decir que los ciclones tropicales se producen con mayor frecuencia en verano y otoño. Cada región tiene su mes de mayor frecuencia, excepto en el Océano Índico septentrional (Golfo de Bengala y Mar de Arabia) en donde la distribución presenta dos valores máximos: uno a principios de verano y otro a finales del otoño.

2.4 DETECCION Y RASTREO DE LOS CICLONES TROPICALES

En la atmósfera tienen lugar continuamente transformaciones de energía y otros procesos. Existe gran variedad de estos procesos; algunos son rápidos, mientras que otros son lentos. Algunos se hallan en fase de disipación mientras que al mismo tiempo se generan otros nuevos. Debido a que la atmósfera se halla en continuo estado de agitación, sus propiedades - presión, temperatura, viento, etc. - han de ser medidas y observadas frecuentemente en gran número de puntos, de modo que su estado pueda ser descrito de la manera más completa posible a intervalos de pocas horas, con objeto de notar tanto la ocurrencia como los síntomas de ocurrencia de todos estos fenómenos.

Por consiguiente y con objeto de llevar a cabo las tareas de predicción que les incumben, los servicios meteorológicos dependen de la recepción de datos varias veces por día, procedentes de una muy amplia zona de los alrededores del país o región al que se destinan los servicios de predicción. No sólo han de hacerse observaciones en esta amplia zona, sino que han de estar también en funcionamiento las correspondientes instalaciones de telecomunicación de modo que los datos puedan ser reunidos y después difundidos a todos los servicios de predicción, de acuerdo con sus necesidades. Estas necesidades esenciales - adquisición, recopilación, elaboración y distribución de datos - de la ciencia y práctica de la predicción meteorológica han motivado la instauración del programa denominado Vigilancia Meteorológica Mundial. Este programa se halla ya en fase avanzada y está siendo constantemente desarrollado y coordinado por la

Organización Meteorológica Mundial (OMM) en conjunción con los servicios meteorológicos nacionales de todo el mundo. La OMM ha establecido normas generales para las estaciones de las redes de observación de superficie y en altitud y cada país, en su calidad de Miembro de la OMM, se encarga de crear e instalar sus redes nacionales, de conformidad con estas normas, y también de facilitar los datos para el intercambio internacional.

2.4.1 Sistemas de observación

El Sistema Mundial de Observación de la Vigilancia Meteorológica Mundial consiste esencialmente en la integración de las redes sinópticas básicas de cada país en un sistema único al que se aplican procedimientos técnicos comunes. Estas redes están constituidas de estaciones de observación de superficie y de un pequeño número de estaciones de observación en altitud, encargadas estas últimas de medir la presión, temperatura, humedad y viento desde el suelo hasta una altitud de unos 30 km. Además, los países marítimos hacen lo necesario para que se efectúen observaciones meteorológicas a bordo de los buques de sus flotas mercantes y, en ciertos casos, algunos grupos de países han facilitado fondos para mantener en funcionamiento buques meteorológicos en estaciones fijas.

Cada país se encarga también de instalar equipos receptores en sus principales centros meteorológicos para recibir las transmisiones automáticas de imágenes de nubes (APT) procedentes de los satélites de órbita polar (véase más adelante).

La red básica de observación de cada país está destinada a hacer frente a las necesidades habituales de la predicción y de la climatología aplicadas a la aviación, a la agricultura, industria, público en general, etc. Sin embargo, cuando se trata de necesidades especiales o si es probable que se produzcan fenómenos meteorológicos anormales, cada país suele instalar otros medios de observación adicionales con objeto de complementar los datos que facilita la red básica. Todo país vulnerable a los ciclones tropicales debe establecer las instalaciones adicionales siguientes:

i) Radar meteorológico

El equipo de radar que funciona con una longitud de onda de 10 cm tiene un alcance eficaz de unos 300 km para localizar y rastrear los ciclones tropicales. Con el equipo de radar instalado en emplazamientos elevados a lo largo de la costa, se puede obtener continuamente información precisa sobre la trayectoria de un ciclón tropical por lo menos 24 horas antes de su llegada, si la trayectoria se aproxima a la costa pero formando un ángulo oblicuo con ella, contando con una serie de estaciones de radar se debe poder mantener una constante vigilancia del ciclón tropical durante varios días.

Dentro de su alcance, una estación de radar meteorológico, además de su función de rastreo, facilita información muy útil y precisa sobre la naturaleza de los sistemas nubosos y correspondiente lluvia de los ciclones tropicales. La Figura 7 es un diagrama esquemático que muestra el ojo de un huracán y la estructura en bandas de las nubes, tal y como aparecen en una fotografía de la pantalla de radar. También se indica el "núcleo de lluvia" donde convergen las bandas lluviosas interiores.

ii) Recepción de los datos procedentes de los satélites

Las imágenes procedentes de los satélites meteorológicos contienen numerosa información de la estructura de las nubes que existen en la atmósfera en el momento de tomar las fotografías. Estos detalles de las nubes que existen en la atmósfera en el momento de tomar las fotografías. Estos detalles de las nubes constituyen para los meteorólogos un medio muy preciso de identificar los ciclones tropicales y de situar las posiciones de sus centros. Las imágenes de las nubes pueden también ser utilizadas de un modo cualitativo que permite estimar la intensidad de un ciclón tropical. El método es casi completamente empírico, pero permite obtener estimaciones de la presión mínima al nivel del mar dentro del ciclón tropical y de la fuerza máxima del viento, que han estado dando constantes resultados.

Hay dos sistemas de satélites meteorológicos actualmente en uso operativo. Uno es el sistema de satélites de órbita polar que facilita, a intervalos de 12 horas, imágenes de la distribución de nubes en una muy amplia zona centrada

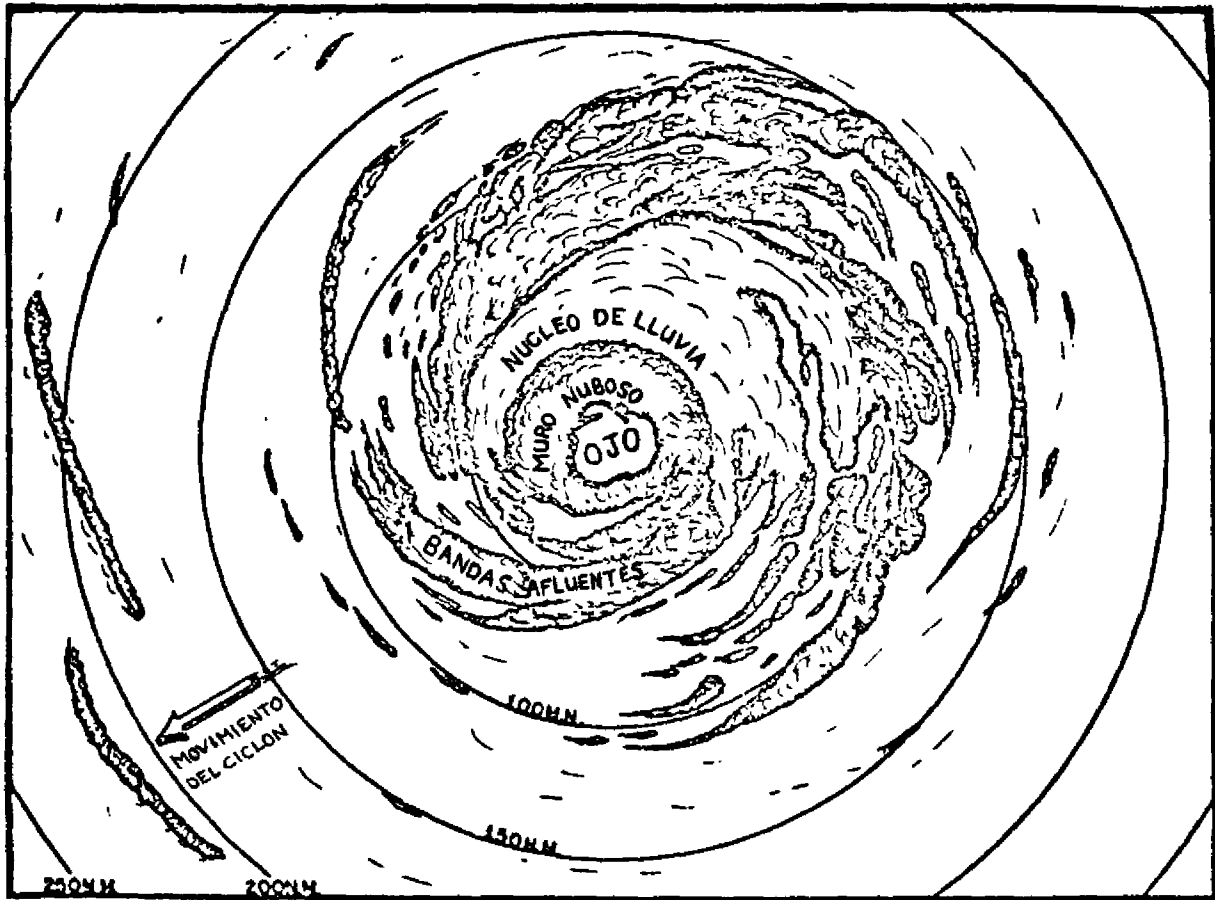


Figura 7 Diagrama esquemático del ojo y estructura en bandas de un ciclón tropical tal como aparecen en una fotografía de la pantalla de radar.

en la estación receptora. Una estación puede normalmente interceptar las transmisiones APT procedentes de tres órbitas sucesivas sobre la vertical o muy cerca de la vertical de la estación y, por consiguiente, se puede así reconstituir un mosaico de nubes que cubre una considerable parte de la tierra. El equipo receptor de una estación APT es relativamente sencillo y casi todos los servicios meteorológicos del mundo han instalado una o varias de estas estaciones receptoras.

El segundo sistema consta de satélites geoestacionarios cada uno de los cuales está situado permanentemente sobre un punto fijo del ecuador. Se espera que el sistema constituido por cinco de estos satélites, equidistantes entre sí alrededor del ecuador esté en pleno funcionamiento en 1978, estos satélites permitirán entonces cubrir completamente toda la tierra entre las latitudes de 50°N y 50°S aproximadamente. Las imágenes de nubes se toman cada 20-25 minutos para facilitar información casi continuamente de las regiones tropicales y de las situadas en latitudes medias. En lo que respecta a los ciclones tropicales, el sistema de satélites geoestacionarios es de extrema importancia para localizar y rastrear estas perturbaciones, especialmente en las zonas en donde no existen sistemas de observación más clásicos o los que existen son insuficientes.

No obstante, existe un importante problema que no se plantea en el caso de los satélites de órbita polar. Una estación receptora capaz de interceptar todos los datos que pueda facilitar un satélite geoestacionario y de convertir las señales recibidas en información meteorológica utilizable resultaría demasiado compleja y costosa. Aparte del numeroso equipo de telecomunicación necesario, la estación requeriría computadoras de gran potencia y, desde luego, un importante equipo de científicos y técnicos. La OMM, en consulta con los servicios meteorológicos nacionales, está estudiando este problema y tratando de averiguar la posibilidad de establecer una estación receptora en cada región que se encargaría de elaborar los datos procedentes de un satélite geoestacionario y de transmitir los resultados por radio y línea terrestre a otros centros meteorológicos de la región y, cuando así se precise, a los centros de otras regiones.

iii) Informes procedentes de las aeronaves

Los informes hechos en vuelo por aviones comerciales u otras aeronaves que vuelen en la zona general donde exista un ciclón tropical pueden constituir un complemento muy útil a los datos obtenidos de otras fuentes. Por consiguiente, cuando se sabe que existe un ciclón tropical se deben tomar disposiciones especiales para obtener informes meteorológicos - vientos, temperaturas, estructura de las nubes, etc. - de cualquier avión que se espere haya de volar cerca de esta perturbación. Dichos informes deben ser transmitidos en vuelo al correspondiente centro de predicción.

Los aviones especiales de reconocimiento, dotados de equipo completo con los más recientes instrumentos meteorológicos y de navegación, podrían facilitar información referente a la intensidad de un ciclón tropical y a la posición de su centro con mayor precisión que cualquier otra fuente de datos. Los gastos de inversión y funcionamiento de dichos aviones son muy elevados y esta posibilidad sólo será practicable si los países de una región vulnerable se unen, posiblemente con ayuda exterior, para financiar un proyecto.

iv) Sistemas de concentración de datos

Toda la organización destinada a la obtención de datos meteorológicos contiene numerosos componentes y su utilidad y eficacia se verían gravemente comprometidas si ésta organización no está respaldada con un sistema rápido y seguro de concentración y distribución de datos en forma básica y elaborada. La pérdida de tiempo en la concentración de datos puede reflejarse en la inferior calidad de las predicciones. También se debe tener presente que, por estar la atmósfera en continuo movimiento, los servicios meteorológicos, junto con sus correspondientes sistemas de observación y telecomunicación, funcionan las 24 horas del día y cada día del año. Es, pues, de la mayor importancia la fiabilidad del sistema de comunicaciones. El sistema debe ser robusto y ha de contar con suficientes medios de repuesto, ya que además ha de tenerse en funcionamiento en las ocasiones más vitales, como por ejemplo cuando existe la amenaza de un ciclón tropical o cuando dicho ciclón afecta ya al país.

2.5 PROCEDIMIENTOS DE PREDICCIÓN

El trabajo técnico habitual de un servicio de predicción consiste en la transcripción y análisis de los mapas sinópticos y diagramas aerológicos, como fase preliminar para la elaboración de mapas de previsiones que describen la situación de la atmósfera con anticipación de 12, 24 y 36 horas. Los mapas sinópticos elaborados por un servicio meteorológico nacional han de cubrir una zona muy amplia que se extiende en todas direcciones, mucho más allá de las fronteras territoriales del país. Estos mapas se elaboran para varios niveles de la atmósfera desde la superficie, que son los bien conocidos mapas meteorológicos, hasta una altura de unos 20 km. Los diagramas aerológicos constituyen un método muy adecuado para mostrar la estructura vertical de la atmósfera en determinado número de emplazamientos utilizando los datos obtenidos por las estaciones de observación en altitud, cada 12 o 24 horas. La eficacia de estos diferentes procedimientos habituales depende de la disponibilidad de datos básicos. Muchos de los graves errores de predicción proceden de la falta de datos de buena calidad.

En las regiones donde se producen ciclones tropicales, el servicio de predicción deberá estar constantemente en estado de alerta con objeto de detectar cualquier ciclón tan pronto como sea posible después de su aparición. Los mapas y diagramas constituyen una buena indicación de las zonas en donde es probable que se generen ciclones tropicales y los otros medios, tales como las imágenes de los satélites, radar meteorológico e informes procedentes de los aviones contribuyen a localizar estos ciclones con bastante prontitud en cuanto aparecen.

Tan pronto como se conoce la existencia de un ciclón tropical y su posición aproximada, los predictores dedican especial atención a los aspectos siguientes:

- a) Su intensidad, es decir, la presión central mínima y la máxima fuerza del viento, cambios de intensidad del ciclón tropical, así como la dirección y velocidad de su movimiento;
- b) Posibilidades de lluvia (en consulta con el servicio hidrológico);
- c) Posibilidades de marea de tempestad (en consulta con el servicio hidrográfico).

2.5.1 Técnicas subjetivas

Para predecir la intensidad de un ciclón tropical y su movimiento, se dispone de varias técnicas que han demostrado sobradamente su utilidad. Estas permiten un alto grado de precisión con hasta 24 horas de anticipación, pero pasado dicho período esta precisión es mucho menor. Por este motivo, el predictor examina la situación de nuevo a medida que se reciben más datos actualizados, con objeto de poder determinar con frecuencia la posición y otras características del ciclón tropical y difundir una nueva serie de predicciones. No se debe descartar la posibilidad de que se produzcan graves errores de predicción, ya que un ciclón tropical puede tener un movimiento errático, cambiando su dirección de vez en cuando y, en algunos casos, describiendo un bucle.

Los ciclones tropicales tiende a desplazarse con el flujo medio del volumen de la atmósfera que les rodea. Este flujo medio, denominado corriente directiva, puede ser modificado por varias fuerzas, algunas de las cuales son generadas por el mismo ciclón, pero constituye una excelente guía para el rastreo del fenómeno durante las próximas 24 horas. No obstante, las indicaciones han de ser siempre verificadas mediante la aplicación de otras técnicas, antes de difundir una predicción. Los registros climatológicos constituyen una guía muy útil en este caso. El análisis de los datos correspondientes a numerosos años, registrados en la misma zona oceánica y en la misma época del año, permitirán obtener valores medios de la dirección y velocidad del movimiento por comparación con las interferencias motivadas por la corriente directiva. También se pueden obtener indicaciones muy valiosas mediante el simple procedimiento de transcribir en un mapa las posiciones sucesivas del centro del ciclón tropical. La extrapolación de la trayectoria a períodos de hasta 12 a 18 horas, da en general buenos resultados.

El predictor utiliza toda esta variedad de técnicas porque no existen reglas generales que rijan el movimiento y desarrollo de todos los ciclones tropicales. El predictor admite que los problemas de predicción y posibles soluciones difieren de un ciclón a otro, de una época a otra, y también varían en función del área en la que se localiza la perturbación. Por consiguiente, no cesa en su vigilancia, incluso si todas las técnicas disponibles dan indicaciones que estén entre sí de acuerdo.

Por otra parte, si las distintas técnicas dan motivo a una solución conflictiva, la experiencia del predictor le permite habitualmente decidir cuál de ellas constituye la mejor guía en las circunstancias particulares de que se trate.

En la Figura 8 se indican algunos ejemplos de distribución de presión y de los correspondientes programas de predicción, aplicables al hemisferio norte. Las líneas continuas de trazo fino con flechas representan el flujo medio alrededor del ciclón, promediado desde el nivel del mar hasta la cima del mismo. Las posiciones del ciclón se indican mediante una "C", siendo t_0 la hora de la posición actual. Las posiciones previas que ocupaba el centro del ciclón a intervalos de 24 horas se indican mediante t_{-1} , t_{-2} , etc. La trayectoria que el ciclón seguiría en el futuro, si se desplazase aproximadamente con el flujo medio y este no cambiase con el tiempo, se indican mediante la doble flecha.

La Figura 8a representa una situación bastante típica en las regiones tropicales. El ciclón se desplaza en dirección del oeste, en general sobre el lado ecuatorial de la amplia zona anticiclónica denominada comúnmente dorsal subtropical de alta presión. La circulación alrededor del sistema de alta presión se centra en H. Los principales problemas de predicción consisten en determinar hasta qué punto el ciclón seguirá el flujo medio y cómo este flujo medio cambiará con el tiempo. En esta distribución de presión cualquier cambio de flujo medio se produce en general lentamente.

La Figura 8b representa un difícil problema de predicción. Aquí el ciclón está situado en una latitud mayor que en la Figura 8a, y se aproxima a un surco de baja presión (L) situado en latitudes medias y que se extiende casi hasta la latitud del ciclón. El problema consiste en predecir cómo la corriente directiva cambiará con el tiempo y también si el ciclón continuará en la corriente directiva este-oeste o se "recurvará" dentro de la corriente directiva del sur-oeste-noreste; en otras palabras ¿seguirá el ciclón la trayectoria "A" o la "B"?

En la Figura 8c la situación es más difícil que en la Figura 8a, pero menos que la representada en 8b. Aquí, el principal problema reside en predecir cómo cambiará la corriente directiva con el tiempo. Con frecuencia cambia rápidamente, tanto en esta situación como en la que se ilustra en 8b.

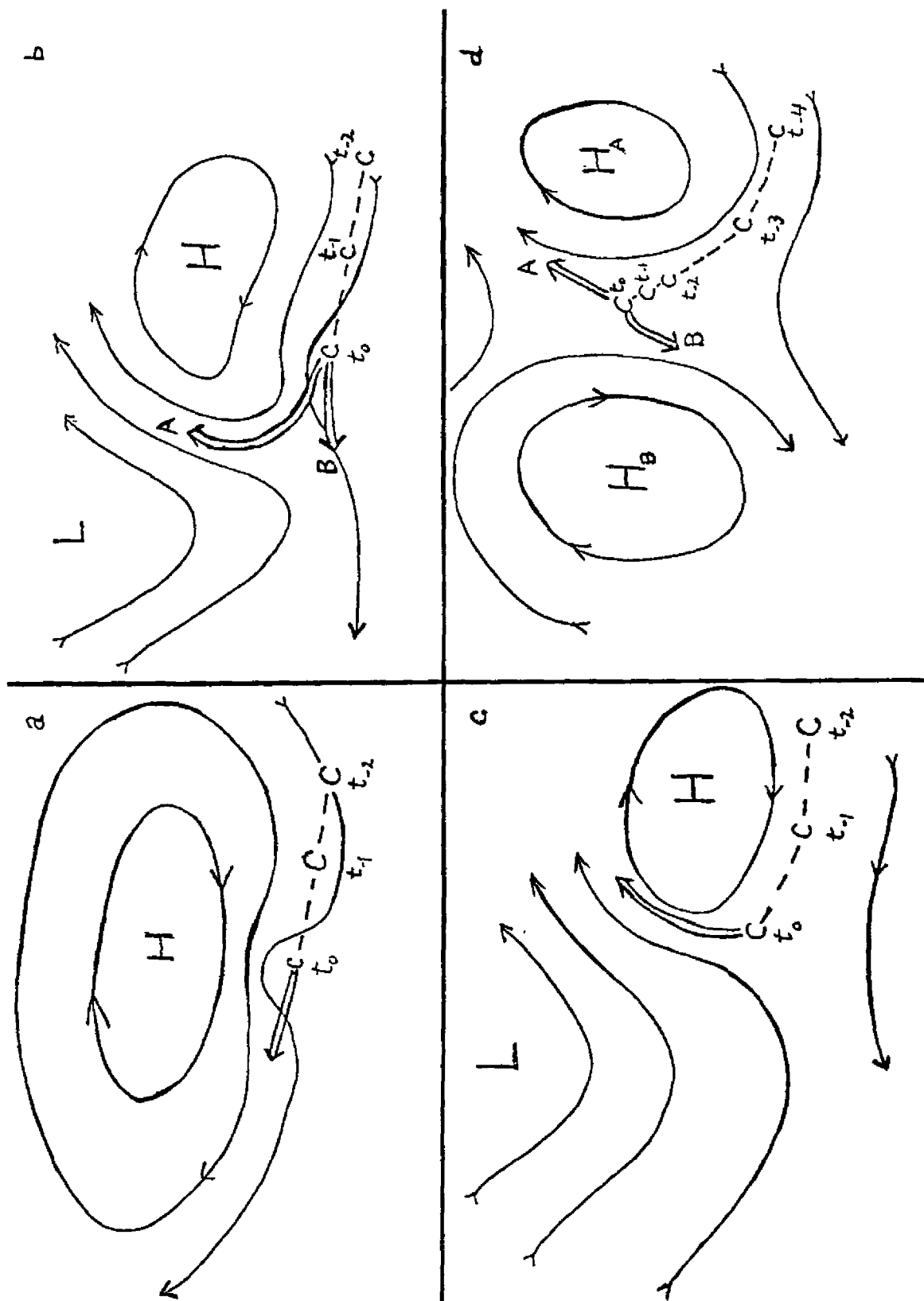


Figura 8 Influencia de las corrientes directivas sobre la trayectoria de un ciclón tropical (hemisferio norte)

En la Figura 8d se da una situación especialmente compleja en la que existe un sistema subtropical de altas presiones, con centros separados, H_a y H_b , cada uno con su propia circulación. El principal problema consiste en saber si el centro del ciclón será dirigido por la corriente que circula alrededor de H_a o por la corriente que rodea a H_b , o por último si permanecerá en la zona de vientos débiles y variables situada entre los dos centros, moviéndose erráticamente y con lentitud. La Figura 8d indica el tipo de distribución de presión que existe alrededor de un ciclón tropical y que puede originar que la trayectoria del ciclón describa un bucle o una curvatura aguda, o bien cualquier otra trayectoria muy inhabitual.

Los ejemplos de la Figura 8, además de ilustrar algunos problemas de predicción, sirven también para demostrar la necesidad de controlar constantemente la posición de un ciclón tropical.

2.5.2 Utilización de computadoras

Las técnicas antes citadas, y otras que se utilizan cada día en las oficinas de predicción, tienen un considerable fundamento científico y se aplican subjetivamente, utilizando el predictor su propio juicio y larga experiencia. La rapidez de cálculo y elaboración de los datos que ofrecen las computadoras numéricas hoy en día permiten a los meteorólogos describir en un plazo mínimo y evaluar, en especial en las latitudes templadas y altas, el futuro comportamiento de los diferentes sistemas de presión y la posibilidad de que se produzcan nuevos acontecimientos en diferentes zonas. En los dos últimos decenios se han creado técnicas objetivas en las que se utilizan potentes computadoras, lo cual ha permitido incrementar el alcance y flexibilidad de los métodos de predicción.

La aplicación de las técnicas por computadoras, lo cual ha permitido incrementar el alcance y flexibilidad de los métodos de predicción.

La aplicación de las técnicas por computadora comienza con la introducción y ulterior renovación de valores simultáneos y actualizados de los parámetros meteorológicos referentes a las condiciones que existen cerca de la superficie y en altitud, dentro de un modelo matemático de la atmósfera aplicable a todo el mundo, un hemisferio o a una parte de un hemisferio. El tiempo, que es una de las

variables del modelo, se hace luego avanzar gradualmente y, después de una serie de cálculos, el modelo predice con mayor o menor éxito el movimiento, desarrollo y disipación de los diferentes sistemas de presión atmosféricos, con anticipación de hasta 96 horas.

Las nuevas técnicas por computadora no han desplazado a los métodos más antiguos y es poco probable que lo hagan en el futuro. Los dos tipos de técnicas se utilizan al mismo tiempo, complementándose mutuamente. Para una predicción de corto período de validez, por ejemplo con 24 horas de anticipación, la computadora permite al predictor disponer de un segundo criterio. Para períodos más largos, la computadora tiene una capacidad superior a la del predictor que utilice métodos tradicionales, especialmente cuando el período de validez de la predicción es ya de unas 48 horas.

2.5.2.1 Modelos numéricos de los ciclones tropicales

El problema de establecer modelos numéricos de los sistemas de baja presión que se producen en las zonas tropicales es mucho más complicado que los problemas antes citados, y hasta la fecha ha sido resuelto mucho menos satisfactoriamente que el correspondiente a las depresiones de las latitudes templadas. Estas últimas constituyen características de relativa gran escala dentro de la circulación general de la atmósfera y obtienen su energía principalmente de hundimiento de grandes masas de aire frío. Este proceso puede ser descrito en función de los contrastes de temperatura horizontal que existen entre las distas masas de aire, cuyos límites se trazan en los mapas meteorológicos mediante líneas que se denominan frentes.

Por otra parte, incluso en su fase de mayor desarrollo, un ciclón tropical es comparativamente pequeño en dimensiones horizontales (véase la sección 2.2 anterior) y los contrastes de temperatura no existen o son muy pequeños en las zonas donde se generan los ciclones tropicales. Para que se produzca un ciclón, y también para que se mantenga, han de tener lugar ciertos procesos con intensidad adecuada y en el momento oportuno. En las primeras fases, estos procesos, por una razón u otra, pueden contrarrestarse entre ellos con lo cual se impide el desarrollo del ciclón que puede incluso desaparecer completamente. Para que prospere un ciclón, la temperatura de superficie en una limitada zona del mar tiene que comenzar a descender y el aire manifestará la tendencia a

circular alrededor del punto de menor presión. Por consiguiente, una condición esencial es que la atmósfera circundante debe estar estructurada de tal modo que soporte el giro que trata de desarrollarse localmente en la zona de presión descendente. Si el giro es muy acentuado, se formarán grandes cúmulos y se liberará energía calorífica, la cual, como segunda condición esencial, debe estar adecuadamente distribuida por la atmósfera circundante para que pueda continuar el desarrollo inicial del ciclón tropical. A medida que la perturbación se intensifica y la circulación llega a ser de vientos duros e incluso huracanados, el ciclón depende ya exclusivamente del continuo flujo de energía calorífica que, procedente del mar, llega al aire.

Todos los procesos que intervienen en la formación de un ciclón tropical son muy difíciles de reflejar en un modelo numérico, en parte debido a las diferentes escalas de movimiento que en ellos toman parte. Algunos de los modelos hasta la fecha establecidos muestran signos alentadores de que eventualmente quizás sea posible, mediante cálculos matemáticos, predecir toda la evolución de un ciclón tropical durante su existencia. Se está llevando a cabo una intensa labor de investigación dentro del Programa de Investigación Global de la Atmósfera, patrocinado por la OMM y el CIUC ^{9/}, y también en otros proyectos. Mientras tanto, las principales técnicas de predicción que se aplican a los ciclones tropicales tendrán que depender de la detección, rastreo y estudio del movimiento observado y también del análisis de las condiciones atmosféricas de la región.

2.5.3 Centros de la Vigilancia Meteorológica Mundial - Transmisión de las predicciones

Aunque aumenta continuamente la utilización de las computadoras en meteorología, debemos aceptar que no todos los servicios meteorológicos nacionales poseen una de ellas con la suficiente potencia para poder utilizarla en las labores diarias de predicción para fines operativos. Cuando la computadora está fuera de uso, el servicio correspondiente debe disponer de equipo para recibir las transmisiones por facsímil procedentes del correspondiente Centro Meteorológico regional o de un Centro Meteorológico mundial perteneciente al

^{9/} Consejo Internacional de Uniones Científicas

Programa de la Vigilancia Meteorológica Mundial de la OMM. Estos centros emiten dos veces al día mapas previstos por computadora, que indican las condiciones que se esperan tanto en la superficie como a distintos niveles de la atmósfera superior, en las próximas 72 o 96 horas. La recepción de estas transmisiones será sin duda alguna de gran ayuda para el servicio meteorológico.

2.5.4 Errores de predicción

Se han llevado a cabo algunas investigaciones relativas a los errores de predicción y, como consecuencia de ellas, se piensa que existe una considerable variación de un año a otro y de una región a otra, dependiendo esta última de la cantidad de datos disponibles y de la experiencia del predictor. Utilizando valores medios generales, se puede decir que el error de una predicción de 24 horas de validez, en lo que respecta a la posición del centro de un ciclón tropical, es de unos 175 km. El error probable parece estar directamente relacionado con el período de predicción, es decir, que el error medio de una predicción de 48 horas es de aproximadamente el doble que el correspondiente a una predicción de 24 horas.

Los errores de predicción, en lo que respecta a la posición del centro de un ciclón tropical, son desde luego de enorme importancia práctica. Por consiguiente, es muy alentador el hecho de que las estadísticas de verificación indican una mejora en este sentido, lo cual es un índice de que los nuevos datos disponibles y la intensa labor de investigación comienzan a dar buenos resultados.

2.5.5 Predicción de la lluvia y riesgo de inundación

En la predicción y aviso de los distintos aspectos del riesgo de inundación debe mantenerse una estrecha coordinación entre los predictores meteorológicos y los hidrólogos, los cuales deben trabajar de acuerdo con las entidades responsables de los recursos hídricos y con las autoridades locales ^{10/}. El meteorólogo, además de predecir la intensidad, movimiento y evolución del ciclón tropical, elaborará también predicciones de lluvia, hora de su comienzo, duración y cantidad prevista.

^{10/} Véase el Volumen 2: Aspectos Hidrológicos, Prevención y Mitigación de Desastres, publicado por la Oficina del Coordinador de las Naciones Unidas para el Socorro en Caso de Desastre, Ginebra (Suiza), 1976.

La lluvia es casi siempre intensa en un ciclón tropical y puede llegar a ser, en total, de 75 a 300 mm durante un período comprendido entre 12 y 48 horas. La lluvia varía considerablemente de un ciclón a otro y está sometida a la fuerte influencia del tiempo necesario para que el ciclón pase. En los países montañosos la lluvia puede ser de gran intensidad. Por ejemplo, los registros meteorológicos japoneses y chinos indican frecuentemente la caída de más de 600 mm de lluvia en amplias zonas de las regiones montañosas durante el paso de un tifón.

Las predicciones de la cantidad de lluvia se fundan en una evaluación general de la intensidad y movimiento del ciclón tropical, del tamaño de la correspondiente zona lluviosa y del terreno que ha de cruzar el ciclón. Se hace también un estudio detallado utilizando todos los datos disponibles de factores tales como el suministro de humedad al aire dentro del ciclón y la velocidad de ascenso del aire. También se consultan las estadísticas de lluvia deducidas de los registros de años anteriores.

En algunos países, las entidades hidrometeorológicas han establecido técnicas gráficas para predecir la cantidad de lluvia. Esas técnicas sólo pueden aplicarse en el país para el que se han establecido, aunque otros países utilizando también sus propios registros de lluvia pueden fácilmente obtener las correspondientes fórmulas y gráficos para efectos de predicción.

La predicción de la lluvia es una de las tareas más difíciles con que han de enfrentarse los meteorólogos y a este respecto resulta de gran utilidad disponer de mucha experiencia. Un predictor que conozca bien el tiempo de su región, así como la distribución del viento y la topografía del terreno, puede lograr muy buenos resultados en la predicción de la cantidad de lluvia, rivalizando si no superando la precisión lograda mediante elaboradas técnicas objetivas.

La evaluación del riesgo de inundación se funda principalmente en la predicción de lluvia aplicable a las zonas en donde el intervalo de tiempo que separa la lluvia intensa de la inundación puede ser corto. Por ejemplo, podemos citar las zonas urbanas situadas en las proximidades de una vertiente de captación o las islas pequeñas que tienen una zona montañosa en el interior. En las otras

regiones donde el agua fluye corriente abajo durante muchas horas, o varios días, antes de causar daños, la predicción de inundaciones se funda principalmente en el análisis de las medidas sucesivas del caudal en distintos puntos a lo largo del río. Entre otros factores importantes podemos citar la lluvia total acumulada que ha caído ya y el estado actual de los ríos en relación con los niveles de inundación 11/.

2.5.6 Predicción de las mareas de tempestad

La predicción de las mareas de tempestad se funda actualmente en gran medida en métodos empíricos. Varios países están llevando a cabo trabajos de investigación muy prometedores con objeto de llegar a establecer modelos dinámicos que permitan elaborar predicciones numéricas, para complementar las basadas en fórmulas empíricas.

Como medida preparatoria para la predicción de mareas de tempestad es necesario disponer de gran cantidad de antecedentes. Se necesita, por ejemplo, disponer de mapas de frecuencia de vientos fuertes, amplitud de la marea diaria correspondiente a los meses de la estación de ciclones, así como de los resultados de los estudios topográficos de la plataforma continental y de las bahías.

Las empíricas técnicas de predicción actualmente en uso permiten obtener la elevación máxima prevista del nivel del mar o la altura de la marea de tempestad en función de la distancia y dirección, a partir del centro del ciclón tropical. Estas técnicas dan resultados bastante buenos. Cuando se producen graves errores de predicción de la altura de la marea de tempestad en un punto de la costa, la razón es invariablemente que la predicción de la entrada en tierra del ciclón tropical fue imprecisa. Por consiguiente, a medida que los meteorólogos mejoren su capacidad de predicción en lo que respecta a la velocidad y dirección del movimiento de los ciclones tropicales, también mejorará la predicción de las mareas de tempestad.

11/ Obra citada, capítulo III.

2.6 AVISOS DE CICLON TROPICAL

Habitualmente, se difunden predicciones varias veces al día por acuerdo con los usuarios de los servicios meteorológicos. Por ejemplo, algunos usuarios necesitan predicciones de 12 horas de validez, cada seis horas; otros, quizás necesiten predicciones de 24/48 horas de validez, una o dos veces al día. En todo caso, los usuarios han de especificar a qué hora ha de facilitarse la predección.

Por otra parte, los avisos no tienen carácter habitual. Se difunden al primer signo de condiciones meteorológicas adversas y ulteriormente con mayor ritmo y detalle, a medida que la amenaza tiene más probabilidad de materializarse. En el caso de los ciclones tropicales, las autoridades responsables de las medidas de protección contra los desastres, y el público en general, deben ser informados tan pronto como se conozca la existencia de un ciclón tropical en los mares limítrofes del país. Este mensaje equivale a un aviso preliminar cuyo objeto es ayudar a los distintos componentes de la organización de emergencia a que se preparen ante la posibilidad de que pronto tengan que estar perfectamente sispuestos a combatir un desastre.

Se debe insistir en que el servicio de predicción y aviso constituye un componente crucial dentro de la organización de protección contra los desastres. Si este servicio es ineficaz, en un momento en que existe el peligro de un ciclón tropical, el resto de la organización encargada de la protección contra los desastres no dispondría probablemente del tiempo necesario para completar las distintas tareas de preparación ante una emergencia, las cuales no se inician hasta que el servicio meteorológico difunde su primer aviso. Una eficaz organización de protección contra los desastres y que además cuente, como parte integrante, con un buen servicio de predicción y avisos, puede reducir considerablemente la pérdida de vidas y los daños causados por los ciclones tropicales. Las condiciones esenciales son que los avisos sean precisos y motiven, tanto a las autoridades responsables como al público en general, a reaccionar con prontitud; que el sistema de difusión sea eficaz para transmitir rápidamente los avisos a todos los interesados, tanto a las autoridades como a la población y que esta población sepa lo que ha de hacer al recibir instrucciones o si es necesario que decida bajo su propia iniciativa.

Se debe quizás explicar que un aviso de ciclón tropical difundido por un servicio meteorológico tiene un carácter de consejo y no constituye una orden para la organización de protección o para el público en general. Las autoridades encargadas de la organización de protección tienen la responsabilidad de dar todas las órdenes e instrucciones necesarias; en esta labor las predicciones y avisos de asesoramiento complementario dados por el servicio meteorológico constituyen una aportación muy valiosa. No obstante, por acuerdo con las autoridades, el servicio meteorológico, al redactar un aviso para su difusión, podría añadir al final del mensaje unas líneas diciendo más o menos que "el Director de la organización de protección ha pedido que se añadan las siguientes instrucciones al final del presente mensaje: ----".

Cuando se ha reconocido que existe la posibilidad de que se produzca un ciclón tropical, el servicio meteorológico será también responsable de las siguientes actividades:

- i) preparación de boletines periódicos o predicciones, con objeto de mantener informados a las autoridades responsables y público en general, de la intensidad, posición y movimiento previsto del ciclón tropical.
- ii) difusión de avisos de vientos peligrosos, fuertes mareas de tempestad y lluvias torreciales.

El servicio meteorológico atribuye gran importancia al estudio de las necesidades de los usuarios, es decir, de las entidades que hacen uso de sus predicciones y avisos meteorológicos. Por este medio el servicio meteorológico trata de facilitar a cada uno de sus clientes un conjunto de predicciones y avisos adaptados exactamente a sus necesidades. En lo que respecta a los ciclones tropicales hay que considerar en primer lugar a las autoridades responsables de ejecutar las medidas de protección contra los desastres, y también al público en general. Además, hay otras muchas entidades especiales que motivan que los avisos tengan que ser redactados adecuadamente. Por ejemplo, la flota pesquera, que habitualmente faena a una distancia tal que existe más de un día para encontrar un puerto de refugio, necesita avisos con mayor anticipación que el propietario de su casa que sólo necesita colocar sobre las ventanas algunos postigos de protección prefabricados, para estar dispuesto. El director de una

gran industria química, que necesita tres días para cerrar su fábrica, precisa un período mayor de preaviso que el pequeño detallista que puede asegurar su tienda en unas pocas horas. Los encargados del funcionamiento de las plataformas petrolíferas ancladas frente a las costas tienen otros problemas en los que respecta a la preparación ante la amenaza de un ciclón tropical. Los distintos grupos de posibles usuarios de los avisos deben ser determinados con anticipación, analizando todas sus necesidades y, antes de que se produzca la emergencia deben terminar todos los preparativos con objeto de elaborar y distribuir rápidamente los avisos. Entre los grupos de usuarios cuyas necesidades han de ser estudiadas figuran las autoridades civiles y militares, flotas pesqueras, propietarios de pequeñas embarcaciones, empresas de manufactura, escuelas, sistemas de transporte, compañías eléctricas, sistemas de comunicación, tiendas de venta al por menor y propietarios de casis.

Es importante determinar con qué anticipación necesita cada usuario disponer de un aviso, aunque los que lo necesiten con mayor antelación deben comprender que la precisión de estos mensajes decrece a medida que aumenta su antelación. El predictor tratará de garantizar la difusión de un aviso cada vez que se necesite. Por consiguiente y de manera inevitable, cuanto mayor sea la anticipación de un aviso mayor es la probabilidad de que resulte innecesario. • Esto significa que, si un aviso debe ser difundido con más de 24 horas de anticipación, puede que se tomen precauciones que en realidad resultarán después superfluas.

Se plantean problemas especiales en relación con las zonas pobladas situadas a bajo nivel, cuyas vías de evacuación pueden quedar inundadas antes de que lleguen los vientos peligrosos. Todas estas zonas deben ser previamente identificadas y se debe mantener la debida coordinación con las correspondientes autoridades civiles de protección para determinar con cuántas horas de antelación es preciso difundir un aviso para evacuar a la población de dichas zonas antes que las rutas de escape queden bajo el nivel creciente de las aguas.

Los avisos, una vez difundidos, deben ser confirmados, modificados o anulados a intervalos regulares, de preferencia cada 6 horas. Así pues, incluso si un tipo de usuarios necesita un aviso con dos o tres días de anticipación para que pueda ser aplicado con eficacia, estos usuarios deberán ser siempre informados

de la validez ulterior del aviso. Así se podrán evitar muchos inconvenientes. Cuanto mayor es la anticipación de un aviso, mayor es la probabilidad de que resulte innecesario. Por lo tanto, si un aviso ha de ser modificado o anulado, es mejor hacerlo cuanto antes.

2.7 POSIBILIDAD DE MODIFICAR LOS CICLONES TROPICALES

Un ciclón tropical no tiene rival entre los fenómenos meteorológicos como agente destructor por los daños que puede causar en una amplia zona en cuestión de 12 a 48 horas. Por consiguiente, la posibilidad de reducir su devastadora potencia, incluso un poco, es objeto de numerosos estudios y debates científicos. Evidentemente, se obtendrían enormes beneficios en lo que respecta a la reducción de los posibles daños si fuese posible debilitar un ciclón tropical antes de que llegase a tierra.

Por el interés que este tema suscita, se exponene a continuación las posibilidades que existen al respecto, pero se debe insistir en que ningún estudio teórico o experimental realizado hasta la fecha ha permitido obtener la más leve indicación de que algún día resulten innecesarios los programas de prevención y protección contra los desastres. Si alguna vez fuese posible modificar un ciclón tropical reduciendo su energía total, lo que podría conseguirse sería solamente una pequeña disminución, probablemente no muy perceptible, de algunos de los más graves peligros que pueden producirse en la culminación de una situación catastrófica.

Un método que podría tenerse en cuenta para modificar un ciclón tropical sería eliminar la fuente principal de energía, es decir, el calor de la capa superior del mar cálido que se transfiere a la capa atmosférica que la cubre por evaporación de la humedad. Sin embargo, no parece factible impedir los procesos de evaporación que han de producirse. Se han expuesto numerosas ideas, pero todo el mundo reconoce que cualquier medio que se utilizase para impedir la evaporación podría ser eficaz durante corto tiempo, pero sería destruido por el viento, las olas y el mar de fondo.

Otro lugar donde se producen transformaciones de energía en un ciclón tropical es el muro anular de nubes donde el calor se libera dentro de las fuertes

corrientes de convección que existen en la circulación alrededor del ojo del ciclón. La energía calorífica de condensación liberada en esta circulación en un día equivale a la que podrían liberar 400 bombas de hidrógeno de 20 megatones cada una, lo cual constituye una inmensa generación energética. Por consiguiente, se plantea la cuestión siguiente: pueden controlarse o limitarse los procesos de condensación que existen en las corrientes de convección de un ciclón tropical, con objeto de reducir su intensidad? Se trata de hallar respuesta a esta pregunta mediante los experimentos que realizan los Estados Unidos de América desde 1960 con el nombre de Proyecto STORMFURY. Las nubes que constituyen y rodean el muro anular situado en el centro del ciclón son sometidas a un intenso proceso de siembra con núcleos de congelación, que habitualmente son cristales de ioduro de plata. El efecto deseado es ampliar el anillo que constituye el muro de nubes y, eventualmente, el círculo de vientos máximos de modo que la energía total del ciclón tropical quede distribuida sobre un mayor volumen de atmósfera, lo cual producirá en consecuencia la reducción de la fuerza de los vientos. Fundándose en los experimentos realizados hasta la fecha dentro del Programa STORMFURY, parece que los efectos de la siembra de nubes en tres huracanes que se aproximaban a los Estados Unidos de América ofrecían la posibilidad de reducir los vientos máximos en un 10 a 15 por ciento. Este resultado es muy interesante y puede dar motivo a una nueva serie de experimentos. Sin embargo, no se presentó oportunidad de repetir estos experimentos en el Atlántico desde el otoño de 1969. Las operaciones de siembra están sujetas a determinadas condiciones restrictivas establecidas por los Estados Unidos de América y, desde 1970 en adelante, no se ha encontrado ningún huracán plenamente desarrollado en el Atlántico que haya satisfecho estas condiciones.