

GEOFISICA INTERNACIONAL

REVISTA DE LA UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, AUSPICIADA POR EL INSTITUTO DE GEOFÍSICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Director: Julián Adem

Subdirector: Manuel Maldonado-Koerdell

Vol. 3

México, D. F., 1o. de Octubre de 1963

Núm. 4

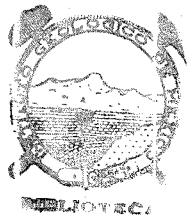
III CONFERENCIA TÉCNICA SOBRE HURACANES Y METEOROLOGÍA TROPICAL TECHNICAL CONFERENCE ON HURRICANES AND TROPICAL METEOROLOGY

México, D. F., Jun. 6-12, 1963

2A. SESIÓN

2ND. SESSION

ESTRUCTURA DE LOS HURACANES
STRUCTURE OF HURRICANES



*EL PAPEL DE LAS BANDAS DE LLUVIA
EN LOS HURACANES*

*THE ROLE OF THE RAINBANDS
IN HURRICANES*

R. CECIL GENTRY *

R. CECIL GENTRY *

Las primeras fotografías de radar tomadas de ciclones tropicales revelaron una estructura de bandas de lluvia espiraladas que pronto se consideraron como típicas de tales tormentas. Desde que el fenómeno fue descrito primeramente por Maynard (1945) y Wexler (1947) se han hecho muchos estudios. Sin embargo, en ninguno se ha dado suficiente información describiendo las variaciones de temperatura y viento dentro de la banda o mostrando el papel de las bandas en la producción de energía cinética dentro de las porciones de alta energía de los ciclones tropicales.

Desde 1956 se tienen datos sobre muchos huracanes y tormentas tropicales y sobre bandas de lluvia en dichos tormentas de aviones de reconocimiento que viene operando el Proyecto Nacional de Investigación de Huracanes. En los primeros años los aviones eran manejados por la U. S. Air Force y en los últimos tres años por el U. S. Weather Bureau. Para el presente estudio se han usado las medidas de temperatura y viento tomadas cuando los aviones cruzaban dichas bandas a lo largo de un trayecto casi normal a la banda o al volar un trayecto longitudinal de la misma. Se han tabulado y analizado datos para unas 75 bandas, midiéndose las

The first radar pictures taken of tropical cyclones revealed a spiral rainband structure that was soon identified as being typical of such storms. Since this phenomenon was first reported by Maynard (1945) and Wexler (1947) many studies of it have been made. In none, however, has much information been introduced to portray the variation of temperature and wind within the band or to show the role of the bands in the production of kinetic energy within the high energy portions of tropical cyclones.

Data have been collected since 1956 from many hurricanes and tropical storms and from the rainbands within those storms by the research aircraft operated in support of the National Hurricane Research Project. In the earlier years the aircraft were operated by the U. S. Air Force and in the last three years have been operated by the U. S. Weather Bureau. Temperature and wind measurements made while the aircraft were either crossing these bands along a track nearly normal to the band or while flying a longitudinal traverse of the band have been used in the present study. Data from about 75 of the bands have been tabulated and

* Proyecto Nacional de Investigación de Huracanes, Miami, Florida.

* National Hurricane Research Project, Miami, Florida.

temperaturas con termómetros de vórtice y los vientos por los sistemas APN-82 instalados a bordo del avión. El avión usa un navegador doppler para medir la velocidad de tierra y un computador analógico para calcular los vientos de nivel durante el vuelo. Los procedimientos de calibración eran tan adecuados para los datos que se consideraron tan exactos como los medidos por rawin-sonda.

En este informe se discutirán: (1) muestras de datos recogidos en trayectos normales y longitudinales que se volaron a través de las bandas, (2) las variaciones de viento y temperatura en las bandas y (3) la conversión de energía cinética dentro de las bandas.

En la Fig. 1 se muestran los datos de una banda exterior en un huracán intenso, Daisy, del 27 de Agosto de 1958. Esta banda estaba a unos 105 mi n al suroeste del centro de la tormenta donde la velocidad del viento era aproximadamente de 30 nudos, con datos de temperatura para 13,000 pies. El trazo de temperatura muestra notables cambios dentro de la banda (indicándose sus límites por líneas verticales discontinuas). En este caso la variación es de $2\frac{1}{2}$ C, lo que es casi tanto como la variación total de temperatura desde el borde exterior de la pared del ojo hasta el borde exterior de la fuerte circulación ciclónica para muchos huracanes.

El pico cálido a 14.8 mi y el pico cálido secundario a 16.3 mi estaban asociados a muy grandes concentraciones de agua líquida. El pico de temperatura a 22 mi queda fuera del área de gran contenido de agua líquida. La temperatura que se midió aumentaba cuando el avión salía de la banda de lluvia a un ambiente de aire relativamente seco, lo cual podría sugerir que las variaciones de temperatura registradas por el elemento sensitivo no pueden explicarse por el efecto de bulbo húmedo. Hay amplios gradientes en la componente del viento normal a la banda en su cercanía. La convergencia máxima de ese parámetro fue de 10^{-3} seg^{-1} . En muchas de las bandas que se investigaron aparecían grandes valores y amplios gradientes de divergencia en esta componente normal de un modo típico. En la banda mencionada hubo también un fuerte gradiente en la componente de viento tangencial a la banda de lluvia, variando de 17 a 36 nudos dentro de la banda.

Los datos medidos a lo largo (más bien que a través) de una banda de lluvia en el huracán Ella, del 17 de Octubre de 1962, se presentan en la Fig. 2. Dicha tormenta apenas tenía intensidad de huracán en el día del vuelo y un ojo escasamente formado. Los vientos máximos estaban alejados a más de 50 millas del centro de la tormenta y los datos se midieron a 13,000 pies aproximadamente. Deben notarse los cambios frecuentes y pronunciados en las temperaturas y vientos medidos a lo largo de la banda de lluvia. Los gradientes de temperatura alcanzaron hasta 1.8 C cada 2 mi. Las velocidades del viento fueron muy variables a lo largo de la banda. Aunque los aviones en su vuelo seguían aproximadamente una línea de corriente cuyas velocidades tal vez variaban menos que en los pasos radiales, la velocidad frecuentemente cambió a más de 10 nudos cada 5 mi y en algunos casos hasta 20 nudos cada 5 mi, conforme el avión entraba y salía de las células convectivas encajadas en la banda. Los

analyzed. The temperatures were measured by vortex thermometers and the winds by the APN-82 systems installed aboard the aircraft. The latter uses a doppler navigator to measure the ground speed and an analogue computer to compute the flight level winds. Calibration procedures were such that the data are believed to be as accurate as those that are measured by rawinsondes.

In this report the following will be discussed: (1) samples of data collected on normal and longitudinal traverses flown through the bands, (2) variation of wind and temperature in the bands, and (3) kinetic energy conversion within the bands.

Data from an outerband of an intense hurricane Daisy, of August 27, 1958, are given in Fig. 1. The band was about 105 n mi southwest of the storm center where the wind speed was approximately 30 knots, the temperature data are for 13,000 feet. The temperature trace shows marked changes of temperature within the band (boundaries of band indicated by vertical broken lines). In this case the variation is $2\frac{1}{2}$ C, which is about as much as the total variation in temperature from the outer edge of the eye wall to the outer edge of the strong cyclonic circulation for many hurricanes.

The warm peak at 14.8 mi and the secondary warm peak at 16.3 mi were both associated with very large concentrations of liquid water. The peak in temperature at 22 mi is outside the area of large liquid water content. The measured temperature increased as the aircraft departed from the rainband into the relatively dry ambient air. This would strongly suggest that the temperature variations recorded by the sensing element cannot be accounted for by the wet-bulb effect. There are large gradients in the component of the wind normal to the band in the vicinity of the band. The maximum convergence of this parameter was 10^{-3} sec^{-1} . Large values as well as large gradients of the divergence of this normal component was typical of many of the bands investigated. In this particular band there was also a strong gradient in the component of the wind tangential to the rainband; it ranges from 17 to 36 knots within the band.

Data measured along (rather than across) a rainband in hurricane Ella, October 17, 1962, are presented in Fig. 2. This storm was barely of hurricane intensity on the day of the flight and had a very poorly formed eye. The maximum winds were more than 50 miles away from the storm center. The data were measured at approximately 13,100 feet. Note the frequent and pronounced changes in the measured temperatures and winds along the rainband. Temperature gradients were as much as 1.8 C per 2 mi. The wind speeds were very variable along the band. Although the planes were flying approximately along a stream line where the speeds might have been expected to vary much less than on radial passes, the speed frequently changed more than 10 knots within 5 mi as the plane went in and out of convective cells imbedded in the band. The wind data in Fig. 2 are for the total wind speed rather than the tangential component of the wind, but there would be little difference between the

datos de viento en la Fig. 2 corresponden a su velocidad total más que a su componente tangencial, con muy poca diferencia entre ambas (menos del 10 por ciento, si la dirección del viento cae dentro de 25 grados de la tangente a la banda).

El estudio de los casos presentados en este informe, así como de otros muchos que no se reproducen, sugiere las siguientes conclusiones:

(1) Las bandas de lluvia de tormentas tropicales (es decir, con menor intensidad huracanada) llegan a tener una temperatura media más fría que la atmósfera ambiental, pero tendrán porciones mucho más cálidas. Esto es especialmente verdadero para las bandas exteriores.

(2) Las bandas de lluvia en huracanes maduros pueden alcanzar temperaturas medias más cálidas que la atmósfera ambiental, especialmente cuando la banda se localiza cerca de la pared del ojo.

(3) Los gradientes de temperatura, dirección de viento y velocidad de viento son mucho mayores dentro de las bandas de lluvia que dentro de las áreas intermedias.

two (less than 10 per cent difference when the wind direction is within 25 deg of the tangent to the band).

Study of the cases presented in this report, plus many others not reproduced here, suggests the following conclusions:

(1) Rainbands in tropical storms (i. e. less than hurricane intensity) are likely to have a mean temperature colder than that of the ambient atmosphere, but will usually have some much warmer portions. This is especially true for the outer bands.

(2) Rainbands in mature hurricanes are more likely to have mean temperatures warmer than those in the ambient atmosphere, especially when band is located near the eye wall.

(3) Gradients of temperature, wind direction, and wind speed are much greater inside rainbands than in the areas between bands.

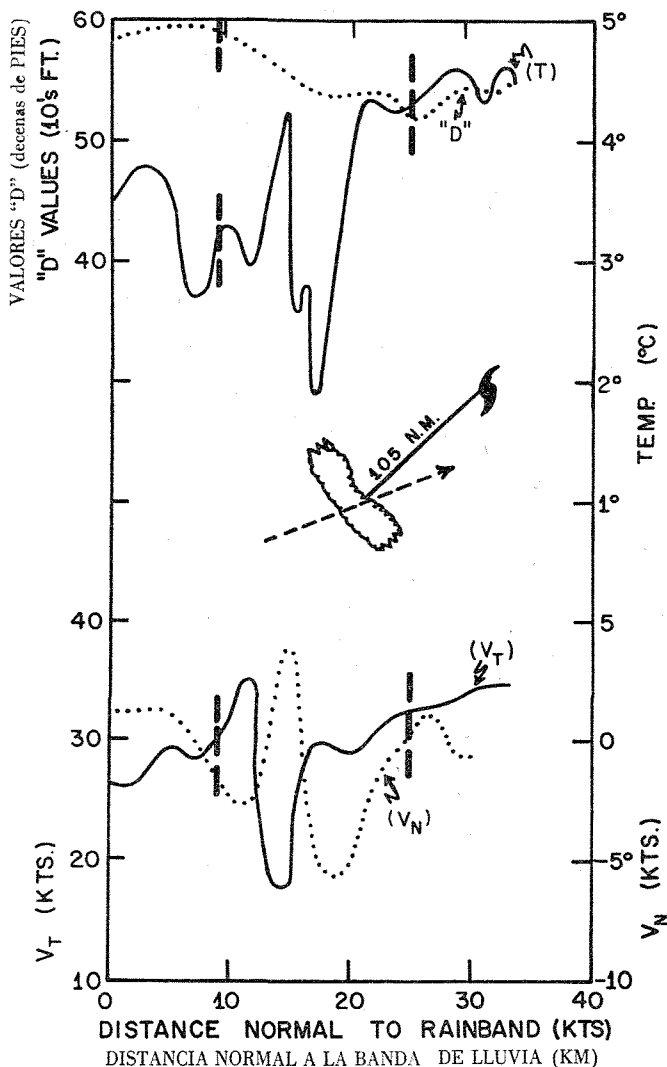


Fig. 1.

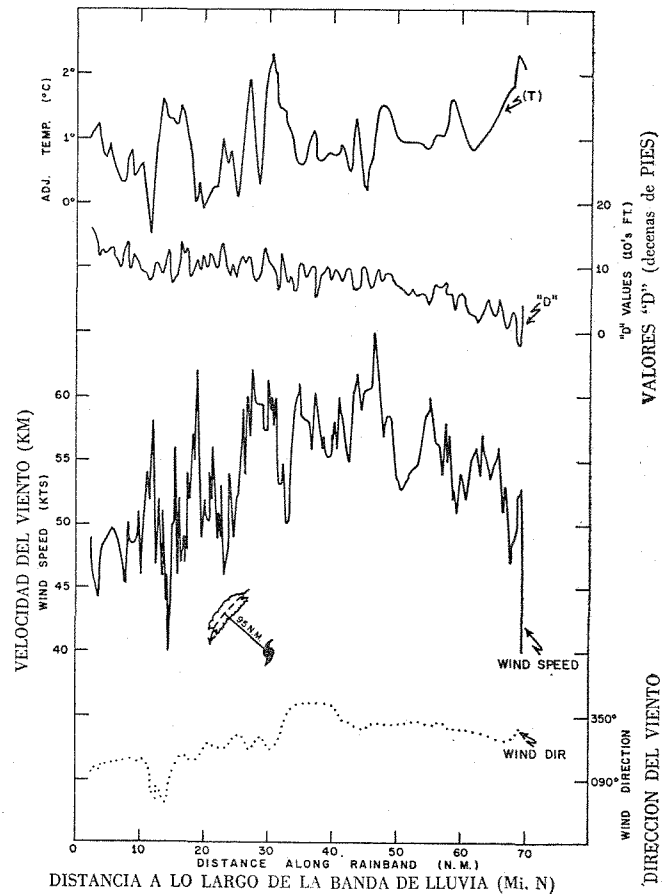


Fig. 2.

(4) No hay correlación fuerte entre la situación de la máxima (mínima) velocidad del viento y las altas o bajas presiones laterales de las bandas (excepto en la pared del ojo).

(5) Los gradientes de temperatura dentro de las bandas alcanzan 2 1/2 C por 2 mi n y frecuentemente más de 1.5 C por cada 10 mi n. La anomalía de la temperatura media en las bandas varía en razón directa de la intensidad de la tormenta y también de la altura (a lo menos hasta arriba del nivel de 16 000 pies) e inversamente del radio. Sin embargo, la última relación sólo puede notarse para bandas que se acercan a un radio de 50 mi n del centro de la tormenta. Estas conclusiones se apoyan con los datos resumidos en la Tabla I.

(6) A lo largo de las bandas los vientos varían grandemente asociados en apariencia a los ragos microescalares de la banda. Los gradientes en la velocidad del viento frecuentemente exceden a 10 nudos cada 5 mi n y a veces exceden a 20 nudos cada 5 mi n. Estos gradientes en la velocidad del viento no son tan grandes como a lo largo de los radios próximos al centro de la tormenta, pero son mucho mayores que lo indicado previamente para variaciones a lo largo de las bandas.

(7) Tienen lugar cambios de aire entre varias porciones de la misma banda y entre diversas bandas y sus ambientes inmediatos a gran rapidez tanto en las bandas exteriores como en las paredes del ojo. Así lo indican los amplios gradientes de la componente de viento normal a las bandas tanto en su interior como en el aire entre 1 y 5 mi n de cada lado de las bandas.

Puede demostrarse (Margules, 1906 y Palmén, 1959) que la energía cinética es generada cuando se correlacionan el movimiento vertical y las anomalías de temperaturas, sabiéndose desde hace mucho que la energía latente y otras formas quedan convertidas en energía cinética en las paredes del ojo de los huracanes. Los datos actuales sugieren también que se genera energía cinética en las otras bandas.

El cambio de energía cinética horizontal (Palmén, 1959) en un volumen fijo V de atmósfera limitada de la atmósfera exterior por un cilindro que se extiende de cualquier nivel del mar a la cima de la atmósfera puede expresarse:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho K dv = & -\frac{1}{g} \int_0^{P_0} \int_L K v_n dL dP - \frac{1}{g} \int_0^{P_0} \int_L \phi v_n dL dP \\ & - \frac{R}{g} \int_0^{P_0} \int_A \frac{T \omega}{P} dA dP - \int_0^\infty \int \rho \vec{v} \cdot \vec{F} dA dZ \end{aligned} \quad (1)$$

donde ρ es la densidad del aire, K la energía cinética horizontal por unidad de masa, \vec{V} el vector de viento horizontal, $\omega = \frac{dp}{dt}$, ϕ el geopotencial, v_n la componente de viento normal a la pared del cilindro, T la temperatura absoluta, R la constante de gas y \vec{F} la fuerza de fricción horizontal

(4) There is no strong correlation between location of the maximum (minimum) wind speed and the high or low pressure sides of bands (except in the eye wall).

(5) Temperature gradients within the bands are as much as 2 1/2 C per 2 n mi and are frequently greater than 1.5 C per 10 n mi. The anomaly of the mean temperature in the bands varies directly with the intensity of the storm, directly with altitude (at least to above the 16 000-foot level), and inversely with radius. The latter relationship, however, is not noticeable except for bands within about 50 n mi radius of the storm's center. These conclusions are supported by the summary data in Table I.

(6) Winds along the bands vary greatly and apparently in association with microscale features of the band. Gradients in wind speed frequently exceed 10 knots per 5 n mi and sometimes exceed 20 knots per 5 n mi. These gradients in wind speed are not as great as those along radii near the center of the storm, but are far greater than previously indicated for variations along the bands.

(7) Exchange of air between various portions of the same band and between the various bands and their immediate environments takes place very rapidly both in the outer bands and in the eye walls. This is indicated by the large gradients of the component of the wind normal to the bands both within the bands and in the air 1 to 5 n mi on either side of the bands.

It can be shown (Margules, 1906; and Palmén, 1959) that kinetic energy is generated when vertical motion and temperature anomalies are correlated. It has long been recognized that latent and other forms of energy are converted to kinetic energy in the eye walls of hurricanes, and the present data strongly suggest that kinetic energy is generated in the other bands.

The change of horizontal kinetic energy (Palmén, 1959) in a fixed volume V of the atmosphere that is bounded from the outside atmosphere by a cylinder that extends from sea level to the top of the atmosphere can be expressed:

where ρ is the density of the air, K the horizontal kinetic energy per unit mass, \vec{v} the horizontal wind vector, $\omega = \frac{dp}{dt}$, ϕ the geopotential, v_n wind component normal to cylinder wall, T absolute temperature, R gas constant, and \vec{F} the horizontal frictional force per unit mass. The area of inter-

TABLA I

TABLE I

PROMEDIO DE DESVIACIONES DE TEMPERATURAS TROPICALES MEDIAS (AGOSTO Y SEPTIEMBRE) DE BANDAS DE LLUVIA
 AVERAGE DEPARTURES FROM MEAN TROPICAL TEMPERATURES (AUGUST AND SEPTEMBER) OF RAINBANDS

Elevación del vuelo (pies)	Intensidad	Temperatura media de crucero			Temperatura máxima			Temperatura mínima		
		Mean temperature of traverse			Maximum temperature			Minimum temperature		
		Radio de banda			Band radius					
Flight elevation (ft)	Intensity	Pared del ojo	\overline{T}	$\overline{\omega}$	Pared del ojo	\overline{T}	$\overline{\omega}$	Pared del ojo	\overline{T}	$\overline{\omega}$
(1)	(2)	Eye wall (3)	(4)	(5)	Eye wall (6)	(7)	(8)	Eye wall (9)	(10)	(11)
altura height	Hurac. Hurcn.	11.2 (8)	8.8 (2)	...	11.8 (8)	9.0 (2)	...	10.5 (8)	8.5 (2)	...
\geq 30,000	Torm. Storm	....	3.4 (1)	...	....	3.5 (1)	...	....	3.4 (1)	...
7,000 < alt. h.	Hurac. Hurcn.	3.9 (9)	0.9 (20)	1.0 (3)	5.8 (9)	1.3 (20)	1.7 (3)	2.0 (9)	0.5 (20)	-0.1 (3)
< 20,000	Torm. Storm	...	0.6 (6)	0.0 (5)	...	0.8 (6)	0.7 (5)	...	0.3 (6)	-0.6 (5)
altura height	Hurac. Hurcn.	1.5 (2)	0.0 (3)	-0.6 (4)	2.8 (2)	0.3 (3)	-0.4 (4)	0.4 (2)	-0.5 (3)	-1.3 (4)
\geq 7,000	Torm. Storm	...	...	-2.9 (4)	...	...	-2.2 (4)	...	...	-3.4 (4)

Nota: Número de casos entre paréntesis.

Note: Number of cases in parentheses.

por unidad de masa. El área de intersección entre el cilindro y una superficie isobárica constante es denotada por A y la longitud de su periferia por L. Los primeros dos términos de la derecha representan corrientes de energía a través del cilindro y el último término representa la influencia de fricción disipante. El tercer término a la derecha representa la conversión a energía cinética. Integrando sobre el área y colocando una barra sobre la cantidad que representa el espacio medio, este término puede expanderse a

section between the cylinder and a constant isobaric surface is denoted by A and the length of its periphery by L. The first two terms on the right represent fluxes of energy through the cylinder, and the last term represents the dissipating influence of friction. The third term on the right represents conversion into kinetic energy. By integrating over area and letting a bar over a quantity represent a space mean this term can be expanded:

$$-\frac{R}{g} \int_0^{P_0} \int_A \frac{T_\omega}{P} dA dP = -\frac{RA}{g} \int_0^{P_0} \frac{\overline{T_\omega}}{P} dP = -\frac{RA}{g} \int_0^{P_0} \frac{\overline{T_\omega}}{P} dP - \frac{RA}{g} \int_0^{P_0} \frac{\overline{T_\omega'}}{P} dP \quad (2)$$

donde las cantidades primadas son divergentes de la media. El segundo término a la derecha expresa que se produce energía cinética cuando T' y ω' se correlacionan negativamente. Los datos recogidos durante los trayectos longitudinales expresados en la Fig. 2 convienen para determinar el

where primed quantities are departures from the mean. The second term on the right says that kinetic energy is produced when T' and ω' are negatively correlated. The data collected during the longitudinal traverses such as the data presented in Fig. 2 are suitable for determining the sign of this cor-

signo de esta correlación y para obtener una estimación de su tamaño. Los cálculos de Gray (1963) proporcionan una estimación de la desviación standard del movimiento vertical de las bandas. El coeficiente de correlación para T y ω ,

$$r_{T, \omega} = \frac{\overline{T'\omega'}}{\sqrt{\sum (T')^2} \sqrt{\sum (\omega')^2}} = \frac{\overline{T'\omega'}}{N \sigma_T \sigma_\omega} = \frac{\overline{T'\omega'}}{\sigma_T \sigma_\omega}, \text{ and}$$

$$\overline{T'\omega'} = r_{T, \omega} \sigma_T \sigma_\omega \quad (3)$$

donde σ es la desviación standard del parámetro suscrito. Estimaciones razonables para todas las cantidades del término a la derecha de la ecuación (3) pudieron obtenerse con los datos recogidos durante la investigación. Usando esta relación se calculó el valor del segundo término de la derecha de la ecuación (2) para un huracán maduro. Este término dio un valor para la generación de energía cinética dentro de radios de 60 mi n de 2.8×10^{14} kj por día, comparable con el valor de 4.1×10^{14} kj por día de Palmén y Jordan (1955), calculado para la producción total de energía cinética en el ciclón tropical medio situado dentro del radio de 120 mi n. Así, como orden de magnitud, la cantidad coincide bien con resultados obtenidos por investigadores anteriores con técnicas diferentes. El primer término de la derecha de la ecuación (2) debería llegar a cero sobre una área de suficiente radio ya que $\overline{\omega} = 0$. Sin embargo, para áreas más pequeñas donde el movimiento vertical es ascendente, este término también indicaría generación de energía cinética.

En conclusión, en la actual investigación se han obtenido datos que demuestran la gran variabilidad de temperaturas y vientos a lo largo de las bandas, pues existe rápido cambio de aire entre las células convectivas dentro de las bandas y la propia banda, así como entre las bandas y porciones ambientales de la tormenta y que las bandas se localizan donde se genera la mayor parte de la energía cinética.

relation and for getting an estimate of its size. Computations made by Gray (1963) give an estimate of the standard deviation of the vertical motion in the bands. The correlation coefficient for T and ω ,

where σ is the standard deviation of the subscripted parameter. Reasonable estimates of all quantities in the term on the right of equation (3) were available from the data collected during the investigation. Using this relationship the value of the second term on the right in equation (2) was computed for a mature hurricane. This term gave a value for the generation of kinetic energy within 60 n mi radii of 2.8×10^{14} kj per day. This compares with the value of 4.1×10^{14} kj per day that Palmén and Jordan (1955) found for total production of kinetic energy in the mean tropical cyclone inside the 120 n mi radius. Thus as order of magnitude the quantity agrees well with results obtained by a different technique by previous investigators. The first term on the right in equation (2) should go to zero over an area of sufficient radius because $\overline{\omega} = 0$. However, for smaller areas where the mean vertical motion is upward, this term would also indicate generation of kinetic energy.

In conclusion, the present investigation has developed data showing the great variability of temperatures and winds along bands; that there is rapid exchange of air between convective cells within the bands and the band, and between the bands and ambient portions of the storm; and that bands are where much of the kinetic energy of the storm is generated.

BIBLIOGRAFIA

- GRAY, W. 1963. Vertical motions in hurricanes. (Para publicarse) (To be published).
 MARGULES, M. 1906. Zur Sturmtheorie. *Meteor. Zeitschr.* 23:481-497.
 MAYNARD, R. H. 1945. Radar and Weather. *Jour. Meteor.*, 2:214-226.
 PALMÉN, E. 1959. On the maintenance of kinetic energy in the atmosphere. *The Atmosphere and the Sea in Motion*, New York (The Rockefeller Institute Press), pp. 212-224.
 PALMÉN, E. & C. L. JORDAN. 1955. Note on the Release of Kinetic Energy in Tropical Cyclones. *Tellus*, 7:186-188.
 WEXLER, H. 1947. Structure of hurricanes as determined by radar. *Ann. New York Acad. Sci.*, 48:821-844.

BIBLIOGRAPHY