

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

México, D. F., Jun. 6-12, 1963

## CONFIGURACIÓN EN GRAN ESCALA DEL FLUJO EN LOS TRÓPICOS (II) LARGE SCALE FLOW PATTERN IN THE TROPICS (II)

### UN EXPERIMENTO NUMERICO PARA COMPLETAR ANALISIS TROPICALES CON FOTOGRAFÍAS DE SATELITES

LESTER F. HUBERT \*

#### RESUMEN

Frecuentemente las fotografías de satélites revelan áreas de movimiento ascendente, asociadas con baja convergencia troposférica y áreas de circulación relacionadas con vorticidad además de indicar líneas de corrientes. Para este experimento se utilizó un programa de cálculo IBM 7090 con el fin de que en el campo de velocidad horizontal, inicialmente estimado por fotografías de nubes, se apreciara también la divergencia y configuración de vorticidad por fotografías.

El éxito de este primer caso de prueba se demostró calculando independientemente los vientos por dicho método y comparando los resultados con datos de vientos retenidos de análisis iniciales. Por ello, esa técnica puede proporcionar un método directo de interpretación de datos en fotografías que no se usa para apreciar líneas de corrientes, lográndose así información adicional de los satélites.

Continuando el trabajo con esa técnica se formará un catálogo de configuraciones de vorticidad-divergencia asociadas con casos de buenos datos, que a su vez puede usarse para analizar situaciones similares en áreas con datos escasos.

#### INTRODUCCION

Casi desde el principio de TIROS I se apreció que las configuraciones de nubes a gran escala reflejaban el campo de movimiento en que se ubican, usándose *cuantitativamente* esta característica de varios modos tanto en operaciones como en investigaciones. En este informe sobre los primeros resultados de un experimento se intenta derivar información *cuantitativa* acerca del campo horizontal de movimientos con fotografías de satélites por televisión.

Hasta ahora la relación entre movimiento horizontal y configuraciones de nubes se ha basado en el "corrimento" de nubes a gran escala en la dirección del viento, el alineamiento de calles de nubes con el viento y en algunos casos, el alineamiento de nubes según el vector vertical de deformación. En las configuraciones de nubes se contienen datos asociados a los de forma y orientación y por ello, como lo ilustra este experimento, esos elementos de información fo-

\* U. S. Weather Bureau, Washington, D. C., U.S.A.

### A NUMERICAL EXPERIMENT IN SUPPLEMENTING TROPICAL ANALYSES WITH SATELLITE PICTURES

LESTER F. HUBERT \*

#### ABSTRACT

Satellite pictures can frequently be interpreted as revealing areas of upward motion associated with low tropospheric convergence, and areas of circulation, related to vorticity, in addition to the indication of streamlines. This experiment utilizes an IBM 7090 computer program to improve upon the horizontal velocity field, initially estimated from cloud pictures by estimating also the divergence and vorticity pattern from the pictures.

The success of this first test case is demonstrated by computing the winds independently, by this method and comparing the results with wind data withheld from the initial analysis. This technique therefore may provide a direct method of interpreting picture data that is not used in the estimation of streamlines, thus extracting additional information from satellite data.

Continuing work on this technique will produce a catalogue of vorticity-divergence patterns associated with good-data cases, which can then be used to analyze similar situations in data sparse areas.

#### INTRODUCTION

Almost from the beginning of TIROS I it was apparent that large-scale cloud patterns reflected the field of motion in which they were embedded and various *qualitative* use has been made of this characteristic in both operations and research. This is a report of the early results of an experiment attempting to derive *quantitative* information relative to the horizontal field of motion from satellite television pictures.

Up to this time the relation between horizontal motion and cloud patterns has depended upon the large-scale "streaming out" of clouds along the wind direction, the alignment of cloud streets with the wind, or in some cases, the alignment of clouds along the vertical shear vector. Information is contained in the cloud patterns in addition to form and orientation however, and this experiment illustrates how these other elements of picture information can

\* U. S. Weather Bureau, Washington, D. C., U.S.A.

tográfica pueden combinarse para dar el vector de movimiento, es decir, una información *cuantitativa*.

En tan temprana etapa de la meteorología de satélites todavía hay cierta ambigüedad respecto a la altura de los campos de nubes fotografiadas. Aquí no se tratará esa cuestión, que es problema separado y discutido en técnicas de interpretación subjetiva (Conover, J. H., 1962), ni la aplicación de mediciones infra-rojas para separar nubes de varios estratos (Rao, P. K. y J. S. Winston, 1963; Sadler, J. G., 1962) ya que el método numérico que se probó comienza suponiendo que los campos de nubes usados se encuentran en una capa conocida de la atmósfera. Especialmente en regiones tropicales oceánicas en una condición frecuentemente encontrada, pues casi todas las nubosidades fotografiadas por satélites en regiones no-perturbadas están en la más baja tropósfera. También se ha progresado mucho al distinguir las configuraciones de nubes asociadas con la perturbación en las capas intermedias (Sadler, J. G., 1962).

El principio en que se apoya este experimento establece que las configuraciones de nubes son sensitivas al movimiento vertical. Además, el efecto del movimiento vertical sobre la vorticidad (ya que se asocia con divergencia) influye sobre la curvatura del flujo horizontal, lo que a su vez se refleja en las configuraciones de nubes.

Si bien las fotografías de satélites indican a veces la dirección del movimiento horizontal, su velocidad es desconocida y en consecuencia nos encontramos en la paradójica situación de que las fotografías de nubes pueden revelar información sobre las *derivadas* de una cantidad vectorial (divergencia y vorticidad) en regiones donde el propio vector se desconoce.

Este informe describe una técnica que usa las indicaciones de divergencia y vorticidad en fotografías de satélites para modificar y mejorar el análisis del campo de movimiento horizontal y servir de base para analizar mejor regiones con datos escasos.

## EL EXPERIMENTO NUMERICO

El experimento que ahora se describe de modo particular consistió en probar esa técnica sobre la costa del Golfo de México, cuando una configuración de nubes en vórtice ocupaba una región con buenos datos en esa área. El método de prueba consistió en retener la mayoría de los informes de aire superior del área de interés, aplicar los datos fotográficos para derivar un campo de movimiento horizontal y comparar resultados con informes de viento retenidos del análisis inicial. Los pasos de tal procedimiento se ilustran en el diagrama de bloque (Fig. 1). Las porciones de cálculo del experimento se hacen con una calculadora digital IBM 7090.

La Fig. 2 muestra el análisis inicial de los vientos a las 1200Z del 29 de Agosto de 1962, para la capa entre 850 a 700 mbs, que se hizo sin ayuda de datos de viento de la región cuyo centro era Texas. Los datos de viento superior fueron seleccionados y dibujados por un colega de modo que el autor no conoció antes los vientos de verificación.

be combined to yield the horizontal motion vector; i.e., *quantitative* information.

At this early stage of satellite meteorology there is still some ambiguity concerning the height of the pictured cloud fields. This work does not treat that question for it is a separate problem that has been attacked by subjective interpretation techniques (Conover, J. H., 1962) as well as the application of infrared measurements to discriminate clouds of various strata (Rao, P. K. and J. S. Winston, 1963; Sadler, J. G. 1962). Rather, the numerical method tested here commences with the assumption that the cloud fields used are in a known layer of the atmosphere. Especially in oceanic tropical regions this is a condition that is frequently satisfied because most of the cloudiness photographed by the satellite in the undisturbed regions is of the lower troposphere. Also, considerable progress has been made in distinguishing the cloud patterns associated with the disturbances of middle levels as well (Sadler, J. G., 1962).

The principle upon which this experiment is based is that cloud patterns are sensitive to vertical motions. In addition, the effect of vertical motion on vorticity (because it is associated with divergence) influences curvature of the horizontal flow which is in turn reflected in the cloud configurations.

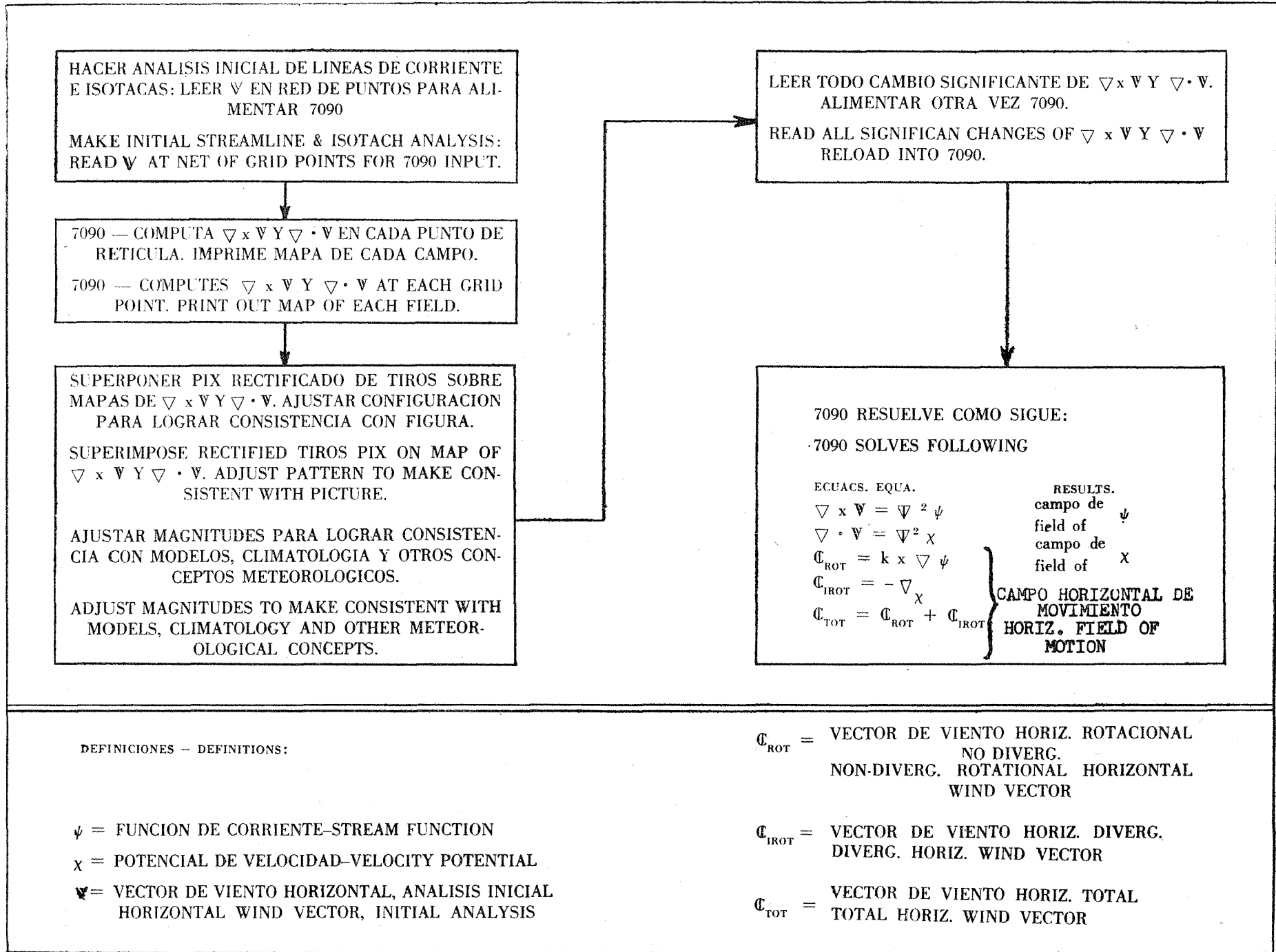
Even though satellite pictures sometimes suggest the direction of the horizontal flow, the speed is unknown. Consequently, we have the rather paradoxical situation that cloud pictures sometimes reveal information about the *derivatives* of a vector quantity (divergence and vorticity) in regions where the vector itself is not known.

This report demonstrates a technique which uses the divergence and vorticity evidence from satellite pictures to modify and improve analysis of the horizontal field of motion, thereby providing a better analysis in data sparse regions.

## THE NUMERICAL EXPERIMENT

The particular experiment described here concerns a test of this technique over the Gulf of Mexico Coast area when a vortical cloud pattern lay in a region of good data coverage. The method of testing was to withhold most of the upper air reports from the area of interest, apply the picture data to derive a horizontal field of motion, and then compare the results to the wind reports withheld from the initial analysis. The steps in this procedure are illustrated by the block diagram (Fig. 1). The computational portions of the experiment are done with an IBM 7090 digital computer.

Figure 2 shows the initial analysis of the winds for 1200Z, 29 August 1962, for the layer 850 to 700 mbs, which was made without the aid of wind data from the region centered on Texas. The upper wind data were selected and plotted by a colleague so that the author would have no advance knowledge of the verification winds.



DEFINICIONES — DEFINITIONS:

ψ = FUNCION DE CORRIENTE—STREAM FUNCTION  
 χ = POTENCIAL DE VELOCIDAD—VELOCITY POTENTIAL  
 V = VECTOR DE VIENTO HORIZONTAL, ANALISIS INICIAL  
 HORIZONTAL WIND VECTOR, INITIAL ANALYSIS

C<sub>ROT</sub> = VECTOR DE VIENTO HORIZ. ROTACIONAL  
 NO DIVERG.  
 NON-DIVERG. ROTATIONAL HORIZONTAL  
 WIND VECTOR  
 C<sub>IROT</sub> = VECTOR DE VIENTO HORIZ. DIVERG.  
 DIVERG. HORIZ. WIND VECTOR  
 C<sub>TOT</sub> = VECTOR DE VIENTO HORIZ. TOTAL  
 TOTAL HORIZ. WIND VECTOR

Fig. 1.—Diagrama de flujo por pasos en análisis.

Fig. 1.—Flow diagram of steps in analysis.

Al realizar el análisis se simuló el proceso que seguiría un experto carente de informes habituales de viento, pero con fotografías de TIROS o nefanálisis para áreas con datos escasos. El vórtice se insertó a base de la fotografía del satélite, pudiendo localizarse el centro de circulación en la fotografía al suponer un vórtice cerrado y una distribución "razonable" de velocidades de viento, como si fuera un análisis de "mejor suposición" para ajustarlo razonable y suavemente con los datos existentes.

La Fig. 3 es la fotografía de TIROS y el nefanálisis para el área reanalizada. Fue seleccionada una configuración de nubes en vórtice para este caso, pues los vientos en y alrededor del vórtice muestran amplios cambios espaciales en velocidad y dirección, por lo cual proporcionaban una configuración definida para verificarse. Dicho caso particular se escogió por ser el único que pudo encontrarse sobre una red de buenos datos en latitudes bajas.

Las características usadas para la interpretación fueron:

- (a) Las bandas de nubes fuertemente encurvadas precisamente al oeste y suroeste de la masa de nubes sólida, que reflejaban un máximo de vorticidad.
- (b) La cola fuertemente reflectiva de la masa de nubes justamente fuera de la costa de Texas, que implicaba nubes de muchas capas y probablemente Cb encajados en los puentes de nubes medio y superior.
- (c) El área aparentemente clara que rodeaba por completo a la principal masa de nubes.
- (d) La configuración de nubes dispersas cerca del centro de circulación, que implicaba no haber sido uniformemente grande el movimiento ascendente sobre la principal masa de nubes.

La Fig. 4 es el análisis inicial en el área fotografiada que muestra los datos iniciales. Las Figs. 5 y 6 son análisis de la vorticidad y divergencia calculadas en el análisis inicial, con el contorno de la masa de nubes superpuesta para comparación con dichas configuraciones. La máxima vorticidad en la Fig. 5 requirió muy poco ajuste, aunque hubo pocas razones para aceptarla como una correcta vorticidad ciclónica fuera del vórtice, especialmente en vista de la gran área sin nubes en toda la periferia.

La Fig. 6, con la configuración divergente, requirió mayores ajustes aunque sus áreas de movimientos ascendente y convergente no se combinaban con las configuraciones de nubes. La Fig. 7 muestra la configuración de vorticidad "corregida" y la Fig. 8 la configuración de duplicará más adelante. Dichos valores corregidos se perforaron en tarjetas que se usarían en el programa 7090, como se indica en el diagrama de bloque de la Fig. 1. Las ecuaciones de Poisson se resolvieron para la función de corriente y los campos de velocidad potencial, que a su vez se diferenciaron para encontrar el campo de viento total como se indicó. El resultado, un campo de viento final ( $C_{TOT}$ ) se muestra en la Fig. 9, en unión de los datos de comprobación de viento que originalmente se habían retenido.

In making this analysis the process was simulated that would be followed by an analyst who had no standard wind reports but had TIROS pictures or nephanalyses for the data sparse area. The vortex was inserted on basis of the satellite picture. The center of circulation can be located from the picture and by assuming a closed vortex and a "reasonable" distribution of wind speeds, a "best guess" analysis is made which fits reasonably and smoothly with the surrounding data.

Figure 3 is the TIROS picture and nephanalysis for the reanalysis area. A vortical cloud pattern was selected for this test because winds in and about a vortex show large spatial changes of speed and direction, providing thereby a clear-cut pattern to be verified. This particular case was chosen because it was the only one that could be found that lay over a good data network in low latitudes.

The features that were used for interpretation were:

- (a) The sharply curved cloud bands just west and southwest of the solid cloud mass, reflecting a vorticity maximum.
- (b) The highly reflective tail of the cloud mass just off the Texas coast, implying multi-layered clouds, probably Cb's embedded in middle and high cloud deck.
- (c) The apparent clear area completely surrounding the main cloud mass.
- (d) The mottled cloud pattern near the circulation center, implying the upward motion was not uniformly great over the main cloud mass.

Figure 4 is the initial analysis in the picture area showing the initial data. Figures 5 and 6 are analyses of the vorticity and divergence computed from the initial analysis with the outline of the cloud mass superimposed for comparison with these patterns. The vorticity maximum of Figure 5 requires very little adjustment but there is little reason for accepting as correct, cyclonic vorticity outside of the vortex, especially in view of the large cloudless area in all of the periphery.

Figure 6, the divergence pattern, requires greater adjustment, however, because the convergent upward motion areas are not consistent with the cloud patterns. Figure 7 shows the "corrected" vorticity pattern and Figure 8 the "corrected" divergent pattern, adjusted on consideration which are discussed below. These corrected values were then punched on cards to be used as an input for the 7090 program as indicated in the block diagram of Figure 1. The Poisson's equation were solved for stream function and velocity potential fields, and these fields in turn differentiated to retrieve the total wind field as indicated. The output, a final wind field ( $C_{TOT}$ ) is shown in Figure 9, along with the wind verification data which was originally withheld.

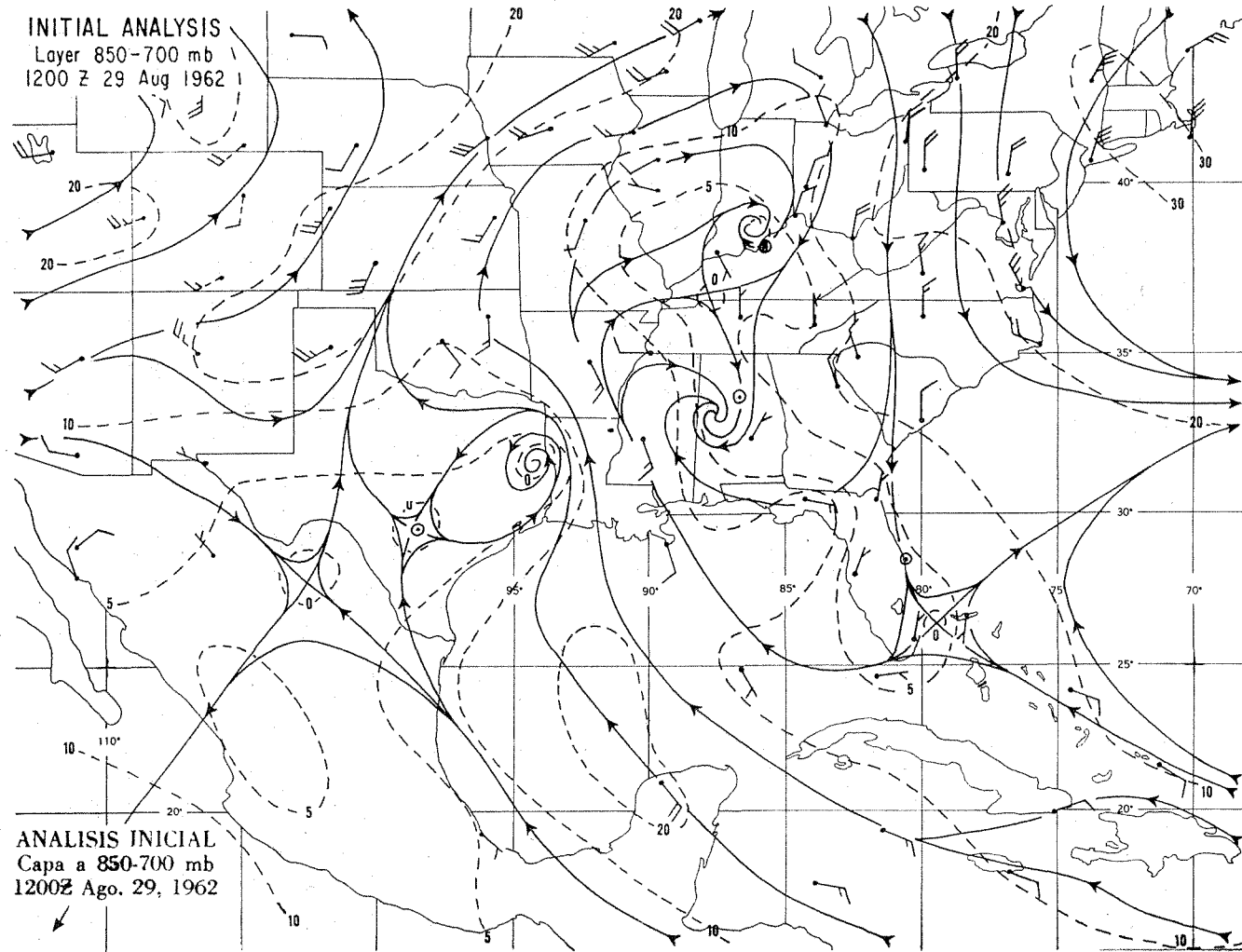


Fig. 2.—Análisis inicial de vientos en capas.

Fig. 2.—Initial Analysis of Layer Winds.

Los principales rasgos están razonablemente bien verificados, aunque también aparecieron algunas pequeñas diferencias. El más significativo que se verificó fue la falta de vientos del norte, inmediatamente al oeste del centro del vórtice, lo cual es un resultado sorprendente en vista de los grandes valores de vorticidad insertados en la configuración corregida. Igualmente, al inspeccionar los informes de comprobación faltaron vientos del norte aunque una estrecha zona con centro en  $31^{\circ}\text{N}$  y  $96^{\circ}\text{W}$  pudo haberlos contenido, pero no se tuvieron datos para verificación de vientos. Hubo informes de vientos de superficie en el área en cuestión, pero nada decían en direcciones al norte. Se concluye que el "vórtice" tuvo tal vez un corredor a pequeña escala y gran amplitud de flujo hacia el sur y que la técnica servía para derivar esa importante característica. La isotaca cercana a los vientos máximos al sur del centro del vórtice, en la costa texana del Golfo de México, también se comprobó, pero la forma del área de vientos de 20 nudos parece algo diferente que la derivada con este programa.

#### DISCUSION DE LA TECNICA

Pensando en este experimento, se le concibió para regiones con datos escasos en los trópicos, en parte porque hay vastas regiones oceánicas donde necesita aplicarse esa técnica y en parte por la naturaleza del régimen de nubes en los trópicos, que es favorable para su éxito.

Sin embargo, no hay razón para que esta técnica deje de aplicarse a cualquier latitud una vez que la fotografía de capa de nubes y el análisis se hayan determinado. Tanto el trabajo teórico como el empírico han indicado que en las altas latitudes, por lo menos, la magnitud de divergencia es bastante pequeña en comparación con la magnitud de vorticidad. Parece que algunos meteorólogos (aunque no el autor) aceptan el mismo punto de vista respecto a los sistemas tropicales. Si fuera cierto significaría que sólo la configuración de vorticidad necesita ser ajustada sin tomar en cuenta para nada la influencia de la divergencia en la componente horizontal del viento. Por esa razón, es interesante examinar el campo de viento que pudiera derivarse del experimento sin tomar en cuenta la parte divergente del viento.

La Fig. 10 muestra ese resultado. Los vientos rotacionales exhiben una vaguada en el flujo del suroeste, pero la deficiente comprobación puede notarse especialmente sobre la costa de Texas. Existen grandes errores tanto en dirección como en velocidad precisamente al sur y al suroeste de la vaguada, debiendo hacerse muchas más comparaciones del viento total y no-divergente antes de llegar a alguna conclusión aunque los resultados sugieren que no debemos aceptar a secas esa declaración de que la parte divergente del viento sea despreciada. Tal punto de vista es indudablemente válido para algunos problemas relativos a grandes áreas con mayores sistemas escalares en las altas latitudes y tal vez aún en algunos casos en las bajas latitudes. Seguramente *no* es válido para ocuparse de áreas más restringidas y en especial de áreas locales de perturbaciones en la atmós-

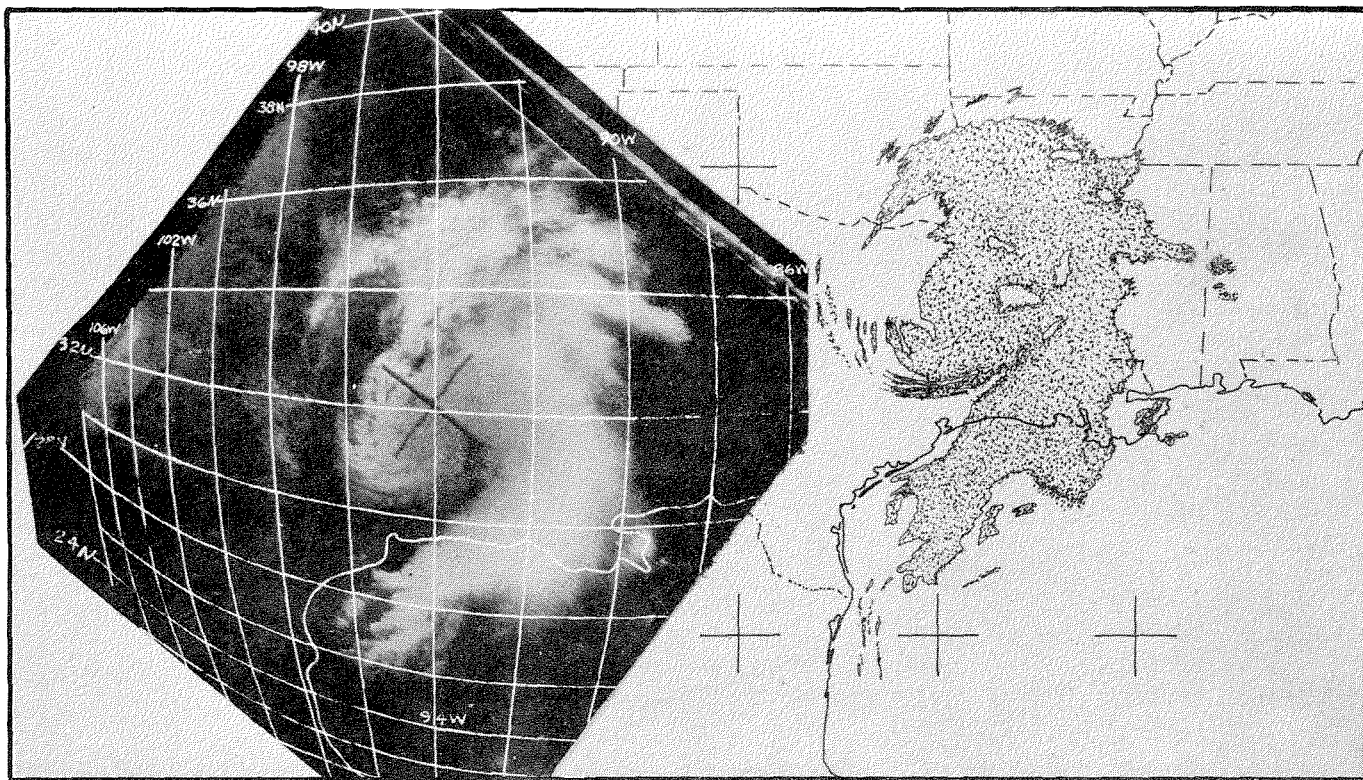
The main features are reasonably well verified although minor differences are also apparent. The significant feature which was verified was lack of north winds immediately west of the vortex center. This is a surprising result in view of the large vorticity values inserted on the corrected pattern. Inspection of the verification reports likewise shows no north wind although a narrow zone centered on  $31^{\circ}\text{N}$ ,  $96^{\circ}\text{W}$ , which might have contained these north winds, had no verification wind reports. There were surface wind reports in the questioned zone but no northerly directions were reported. The conclusion is that the "vortex" was quite likely a high amplitude, small scale trough in the southerly flow and this technique was successful in deriving that essential characteristic. The isotach about the maximum winds south of the vortex center on the Texas Gulf of Mexico coast is also verified, but the shape of the 20 knot wind area is apparently somewhat different than that derived by the program.

#### DISCUSSION OF THE TECHNIQUE

This experiment was conceived with data sparse regions of the tropics especially in mind, partly because there are vast oceanic regions where such a technique needs to be applied and partly because the nature of cloud regimes in the tropics is favorable to its success.

There is no reason why this technique cannot be applied to any latitude however, once the layer of the photographed clouds and analysis is determined. Both theoretical and empirical work has indicated that, at high latitudes at least, the magnitude of divergence is quite small compared to the magnitude of vorticity. It seems some meteorologists (although not the author) are somehow committed to this same view concerning tropical systems as well. If this were true it would suggest that only the vorticity pattern need be adjusted, neglecting entirely the influence of divergence on the horizontal component of the wind. For that reason it is interesting to examine the wind field that would have been derived in this experiment if the divergent part of the wind were neglected.

Figure 10 shows the result. The rotational winds exhibit a trough in the southwesterly flow but the poor verification is especially noticeable on the Texas coast. Large errors in both direction and speed occur just south and southwest of the trough. Many more comparisons of the total and the non-divergent wind must be made before any conclusion is justified, but the results suggest that we cannot accept the flat statement that the divergent part of the wind can be neglected. That statement is no doubt valid for some problems concerning large areas and with large scale systems in the high latitudes and perhaps even some cases in the low latitudes. It is very likely *not* valid when we are concerned with more restricted areas and especially local areas of disturbances in the tropical atmosphere. Present indications



W:T-1; Fr8: Pass 1020/1020

Fig. 3.—TIROS V 1600 TC6 Ago. 29, 1962.  
Fotografía de TIROS y nefanálisis.

Fig. 3.—TIROS V 1600 GCT Aug. 29, 1962  
TIROS picture and Nephanalysis.

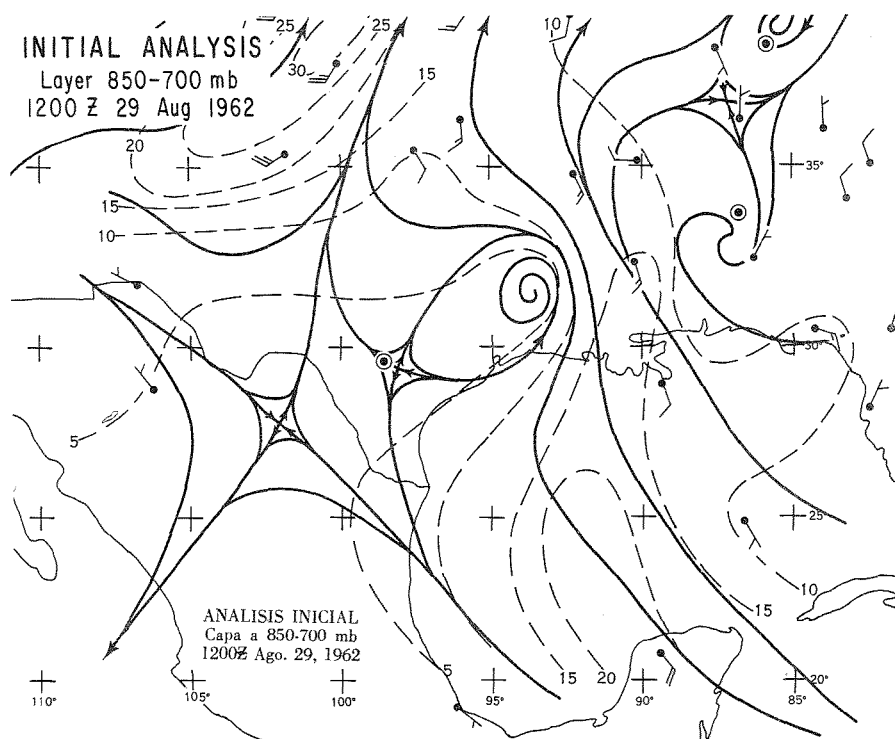


Fig. 4.—Análisis inicial en fotografías y datos iniciales de viento.

Fig. 4.—Initial Analysis in picture area and initial wind data.





fera tropical. Al presente hay indicaciones de que *debe tomarse en cuenta la divergencia* en dicho problema.

Las fotografías muestran el resultado del movimiento vertical y no la divergencia *en sí*. Por esa razón debe recurrirse a modelos sinópticos y regímenes de flujo igualmente documentados para estimar la divergencia a base de fotografías. En realidad este experimento concierne a la más baja tropósfera donde la convergencia produce movimiento ascendente. Además, la alta tropósfera dentro y alrededor de un huracán debe alejarse del centro de circulación al convergir con el flujo radial que produce el movimiento descendente que disipa el denso escudo de nubes en cirrus. Por ello es necesario determinar primero el tipo de perturbación sinóptica que se analiza y las capas atmosféricas a que se aplica el análisis.

Un paso crítico en la aplicación de esa técnica consiste en apreciar las configuraciones y magnitud de la vorticidad y de la divergencia en fotografías. El experimento que ahora se describe se basaba en estimaciones que parecían razonables a la luz de otros trabajos en la literatura y la construcción preliminar de varios casos hipotéticos.

Una investigación bibliográfica llevó a muchos estudios de configuraciones y magnitudes de divergencia y vorticidad que se encontraban en variedad de situaciones en diferentes áreas.<sup>1</sup> Sin discutirlos, podemos señalar algunos resultados generales:

- (1) La magnitud depende parcialmente de la escala del fenómeno.
- (2) Los sistemas de escala sinóptica en latitudes medias produjeron divergencia y vorticidad máximas para la baja tropósfera del orden de 1 a  $8 \times 10^{-5} \text{ seg}^{-1}$ .
- (3) Las perturbaciones a escala sub-sinóptica y a grandes mesoescalas más típicas se acercan a  $10^{-4} \text{ seg}^{-1}$ .

Dichos resultados establecen límites aproximados para las magnitudes, pero no proporcionan una base definida para apreciar casos individuales. Sin embargo, tales resultados preliminares indican que el análisis del viento horizontal puede superar al "primer cálculo" aunque las magnitudes de vorticidad y divergencia no se aprecien correctamente. Los resultados de esos primeros trabajos sugieren que los elementos esenciales de la configuración del movimiento horizontal resultan de una combinación adecuada de vorticidad y divergencia, aunque las magnitudes sólo sean aproximadas. Es decir, si las magnitudes de dichos campos se estiman correctamente dentro de un factor de 2 a 4 pueden ser encontrados los rasgos esenciales del flujo.

Así, se propone esta técnica como medio de lograr *alguna* información adicional de fotografías de los satélites y representa *cierto progreso* en el análisis que se hubiera hecho en su ausencia. No se propone en su presente forma

are that *divergence must be considered* in this problem.

Pictures show the result of vertical motion, and not divergence *per se*. For that reason appeal must be made to synoptic models and similarly documented flow regimes in order to estimate divergence from the picture evidence. This experiment, for example, is concerned with the lower troposphere where convergence produces upward motion. On the other hand, the high troposphere in and about a hurricane must flow away from the circulation center with convergence in the radial flow to produce the downward motion that dissipates the dense cirrus shield. It is therefore necessary to determine first the type of synoptic disturbance one is analyzing and the atmospheric layers to which the analysis must apply.

A critical step in the application of this technique is estimating from the pictures, the patterns and magnitude of vorticity and divergence. The experiment reported here was based on estimates that appeared reasonable in light of work found in the literature and the preliminary construction of several hypothetical cases.

A search of the literature turns up many studies of divergence and vorticity patterns and magnitudes that occur in a variety of situations in different areas.<sup>1</sup> Without discussing them, we can list some general results:

- (1) Magnitudes is partly dependent upon the scale of phenomenon.
- (2) Mid-latitude synoptic scale systems produced divergence and vorticity maxima for the low troposphere in the range 1 to  $8 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$ .
- (3) Sub-synoptic scale and large mesoscale disturbances more typically are in range near  $10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ .

These results establish approximate bounds for the magnitudes, but do not provide a definite basis for estimating individual cases. These preliminary results suggests however, that analysis of the horizontal wind might be improved over the "first guess" even though the vorticity and divergence magnitudes are not estimated correctly. Results of this early work suggests that the essential elements of the horizontal motion pattern result from a proper combination of vorticity and divergence even though the magnitudes are only approximate. That is, if magnitudes of those fields are estimated correctly within a factor of 2 or 4, the essential features of the flow may be retrieved.

Thus, this technique is proposed as a means of extracting *some* additional information from the satellite pictures and affecting *some improvement* of the analysis over what would be done in its absence. It is not proposed in its pre-

<sup>1</sup> Hasta ahora mi lista indica 21 estudios diferentes, pero no está completa en modo alguno y no se encuentran en la lista de referencias.

<sup>1</sup> To date my list shows 21 different studies, but this is certainly far from complete and they are not shown in the list of references.

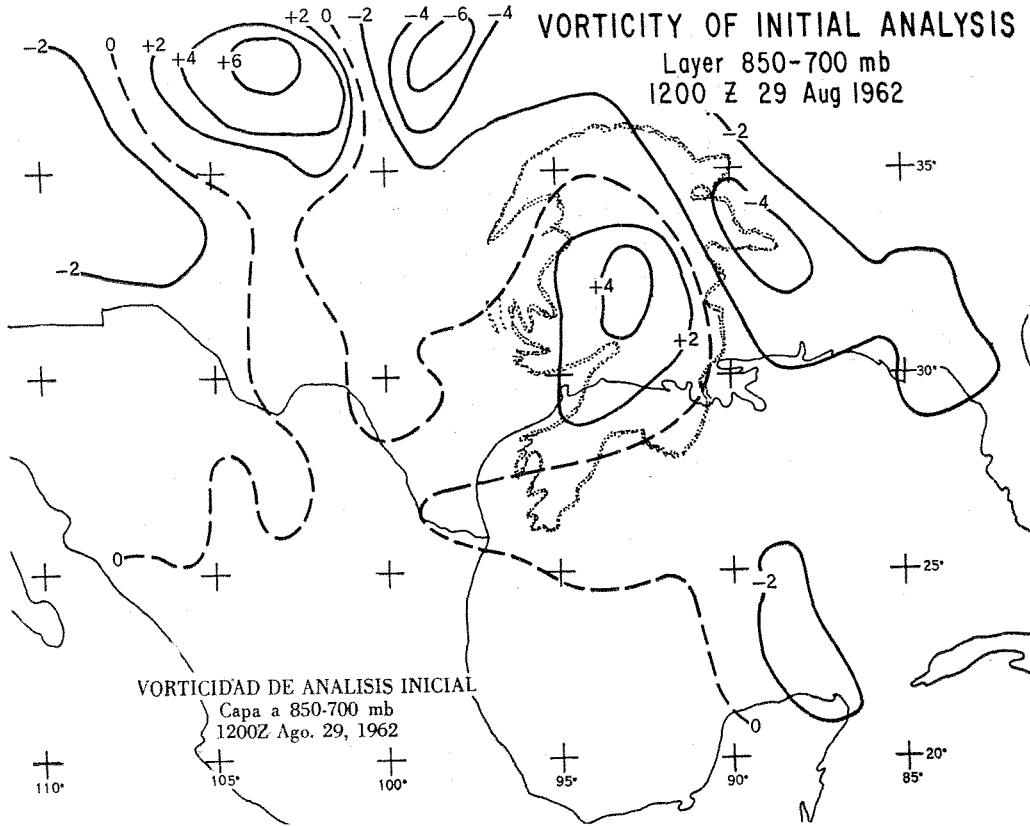


Fig. 5.—Isopletas de vorticidad relativa  $\times 10^5 \text{ seg}^{-1}$ .

Fig. 5.—Isopleths of relative vorticity  $\times 10^5 \text{ sec}^{-1}$ .

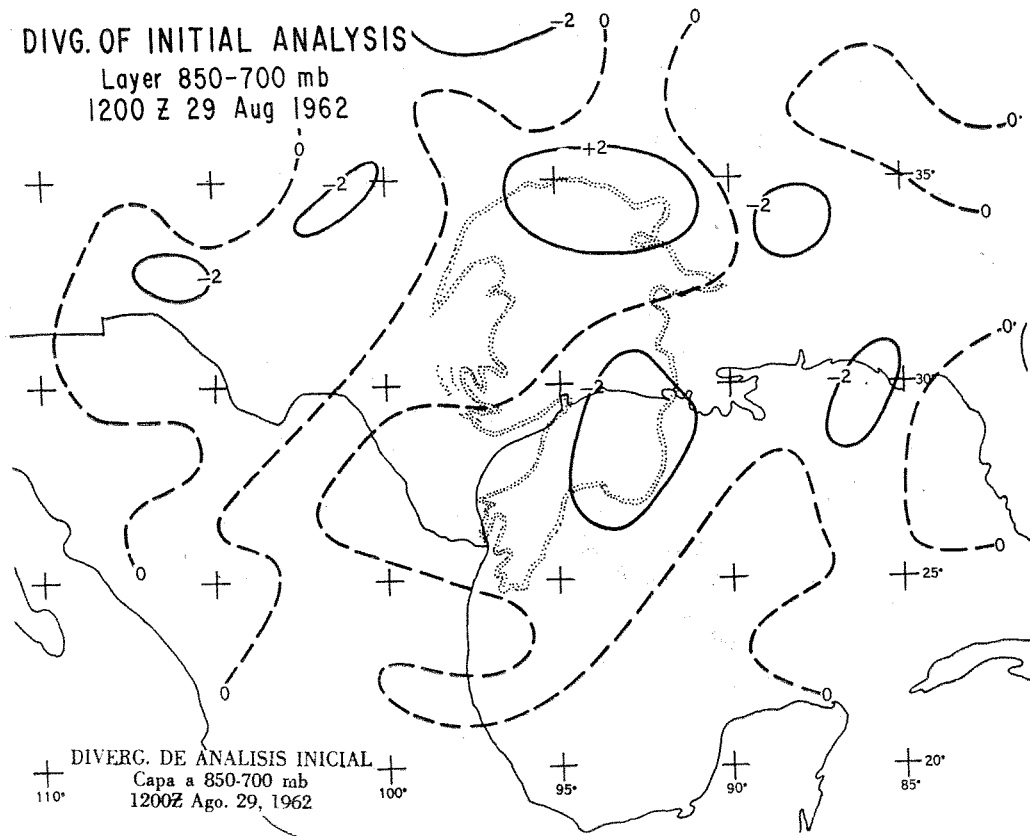


Fig. 6.—Isopletas de divergencia horizontal  $\times 10^5 \text{ seg}^{-1}$ .

Fig. 6.—Isopleths of horizontal divergence  $\times 10^5 \text{ sec}^{-1}$ .

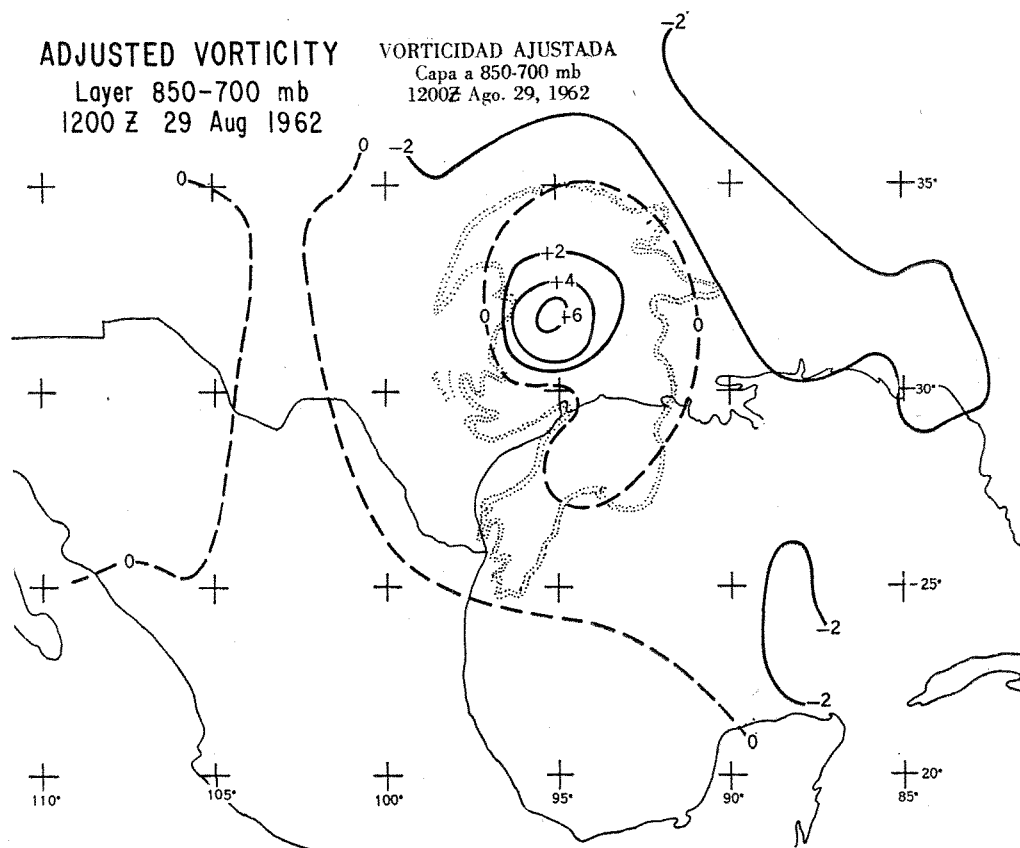


Fig. 7.—Isoplethas de vorticidad relativa ajustada para fotografías X10<sup>5</sup> seg<sup>-1</sup>.

Fig. 7.—Isopleths of picture-adjusted relative vorticity X10<sup>5</sup> sec<sup>-1</sup>.

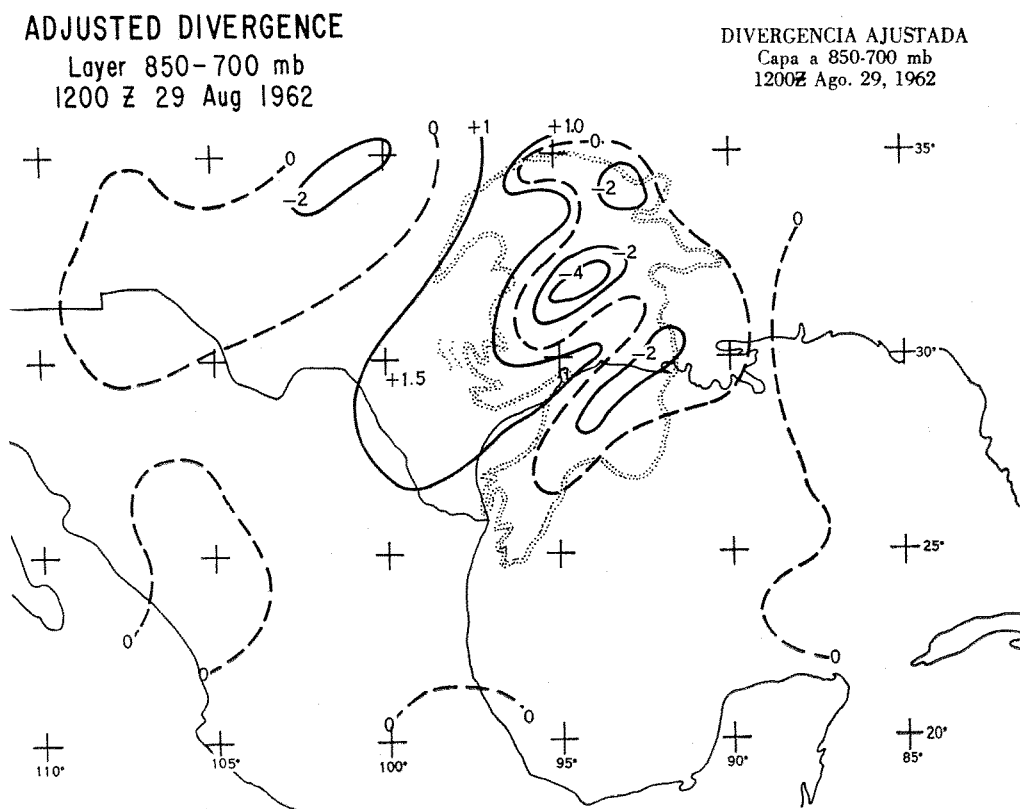


Fig. 8.—Isoplethas de divergencia horizontal ajustada para fotografías X10<sup>5</sup> seg<sup>-1</sup>.

Fig. 8.—Isopleths of picture-adjusted horizontal divergence X10<sup>5</sup> sec<sup>-1</sup>.

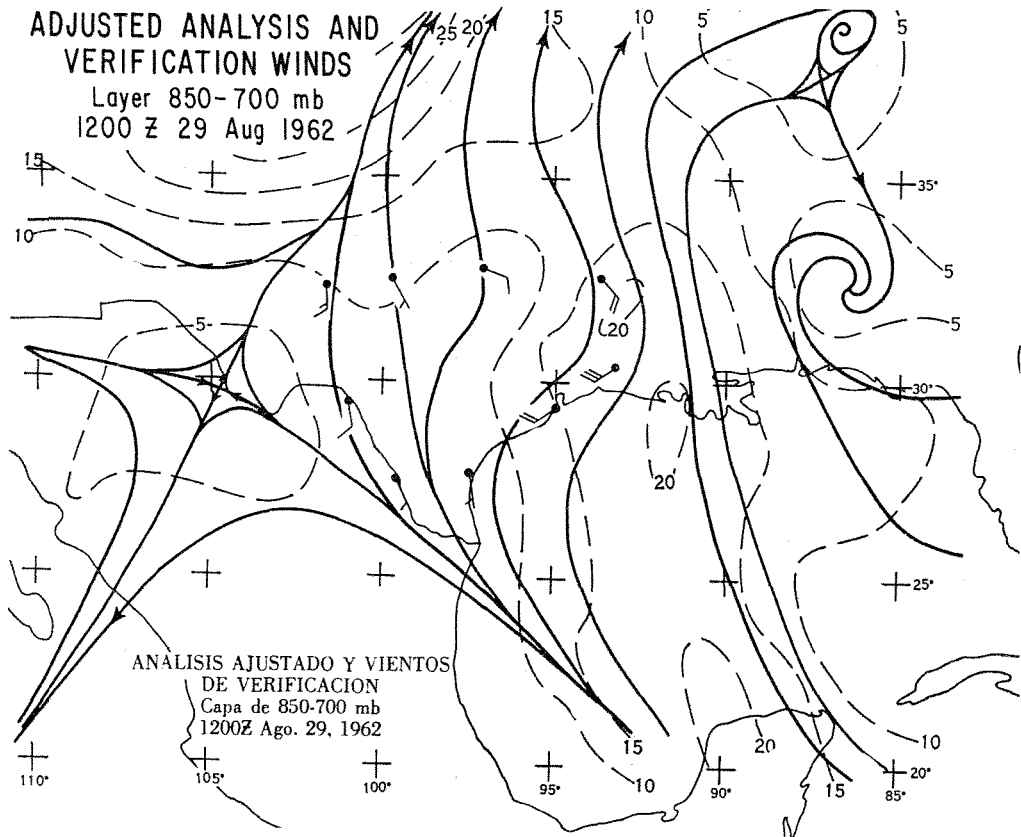


Fig. 9.—Análisis de vientos encontrados ( $C_{TOT}$ ) con vientos de verificación inicialmente retenidos.

Fig. 9.—Analysis of retrieved winds ( $C_{TOT}$ ) with verification winds initially withheld.

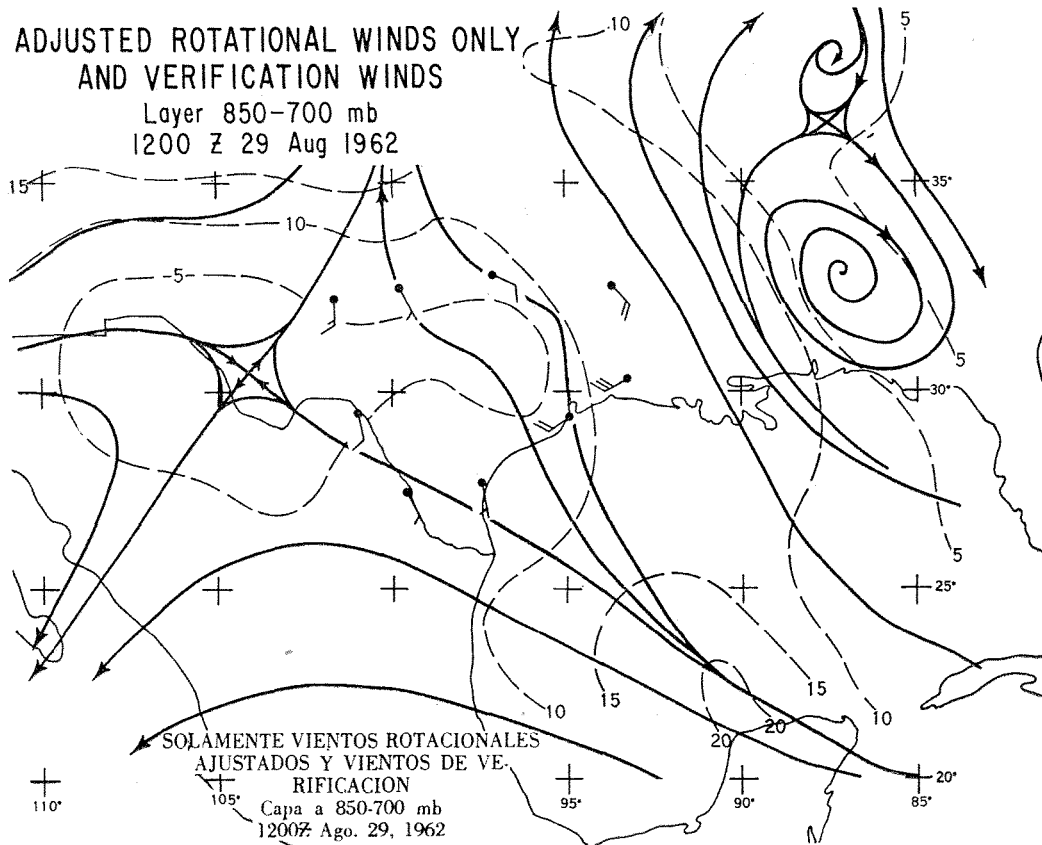


Fig. 10.—Análisis de vientos rotacionales encontrados ( $C_{ROT}$ ) solamente con vientos de verificación.

Fig. 10.—Analysis of retrieved rotational winds ( $C_{ROT}$ ) only with verification winds.

como una técnica objetiva que pueda producir un campo de movimiento definitivo y completo; más bien, puede suceder que tenga validez como técnica heurística.

#### EXTENSION DEL EXPERIMENTO

Para dar una base más amplia de estimación a las configuraciones de vorticidad y movimiento vertical actualmente se desarrollan trabajos en dos sentidos; uno es el cuidadoso análisis de sistemas en áreas con buenos datos para derivar sus configuraciones de vorticidad y divergencia y magnitudes. Estas características se reunirán y catalogarán con estudios similares en la literatura para proporcionar una buena muestra estadística de configuraciones típicas, lo cual es una parte esencial del trabajo ya que el meteorólogo no está acostumbrado a analizar directamente dichos campos y en consecuencia, no tiene experiencia para apreciar las estimaciones en tales problemas.

La segunda dirección consiste en el uso del programa 7090 descrito para derivar configuraciones de vorticidad y divergencia hipotéticas (pero sinópticamente razonables).

En el procedimiento para hacerlo se tratará de fijar las condiciones de frontera sinópticamente razonables en alguna área restringida que pudiese contener una perturbación típica, por ejemplo, una perturbación de onda o vórtice en la zona de convergencia intertropical o la tropósfera superior sobre un huracán.

El trabajo de C. E. Palmer y su grupo en el Pacífico tropical ha definido la convergencia climatológica media regional y para presentar un caso hipotético se establecerán las condiciones de frontera que produzcan tal convergencia media. Después, dentro de la región rodeada por dicha frontera, se impondrán varias configuraciones y magnitudes de divergencia y vorticidad y el programa usado para producir la configuración de flujo horizontal. Entonces los resultados se examinarán por comparación con situaciones reales típicas. Las configuraciones raras y nunca observadas que resultan de ciertas combinaciones indican que la atmósfera generalmente no adopta la configuración divergencia-convergencia y vorticidad que se había impuesto para ese caso hipotético y por ello esa combinación podría evitarse estimando cualesquier casos reales. Tales casos no-típicos deben examinarse también en busca de inconsistencias dinámicas.

La suposición implícita al relacionar configuraciones de nubes al movimiento vertical en perturbaciones que se desplazan es que las configuraciones de dicho movimiento y la perturbación se mueven unidas de modo que por algunas horas los movimientos verticales y el centro de perturbación mantiene las mismas posiciones relativas. Las fotografías y otras pruebas empíricas indican que tal suposición es buena en muchos casos (Malkus, J. S. *et al.*, 1961; Ramage, C. S., 1961). Bajo tales condiciones existen ciertas restricciones para relacionar la vorticidad y la divergencia, pues de acuerdo con el teorema de vorticidad ciertas combinaciones implican desarrollo extremadamente rápido o disipación. Si el sistema se mueve sólo con lentos cambios de intensidad, el mecanismo descrito por la ecuación de vorticidad no debe

sent form as an objective technique that will produce a complete definitive field of motion; it may turn out to be more valuable as an heuristic technique.

#### EXTENSION OF THE EXPERIMENT

In order to develop a broader base for estimating vertical motion and vorticity patterns, current work is proceeding along two lines. One is the careful analysis of systems in good data areas in order to derive their vorticity and divergence patterns and magnitudes. These will be assembled and cataloged with similar studies from the literature to provide a good statistical sample of typical patterns. This is an essential part of the work because the meteorologist is not accustomed to analyzing these fields directly and therefore has developed no background against which to judge estimates of these fields.

The second line is the use of the 7090 program described here to derive horizontal flow patterns from hypothetical (but synoptically reasonable) divergence and vorticity patterns.

The procedure for doing this is to establish the boundary conditions that are synoptically reasonable in some restricted area which could contain a typical disturbance; for example, a wave or vortex disturbance on the intertropical convergence zone, or the upper troposphere over a hurricane.

The work of C. E. Palmer and his group in the tropical Pacific has established the average climatological convergence in the region. To construct a hypothetical case, the boundary conditions are set up to produce such an average convergence. Then within the region surrounded by this boundary, various patterns and magnitudes of divergence and vorticity are imposed and the program used to produce the horizontal flow pattern. The results are then examined by comparing them with typical actual situations. Unusual and never-observed patterns that result from certain combinations are indications that the atmosphere usually does not arrange itself into the divergence-convergence and vorticity pattern that have been imposed for this hypothetical case therefore this combination would be avoided in estimating any real cases. Such non-typical cases must also be examined for dynamical inconsistency.

The implicit assumption in relating cloud patterns to vertical motion in moving disturbances is that the vertical motion patterns and the disturbances moves along together so that for many hours the vertical motions and the disturbance moves along together so that for many hours the vertical motions and the disturbance center maintain the same relative positions. Pictures and other empirical evidence indicate this is a good assumption in many cases (Malkus, J. E. *et al* 1961; Ramage, C. S., 1961). Under these conditions there are certain restraints which must be put on the relationship between vorticity and divergence because, according to the vorticity theorem, certain combinations imply extremely fast development or dissipation. If the system is moving with only slow changes of intensity

ser violado imponiendo configuraciones de divergencia y vorticidad inconsistentes. Algunas configuraciones típicas seguramente contendrán tales inconsistencias dinámicas.

### DISCUSION DE LA TEORIA

Para terminar la descripción de este experimento parece adecuado dejar los aspectos meteorológicos y señalar algunas cuestiones teóricas y matemáticas relacionadas.

Primero, el fluido puede ser tratado con un flujo bi-dimensional usando una sola capa media, como se hizo en ese experimento. Al contrario, podría aplicarse el análisis en un nivel individual en la atmósfera según conceptos meteorológicos habituales destinados a relacionar el movimiento con la atmósfera real a ese nivel. De cualquier modo la consecuencia de esta simplificación permitiría el uso de conceptos simples bi-dimensionales.

La aplicación meteorológica también se apoya en la capa que se discute, limitada arriba o abajo por una superficie material de modo que la divergencia indicase por completo el signo del movimiento vertical. Esta restricción siempre quedará satisfecha cuando la capa considerada se apoye en la superficie de la Tierra y aparentemente siempre será satisfecha si la capa está en la atmósfera libre, limitada arriba por lo tropopausa u otra superficie de fuerte estabilidad. Desde luego, ambas condiciones tienen relaciones opuestas entre el movimiento vertical y la convergencia.

El principio matemático básico de apoyo es que en un fluido bidimensional, el campo de velocidad horizontal sólo queda especificado por completo por los campos de divergencia, vorticidad y condiciones de frontera. Si el análisis se aplicara al cascarón esférico del fluido, las condiciones de frontera no se incluirían aunque en la aplicación actual se haya aclarado que debe considerarse una pequeña área limitada.

Pueden emplearse dos métodos para evitar contaminación por condiciones de frontera erróneas. Uno consiste en establecer algún valor constante arbitrario para la frontera y colocar el área de interés a tan gran distancia que los errores causados por una fijación artificial de la frontera no se propaguen al área crítica. Un segundo método servirá para localizar las fronteras en regiones donde los datos sean razonablemente buenos para que sus condiciones correctas sean conocidas y después, mediante las adecuadas matemáticas, mantener esa condición de frontera correcta a través de toda la manipulación matemática en el área interna.

Este último método fue usado en el experimento, pero abarca procedimientos de cálculo que son mucho más complicados que una simple frontera fija. La computación programada para el 7090 consistía en descomponer el viento en las fronteras en sus componentes no-divergente y divergente. La condición de frontera impuesta en la solución para función de corriente permitía mantener la porción no-divergente de ese viento de frontera en tanto que las condiciones de frontera impuestas sobre la solución potencial

the mechanism described by the vorticity equation must not be violated by imposing inconsistent patterns of divergence and vorticity. Some of the typical patterns will no doubt be shown to contain such dynamic inconsistency.

### DISCUSSION OF THE THEORY

To conclude the description of this experiment it is appropriate to leave the meteorological aspects and outline some of the theoretical and mathematical matters that are involved.

First, the fluid can be treated as two-dimensional flow by use of a single mean layer, as was done in this experiment. Alternately, the analysis might be applied to an individual level in the atmosphere with standard meteorological concepts applied in order to relate motion in this individual level to the real atmosphere. In any event the consequence of this simplification is to permit use of simple two-dimensional concepts.

The meteorological application also depends upon the layer under discussion being bounded either above or below by a material surface so that divergence completely specifies the sign of the vertical motion. This restriction is always satisfied if the layer being considered is based at the Earth's surface and apparently is usually satisfied if the layer is in the free atmosphere and bounded above by the tropopause or other strong stability surface. These two conditions, of course, have reverse relationship between vertical motion and convergence.

The basic principle of mathematics invoked is that in a two-dimensional fluid the horizontal velocity field is completely and uniquely specified by the fields of divergence, vorticity and the boundary conditions. Were the analysis applied to a spherical shell of fluid, the boundary conditions would not be involved but in the application here it is clear that a small bounded area must be considered.

Two methods of avoiding contamination by erroneous boundary conditions are available. One is to set the boundary at some arbitrary constant value and to place the area of interest at such a great distance from the boundary that the errors caused by the artificially fixed boundary are not propagated into a critical area. A second method is to locate the boundaries in regions where the data area reasonably good so that correct boundary conditions are known, then with the appropriate mathematics, maintain this correct boundary condition throughout the mathematical manipulation of the internal area.

The latter method is the one actually used here but it involves computational procedures which are much more complicated than a simple fixed boundary. The computation programmed for the 7090 was to decompose the wind on the boundaries into a non-divergent and divergent component. The boundary condition imposed on the solution for the stream function was made to maintain the non-divergent portion of this boundary wind; while the boundary conditions imposed upon the velocity potential solution

de velocidad impedía mantener la parte divergente de ese flujo a través de la frontera, punto por punto.

Ya que la parte divergente del viento está representada por el gradiente negativo del potencial de velocidad, era necesario establecer dicho gradiente, normal a la frontera, en cada punto de su red que produjese el viento divergente de frontera y mantuviese aquel gradiente (normal a la frontera) en la solución de la ecuación de Poisson. A su vez, eso implica la aplicación del teorema de divergencia, cuya consecuencia es que la suma de valores divergentes del campo interno debe equilibrarse frente a las condiciones de frontera de tal modo que la ecuación de divergencia no sea violada. Todo se cumple por un ajuste menor del conjunto de valores de divergencia "corregido" que alimentan el cálculo de la ecuación de Poisson antes de seguir con el proceso de relajamiento.

### CONCLUSIONES

En conclusión, el experimento descrito ahora y el programa desarrollado se propone como un tratamiento útil y un instrumento de investigación valioso por las siguientes razones:

Primera y más importante, es una técnica para ampliar la interpretación de fotografías desde estimaciones de líneas de corriente hasta una interpretación de esas líneas y de isotacas de modo consistente, tanto interna como externamente (con modelos conocidos). Eso se logra en dos etapas. Interpretando la orientación de una calle y de hileras de nubes se llega a direcciones de flujo y a un modelo sinóptico dado para el analista, que le permiten estimar cierta configuración de corrientes e isotacas. La aplicación de la Parte I de este programa demuestra entonces las divergencias y vorticidades derivadas que deben ser consistentes con rasgos de la fotografía *que no se podían tomar en cuenta en su interpretación inicial*. Si el análisis inicial es inconsistente, puede alterarse *manejanado directamente* la fotografía y los rasgos del análisis que tengan ese carácter, v. gr., falta de nubes y áreas cargadas contra configuraciones de divergencia-convergencia.

El resultado final contiene toda la información que se requería en la estimación inicial de líneas de corriente en las fotografías; interpretaciones fotográficas adicionales relativas a movimiento vertical y circulación; consistencia entre dirección y velocidad y consistencia con conceptos "meteorológicamente razonables" y modelos sinópticos conocidos.

Segunda, este método promete información adicional acerca del campo de movimiento en regiones con escasos datos en los trópicos, que a su vez harán avanzar la investigación de modelos sinópticos tropicales. Debe reconocerse que algunas fotografías de satélites no proporcionan evidencia de vorticidad y/o divergencia, por lo cual esta técnica no se propone

was restrained to maintain the divergent part of this flow across the boundary, point by point.

Since the divergent part of the wind is represented by the negative gradient of velocity potential it was necessary to establish the gradient, normal to the boundary, at each boundary grid point that would produce this divergent boundary wind and maintain that gradient (normal to the boundary) in the solution of the Poisson's equation. This in turn implies application of the divergence theorem. The consequence is that the sum of the internal field divergence values must be balanced against the boundary conditions in such a way that the divergence equation is not violated. This is accomplished by a minor adjustment of all "corrected" divergence values that provide input for the Poisson's equation computation before proceeding with the relaxation process.

### CONCLUSION

In conclusion, the experiment described here and the program developed is proposed as a useful approach and a valuable research tool for the following reasons:

First and most important, it is a technique of extending the interpretation of pictures for streamline estimates to an interpretation of streamlines *and* isotachs which is consistent, both internally and externally (with known models). This is achieved in two steps. Interpretation of cloud street orientation and streaks suggests flow directions and a given synoptic model to the analyst, leading to his estimation of a certain pattern of streamlines and isotachs. Application of Part I of this program then displays the derived divergence and vorticity which must be consistent with features of the picture *he could not take into account in his initial interpretation*. Where the initial analysis is inconsistent, it is altered by *dealing directly* with the picture and analysis features that are inconsistent, e.g., cloudless and overcast areas versus divergence-convergence patterns.

The end result contains all of the information he obtained from the initial estimation of streamlines from the picture, additional picture interpretation relative to vertical motion and circulation, and consistency between direction and speed and consistency with "meteorologically reasonable" concepts and known synoptic models.

Second, this approach promises to yield additional information about the field of motion in data sparse regions of the tropics, which in turn will advance research of tropical synoptic models. It must be recognized that some satellite pictures do not provide evidence of vorticity and/or divergence, so this technique is not proposed for all pictures at all times. It

para todas las fotografías en todo tiempo. Sólo debe usarse cuando se juzgue aplicable.

Tercera, cuando se usen datos fotográficos sólo de modo cualitativo en ayuda del análisis la aplicación de este programa revelará si dicho análisis es razonable. Por ejemplo, grandes regiones de convergencia pueden haber sido comprendidas en un análisis de modo inadecuado en regiones no cubiertas por nubes.

Cuarta, el programa de computadora es útil para examinar los análisis (haya o no cobertura por satélite) para determinar si las inconsistencias dinámicas quedaron comprendidas en la estructura de un modelo dado.

También puede usarse el programa como un instrumento de análisis aplicándolo al campo de función de corriente resultante, ya que dicho campo es exactamente análogo al campo de presión de altura analizado con datos standard, siendo el programa un medio conveniente para convertir una isotaca de línea de corriente en un análisis de altura de presión simulada. El procedimiento será útil, por ejemplo, donde el análisis de líneas de corriente necesite compararse con el análisis de datos de radio-sonda.

must be used only where judged applicable.

Third, where picture data are used only in a qualitative fashion to aid in the analysis, application of this program will reveal whether or not the analysis is reasonable. For example, large regions of convergence might have been inadvertently implied by an analysis, in regions that are not covered with clouds.

Fourth, the computer program is a useful tool with which to examine analyses (whether or not there is satellite coverage) to determine if dynamic inconsistencies are implied by a given model structure.

A further use of the program as an analysis tool is application of the resulting stream function field. Because the stream function field is exactly analogous to the pressure height field analyzed from standard data, the program is a convenient means of converting a streamline-isotach to a simulated pressure height analysis. Such a procedure would be useful, for example, where streamline analysis need be compared with the analysis of radiosonde data.

#### BIBLIOGRAFIA

- CONOVER, J. H. 1962. Cloud Interpretation from Satellite Altitudes Geophysics Research Directorate, Research Note 81 (July), AFCRL-62-680, 77 pp.
- RAO, P. K. & J. S. WINSTON. 1963. An Investigation of Some Synoptic Capabilities of Atmospheric "Window" Measurements from Satellite TIROS II. *Jour. Applied Meteor.*, 2:12-23.
- SADLER, J. C. 1962. Utilization of Meteorological Satellite Cloud Data in Tropical Meteorology. Geophysics. Research Directorate. Research Note 83 (August), AFCRL-62-829, 40 pp.
- MALKUS, J. S., C. RONNE & M. CHAFFEE. 1961. Cloud Patterns in Hurricane Daisy, 1958. *Tellus* 13(1):8-30.
- RAMAGE, C. S. 1961. The Subtropical Cyclone. Scientific Report No. 1. Contract AF19(604)-6156, Hawaii Institute of Geophysics Report No. 15. University of Hawaii (April).

#### BIBLIOGRAPHY