

ANÁLISIS DE SECCIONES VERTICALES EN LA ATMÓSFERA

RAFAEL ALMAZÁN FLORES*

RESUMEN

El análisis de secciones verticales en la atmósfera constituye una herramienta complementaria, pero importante, de las técnicas de análisis meteorológico convencional. Aquí se describe un método de análisis de secciones verticales donde, a partir de los datos básicos de radiosondeo, se definen finalmente los campos verticales de temperatura, humedad y movimiento del aire en relación al plano considerado. El empleo operacional de esta metodología incrementa la consistencia tridimensional del análisis meteorológico convencional y suministra información adicional sobre las características dinámicas y termodinámicas prevaecientes en la atmósfera.

ABSTRACT

Atmospheric cross section analysis is an auxiliar, but important, tool of the conventional meteorological analysis. Here is described a cross section analysis method that, from the basic radiosonde data, finally gives a description of the vertical fields of temperature, humidity and air motion, relative to the surface considered. The operational use of this kind of method improves the conventional meteorological techniques vertical consistence, and provides additional information about the prevailing dynamic and thermodynamic characteristics of the atmosphere.

1. INTRODUCCIÓN

En la Subdirección de Previsión Atmosférica, responsable de la elaboración de pronósticos de precipitación significativa para el control de avenidas en los ríos y prevención de las inundaciones, ha sido motivo de constante preocupación procurar que los análisis atmosféricos guarden la debida consistencia tridimensional. Con ello se logra un mejor entendimiento del

* Meteorólogo, Jefe del Departamento de Investigación Tecnológica de la Subdirección de Previsión Atmosférica de la DGCRISH, SARH.

estado actual de la atmósfera y, por lo tanto, se adquiere la posibilidad de efectuar pronósticos más precisos y exactos. Asimismo, conscientes de que la generación de elementos precipitables dentro de las nubes depende, fundamentalmente, de la existencia en el aire de suficiente humedad para formar las gotitas de agua y de que existan corrientes ascendentes que favorezcan el crecimiento de los elementos de precipitación, se consideró de suma utilidad el disponer de una herramienta de análisis que, complementando los métodos de análisis básicos, permita obtener la necesaria coherencia tridimensional y definir los campos de humedad y movimiento vertical del aire.


2. OBJETIVOS

- a) Desarrollar métodos de análisis de secciones verticales operacionalmente útiles en el análisis y pronóstico atmosférico, procurando que dichos métodos sean objetivos, sistemáticos y practicables.
- b) Facilitar la consecución de la necesaria coherencia vertical en el análisis tridimensional de la atmósfera, mediante técnicas que permitan identificar la estructura vertical de los sistemas atmosféricos.
- c) Aportar nueva información acerca de conceptos meteorológicos difícilmente asequibles a partir del análisis en planos horizontales, como estabilidad y movimiento vertical.

3. DISEÑO DE LOS DIAGRAMAS BASE

Desde el punto de vista de control de avenidas y prevención de inundaciones, interesa un más estricto conocimiento de la atmósfera durante la temporada lluviosa, de junio a septiembre, cuando la circulación general de la atmósfera, sobre nuestra región, es dominante del Este. Por esta razón se decidió orientar las secciones verticales a lo largo de paralelos de latitud, prolongándolos sensiblemente hacia el Este de nuestro país. (Fig. 1.)

Se diseñaron dos diagramas base, cada diagrama está constituido por un plano de coordenadas rectangulares en el cual el eje de las abscisas corresponde a la distancia horizontal medida a lo largo de un paralelo de latitud y las ordenadas corresponden a la vertical del lugar. La escala

 SARH	SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA	SUBDIRECCION DE PREVISION ATMOSFERICA	SECCION VERTICAL PARALELO 20	CONCEPTO.	FECHA	ASENTAMIENTO
	DIRECCION GENERAL DE CONTROL DE RIOS E INGENIERIA DE SEGURIDAD HIDRÁULICA				HORA	ANALISIS

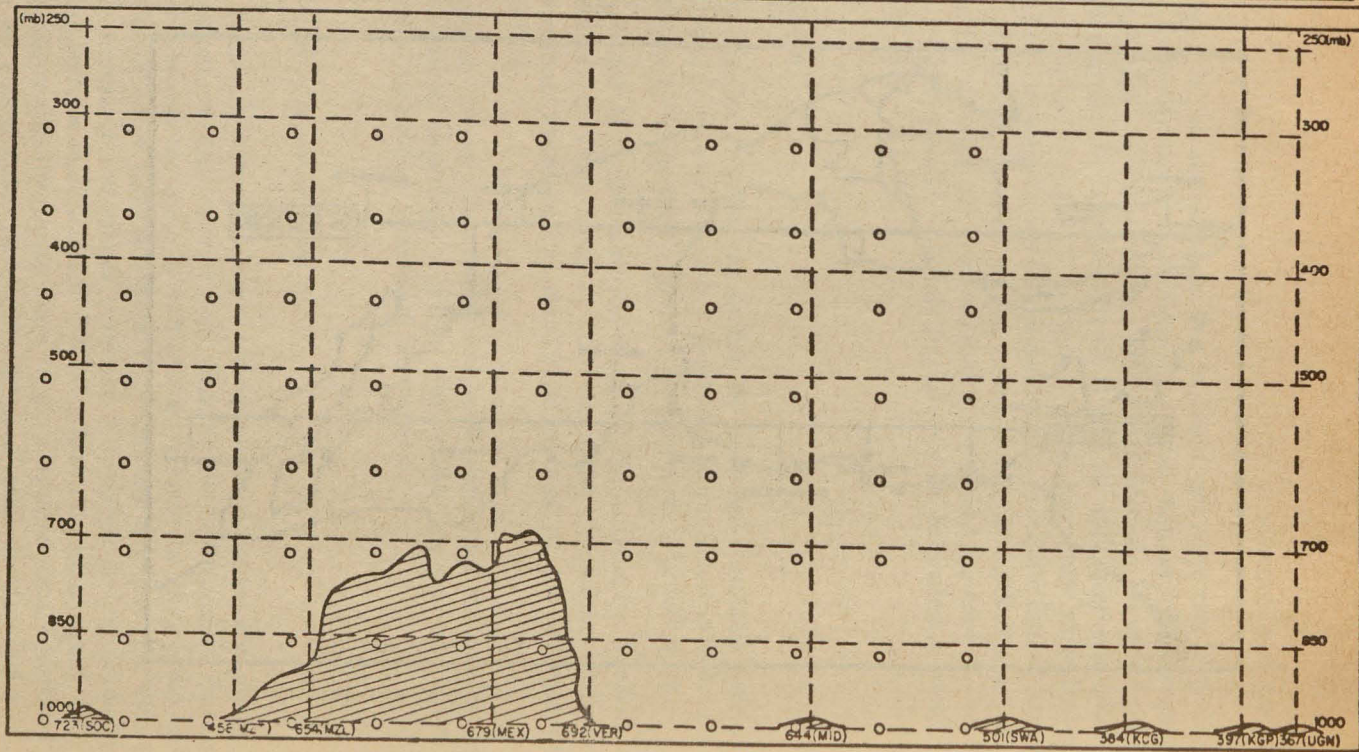


Fig. 2. Diagrama base paralelo 20.

	SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA	SUBDIRECCIÓN DE PREVISIÓN ATMOSFÉRICA	SECCIÓN VERTICAL PARALELO 28	CONCEPTO.	FECHA	ASENTAMIENTO
	DIRECCIÓN GENERAL DE CONTROL DE RÍOS E INGENIERÍA DE SEGURIDAD HIDRÁULICA			HORA	ANÁLISIS	

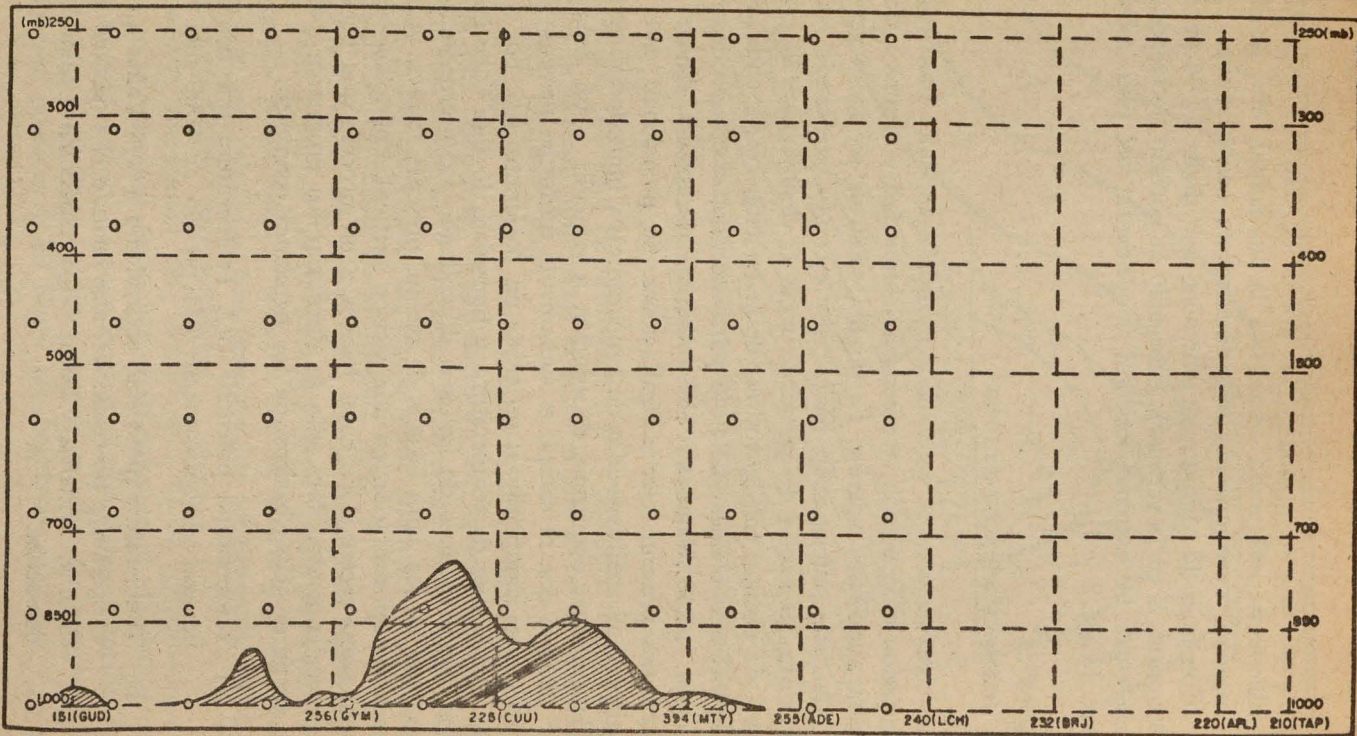


Fig. 3. Diagrama base paralelo 28.

horizontal es proporcional a los grados de longitud y la escala vertical, notablemente exagerada respecto a la horizontal, está dada por valores de presión, disminuyendo logarítmicamente con la altura.

Con fines de cómputo, se sobrepone una malla de 96 puntos (12 en la horizontal, 8 en la vertical), cubriendo la porción de troposfera comprendida entre los extremos oriental y occidental del país, sobre el paralelo base. (Figs. 2 y 3.)

4. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS

Las observaciones de radiosondeo suministran datos básicos acerca de las condiciones de presión, temperatura, humedad y vientos a distintos niveles de la atmósfera superior. Es posible construir secciones verticales a partir de dicha información básica; por ejemplo, asentando valores de temperatura, depresión de punto de rocío o viento en cada intersección del nivel de presión con la vertical de la estación correspondiente y, trazando las isotermas o líneas de flujo para describir el campo de temperaturas o vientos, respectivamente. Sin embargo, el análisis directo de secciones verticales presenta ciertas limitaciones. Se mencionan entre otras las siguientes: el análisis escalar de temperaturas y humedad muestra variaciones relativamente pequeñas, de estación a estación, a un determinado nivel, de manera que el campo es sumamente uniforme pasando desapercibidas variaciones significativas; no existe un parámetro que por sí solo describa las condiciones de temperatura y humedad, lo que hace necesario trazar dos diferentes tipos de isolíneas dificultando su interpretación. El análisis vectorial de los datos básicos de viento, presenta todavía mayor dificultad para su representación en una sección vertical. Por todas estas razones, se optó por someter a los datos básicos a un proceso que permita su mejor aprovechamiento. Para ello se diseñaron los programas para el cálculo, a partir de datos básicos, de los siguientes conceptos:

- a) Temperatura potencial (θ). Temperatura que adquiere el aire al llevarse adiabáticamente a la presión de 1000 mb.
- b) Temperatura potencial equivalente (θ_e). Valor que adquiere la temperatura potencial del aire cuando el vapor de agua que contiene se condensa y libera el correspondiente calor latente de condensación.

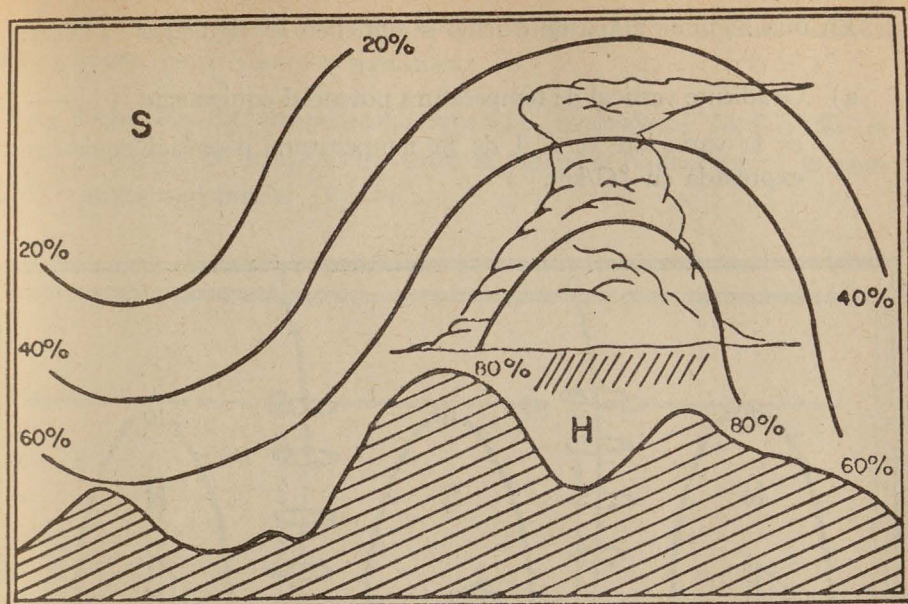


Fig. 4. Campo vertical, idealizado, del índice de saturación (I.S.).

- c) Temperatura potencial de saturación (θ^*). Máxima temperatura potencial equivalente que puede adquirir el aire al saturarse a una temperatura y presión dada.
- d) Índice de saturación (IS). Es la relación que existe entre el área limitada por las curvas (trazadas sobre un termodiagrama), de temperatura potencial y potencial equivalente y, el área comprendida entre las curvas de temperatura potencial y potencial de saturación, expresada en porcentaje. (Fig. 4.)
- e) Componente zonal del viento (u). Es la proyección del vector viento sobre el eje de las abscisas, que en el plano horizontal de coordenadas meteorológicas coincide con la dirección E-W. Para los fines de este estudio se considera que las componentes del Este son positivas y del Oeste negativas.
- f) Componente meridional del viento (v). Es la proyección del vector viento sobre el eje de las coordenadas en el plano horizontal, que en el sistema de coordenadas meteorológicas coincide con la dirección N-S. Para los fines de este estudio, las componentes del Sur son positivas y las Norte son negativas.

En una segunda etapa de cálculo se obtienen las siguientes variables:

- a) Gradiente vertical de temperatura potencial equivalente $\left(\frac{\partial \theta_e}{\partial z}\right)$: es la variación vertical de la temperatura potencial equivalente, expresada en °C/km.

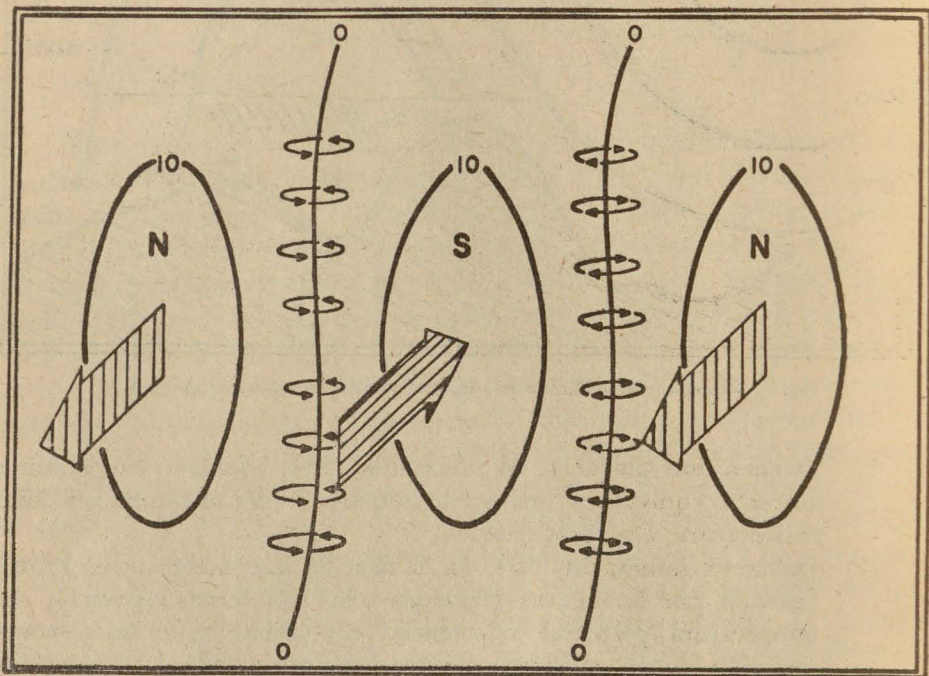


Fig. 5. Vorticidad generada por deslizamiento lateral.

- b) Deslizamiento lateral $\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)$: es la variación horizontal de la componente longitudinal del viento. Variaciones positivas generan deslizamiento ciclónico y negativas anticiclónico. (Fig. 5.)
- c) Movimiento vertical (w). Que se refiere al desplazamiento vertical de las partículas de aire originado exclusivamente por variaciones de divergencia zonal. Los movimientos ascendentes son positivos y los descendentes negativos. (Fig. 6.)

Los programas de cálculo proporcionan algunos subproductos, factibles de analizarse, entre ellos los siguientes:

- a) Depresión de temperatura potencial equivalente ($\Delta \theta_e$). Es la diferencia de temperatura entre la potencial equivalente y la temperatura potencial ($\theta_e - \theta$).

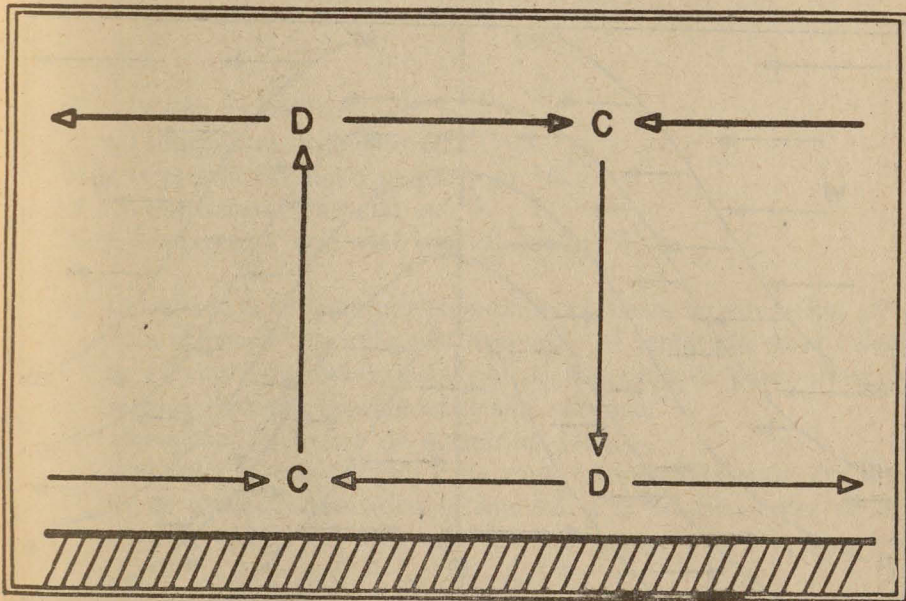


Fig. 6. Movimiento vertical generado por variaciones verticales de divergencia.

- b) Depresión de temperatura potencial de saturación ($\Delta \theta^*$). Es la diferencia de temperatura entre la potencial de saturación y la temperatura potencial ($\theta^* - \theta$).
- c) Divergencia zonal ($\nabla \cdot \bar{V}$)_x. Es la divergencia horizontal originada exclusivamente por variaciones en la componente zonal de viento $\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)$. (Fig. 7.)

5. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

a) Obtención de la temperatura potencial (θ).

$$\theta = T \left(\frac{1000}{P} \right)^{0.286} \quad (1)$$

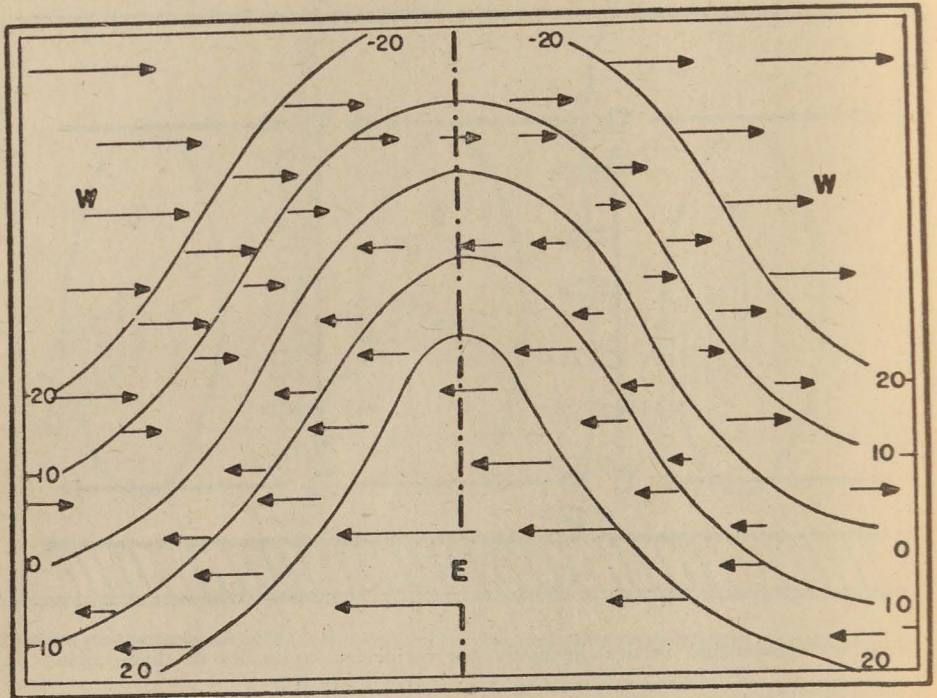


Fig. 7. Divergencia zonal originada por variaciones horizontales de la componente zonal del viento.

Donde:

T = Temperatura del aire en °K

P = Presión atmosférica en milibares

θ = Temperatura potencial en °K

b) Cálculo de la temperatura potencial equivalente (θ_e).

$$\theta_e = \theta_{\text{Exp}} \left[\frac{\frac{5\,973}{1\,000} \cdot \frac{622}{P}}{\frac{6.11 \text{ Exp}(5424.15252(1/273 - 1/t - \Delta t + 273))}{0.24(t - 1.195 \Delta t + 273)}} - 1 \right] \quad (2)$$

Donde:

P = Presión en milibares

t = Temperatura ambiente en °C

Δt = Depresión de punto de rocío en °C.

θ = Temperatura potencial en °K

θ_e = Temperatura potencial equivalente en °K

- c) Cálculo de la temperatura potencial equivalente de saturación (θ^*).
Para obtener θ^* se utiliza la expresión (2) empleada en el cálculo de θ_e , con la salvedad de que Δt , la depresión de punto de rocío, se hace cero por considerar el aire saturado.
- d) Obtención del índice de saturación (IS).
Este valor se calcula para cada capa comprendida entre dos niveles de presión consecutivos y equivale a la relación entre el área húmeda (AH) y el área saturada (AS), expresada en porcentaje.

$$IS = \frac{AH}{AS} \times 100 \quad (3)$$

Ambas áreas tienen forma trapezoidal, de manera que sus superficies quedan dadas por las expresiones:

$$AH = \frac{P_i - P_{i+1} + 1}{2} [(\theta_{ei+j} - \theta_{i+1}) + (\theta_{ei} - \theta_i)] \quad (4)$$

$$AS = \frac{P_i - P_{i+1} + 1}{2} [(\theta_{i+j}^* - \theta_{i+j}) + (\theta_i^* - \theta_i)] \quad (5)$$

Donde el subíndice (i) se refiere al nivel inferior, el subíndice (i + 1) al nivel superior y las variables que intervienen son:

P = Presión en milibares

θ = Temperatura potencial en °K

θ_e = Temperatura potencial equivalente en °K

θ^* = Temperatura potencial equivalente de saturación en °K

e) Cálculo de las componentes del viento (u y v).

La componente zonal del viento se obtiene mediante la expresión:

$$u = V \operatorname{sen} \phi \quad (6)$$

La componente meridional del viento está dada por:

$$v = V \operatorname{cos} \phi \quad (7)$$

Donde:

V = Intensidad del viento en m/seg.

ϕ = Dirección del viento en grados geográficos.

u = Componente zonal en m/seg.

v = Componente meridional en m/seg.

f). Obtención del gradiente vertical de temperatura potencial equivalente $\left(\frac{\partial \theta_e}{\partial Z} \right)$

$$\frac{\partial \theta_e}{\partial Z} \approx \frac{\Delta \theta_e}{\Delta Z} = \frac{\theta_{ei} + 1 - \theta_{ei}}{z_i + 1 - z_i} \quad (8)$$

Donde:

θ_e = Temperatura potencial equivalente en °C.

Z = Altitud en km.

$\frac{\partial \theta_e}{\partial Z}$ = Gradiente vertical de temperatura potencial equivalente en °C/km.

Los subíndices i, corresponden al nivel inferior de la capa y los subíndices i + 1 al nivel superior.

Para simplificar el cálculo y aprovechar mejor la capacidad de memoria,* cada espesor (ΔZ) se considera constante a una presión

* En nuestro caso se utiliza una microprocesadora HP Mod. 10.

dada. Esta decisión se adoptó después de corroborar que la variación de los espesores reales, de un extremo al otro del perfil, es insignificante, al menos durante la temporada lluviosa.

g) Cálculo del deslizamiento lateral $\frac{\partial v}{\partial x}$

$$\frac{\partial v}{\partial x} \approx \frac{\Delta v}{\Delta x} = \frac{V_{i+1} - V_i - 1}{2 \Delta x} \quad (9)$$

Donde:

v = Componente meridional del viento en m/seg.

x = Distancia horizontal entre los puntos de la malla i , $e i + 1$, en metros.

$\frac{\partial v}{\partial x}$ = Deslizamiento lateral del aire determinado en el punto i , expresado en seg^{-1} .

Estos valores representan la vorticidad debida exclusivamente al deslizamiento; ciclónica si los valores son positivos, anticiclónica si son negativos.

h) Cálculo del movimiento vertical (w).

$$W(h) = W(o) - h \frac{\partial \langle \mu \rangle}{\partial x} \quad (10)$$

Donde:

$w(o)$ = Movimiento vertical en la base de la capa, en m/min.
Se considera que la velocidad vertical es cero al nivel de superficie.

$\frac{\partial \langle \mu \rangle}{\partial x}$ = Divergencia promedio entre la base y cúspide de la capa, en seg^{-1} .

$w(h)$ = Movimiento vertical en la cúspide de la capa, en m/min.

Los movimientos verticales positivos son ascendentes y los negativos descendentes.

6. POSIBLES APLICACIONES

Las secciones verticales constituyen una herramienta auxiliar o complementaria en el análisis meteorológico, sin embargo, su empleo puede mejorar considerablemente la representatividad de los métodos fundamentales de análisis y pronóstico. Entre otros, se mencionan los siguientes aspectos:

a) Coherencia vertical

Mediante el análisis de las secciones verticales es posible definir la estructura vertical de los sistemas meteorológicos, la ubicación e inclinación de los ejes de cuñas y vaguadas, ciclones y anticiclones, profundidad de la capa húmeda, perfil vertical de frentes y masas de aire, líneas de confluencia, ondas tropicales, etc.

b) Estabilidad e inestabilidad

Desde el punto de vista termodinámico, el análisis de la distribución vertical de ciertos parámetros, como θ y θ_e , y de sus respectivos gradientes térmicos, permite establecer el grado de estabilidad e inestabilidad de la porción de atmósfera considerada en el perfil.

c) Aspecto higrométrico

El análisis de la distribución vertical de variables tales como θ_e e IS proporciona un buen indicio de la profundidad y extensión de los grandes mantos nubosos y de su potencialidad como generadores de precipitación. Su empleo permite una mejor interpretación de las fotografías de satélite.

d) Aspecto dinámico

A partir del análisis de las componentes del viento en el plano X-Z, es posible establecer la distribución vertical de divergencia zonal, vorticidad debida al deslizamiento lateral y una primera aproximación al movimiento vertical, factor determinante en la formación de nubes y precipitación.

7. CASO DE ESTUDIO

Análisis de las Secciones Verticales correspondientes al "Paralelo 28" del día 31 de julio de 1978 a las 00:00 TMG

Para extraer una decisión sobre el análisis de Secciones Verticales, es recomendable ponderar la influencia conjunta de los distintos conceptos analizados, particularmente:

	SUBSECRETARIA DE INFRAESTRUCTURA HIDRAULICA	SUBDIRECCION DE PREVISION ATMOSFERICA	SECCION VERTICAL PARALELO 28	CONCEPTO.	31-VII-78	M.C.D.
	DIRECCION GENERAL DE CONTROL DE RIOS E INGENIERIA DE SEGURIDAD HIDRAULICA			IS (%)	FECHA	00:00 Z
					HORA	M.C.D.
						ANALISIS

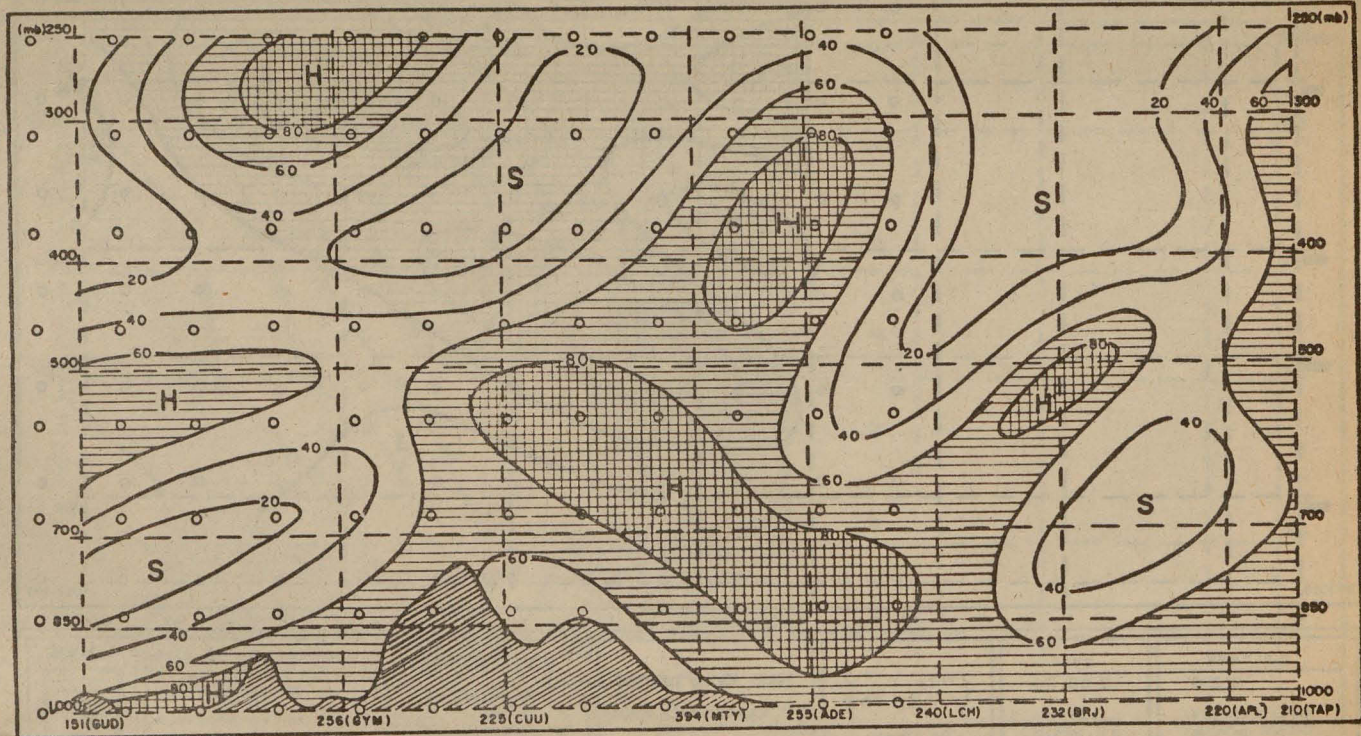


Fig. C-1. Análisis de campo vertical de índice de saturación.

 SARN	SUBSECRETARIA DE INFRAESTRUCTURA HIDRAULICA	SUBDIRECCION DE PREVISION ATMOSFERICA	SECCION VERTICAL PARALELO 28	CONCEPTO	31-VII-78 FECHA	M.C.D. ASENTAMIENTO
	DIRECCION GENERAL DE CONTROL DE RIOS E INGENIERIA RIA DE SEGURIDAD HIDRAULICA			$\frac{\partial \theta_e}{\partial z} \left(\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Km}} \right)$	00 00 Z HORA	M.C.D. ANALISIS

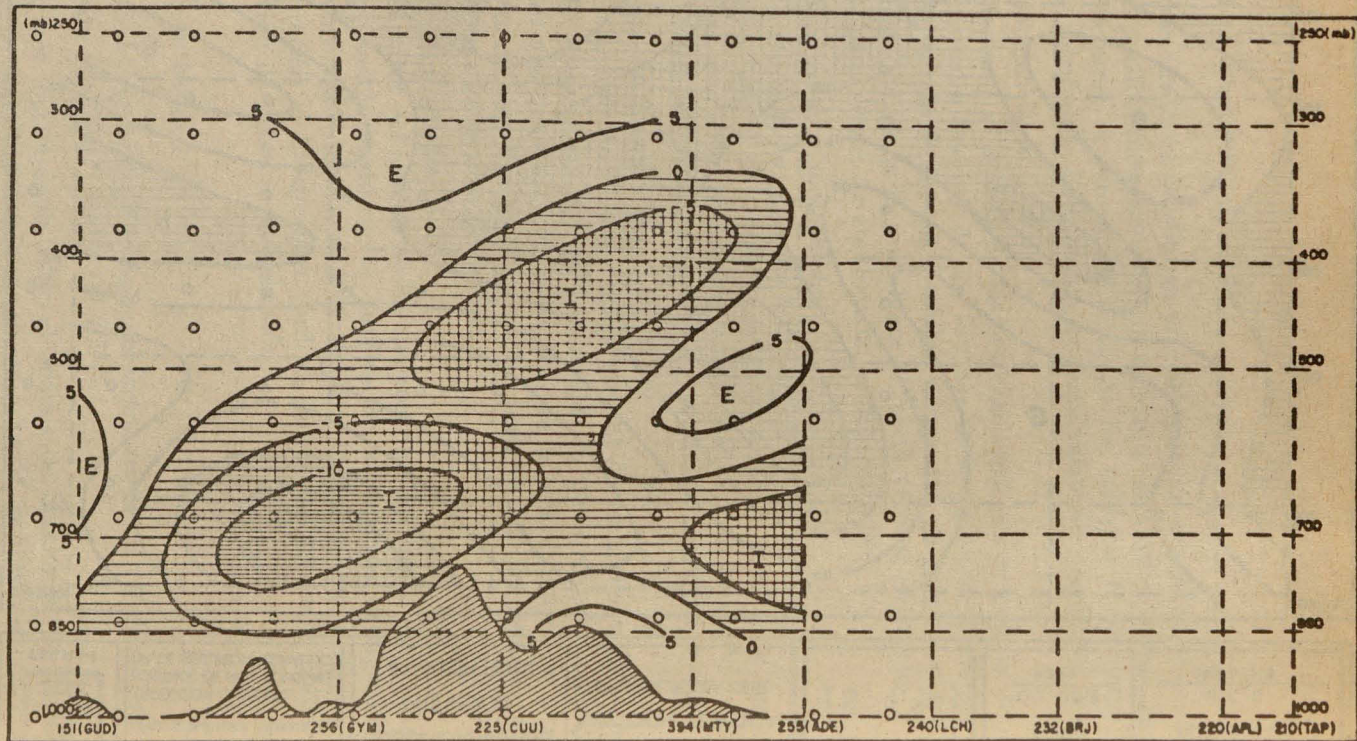


Fig. C-2. Análisis de campo X-Z de gradiente vertical de temperatura potencial equivalente.



SUBSECRETARIA DE
INFRAESTRUCTURA HIDRAULICA
DIRECCION GENERAL DE
CONTROL DE RIOS E INGENIERIA
DE SEGURIDAD HIDRAULICA

SUBDIRECCION DE
PREVISION
ATMOSFERICA

SECCION VERTICAL
PARALELO 28

CONCEPTO.
 $\frac{\partial v}{\partial x} \left(\frac{1}{\text{seg.}} \right)$

31-VII-78
FECHA
00:00Z
HORA

M. C. D.
ASENTAMIENTO
M. C. D.
ANALISIS

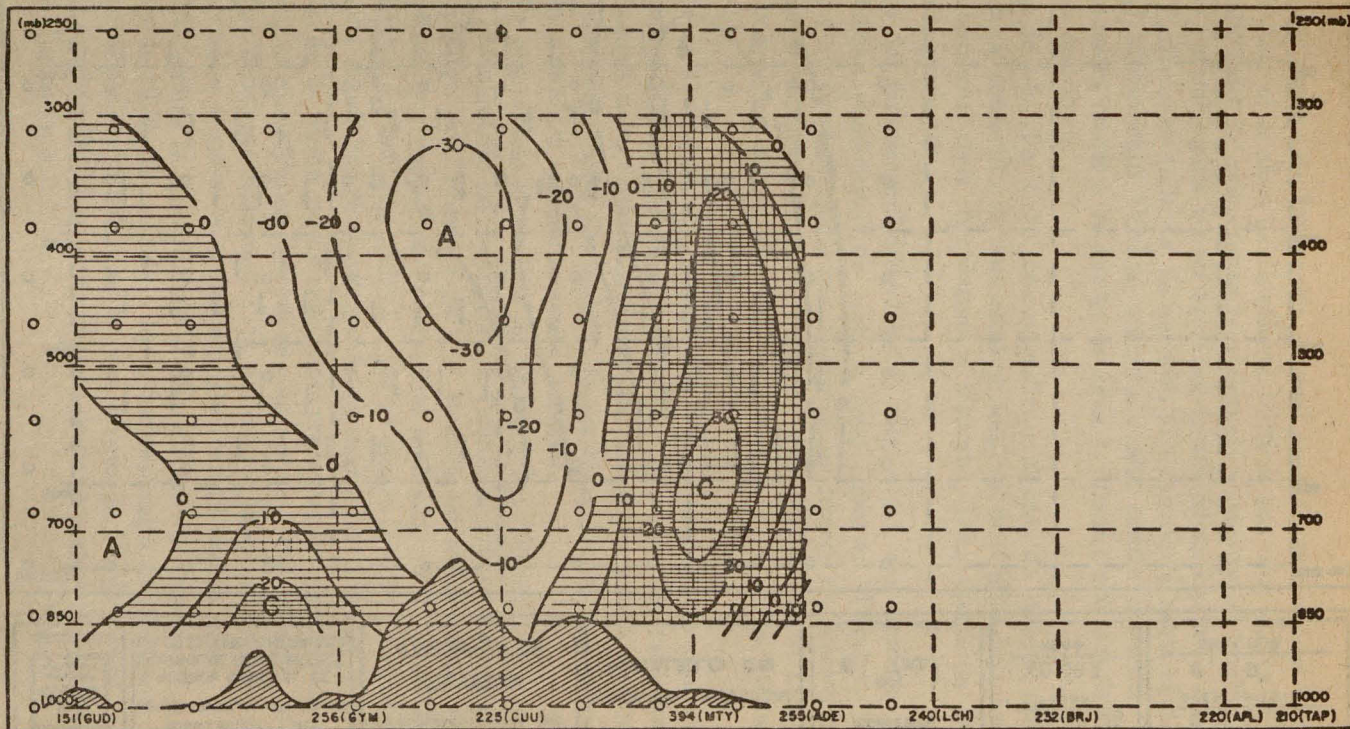


Fig. C-3. Análisis del campo vertical de deslizamiento lateral.

	SUBSECRETARIA DE INFRAESTRUCTURA HIDRAULICA DIRECCION GENERAL DE CONTROL DE RIOS E INGENIERIA DE SEGURIDAD HIDRAULICA	SUBDIRECCION DE PREVISION ATMOSFERICA	SECCION VERTICAL PARALELO 28	CONCEPTO. W (m^f/min)	31-VII-78 FECHA 00:00 Z HORA	M. C. D. ASENTAMIENTO M. C. D. ANALISIS
--	---	---	---------------------------------	--------------------------------	---------------------------------------	--

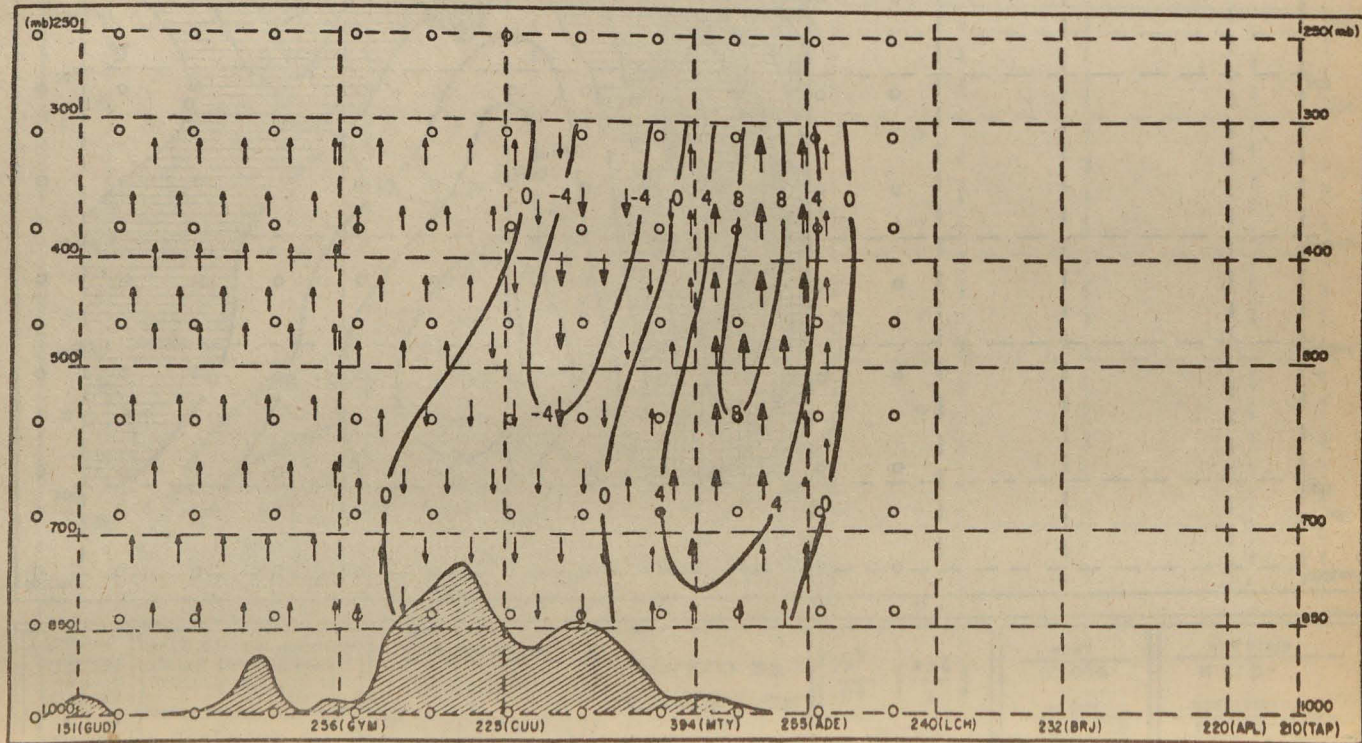


Fig. C-4. Análisis de movimiento vertical.

El análisis del Índice de Saturación, el cual nos informa sobre el contenido de humedad; el análisis de Gradiente Vertical nos dice acerca de la facilidad o dificultad de que existan movimientos verticales; el análisis de Deslizamiento Lateral indica las zonas donde la atmósfera favorece o contrarresta las formaciones nubosas de acuerdo al signo de la vorticidad; y el análisis del Movimiento Vertical muestra dónde existen corrientes ascendentes que hacen crecer a las gotitas de agua y, dónde corrientes descendentes que las destruyen.

El análisis de I.S. (fig. C-1), correspondiente al caso de estudio, muestra que el mayor contenido de humedad se localiza de Chihuahua hacia el E, particularmente entre Monterrey y Victoria, Tex., donde la capa húmeda es más profunda.

El análisis del Gradiente Vertical de θ_e (fig. C-2), nos muestra que existe inestabilidad condicional de costa a costa sobre el "Paralelo 28", sin embargo, y no obstante que sobre Guaymas se detecta un núcleo bastante inestable, debe prestarse mayor atención a lo que ocurre al Este de Chihuahua, porque en esa región hay más humedad y la capa inestable es más profunda.

El análisis de Deslizamiento lateral (fig. C-3), nos muestra dos áreas de deslizamiento ciclónico, una sobre la Península de Baja California donde hay poca humedad y otro centro de vorticidad positiva muy intenso, ubicado aproximadamente entre Coahuila y Tamaulipas, donde hay bastante humedad y la atmósfera es relativamente inestable.

Finalmente observando el análisis de Movimiento Vertical (fig. C-4), se tiene que, precisamente en la región de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, a lo largo del "Paralelo 28", se localiza un máximo de movimiento ascendente que concuerda con un alto contenido de humedad, relativa inestabilidad y vorticidad ciclónica por lo que es posible concluir que ésta es la región donde puede registrarse la precipitación más significativa.

En el resto de la región puede registrarse precipitación pero no deberá ser tan intensa, ya que algunos factores se contraponen. Por ejemplo, sobre Chihuahua hay suficiente humedad y la atmósfera inestable, pero el deslizamiento lateral es negativo y el movimiento vertical descendente.

La fig. C-5 muestra la precipitación media acumulada entre las 7 A.M. del 31 de julio de 1978, de acuerdo a los reportes de aproximadamente 50 estaciones pluviométricas distribuidas en una franja de 4° de latitud, centrada sobre el paralelo 28°N , que se extiende desde la costa de Sonora hasta el norte de Tamaulipas.

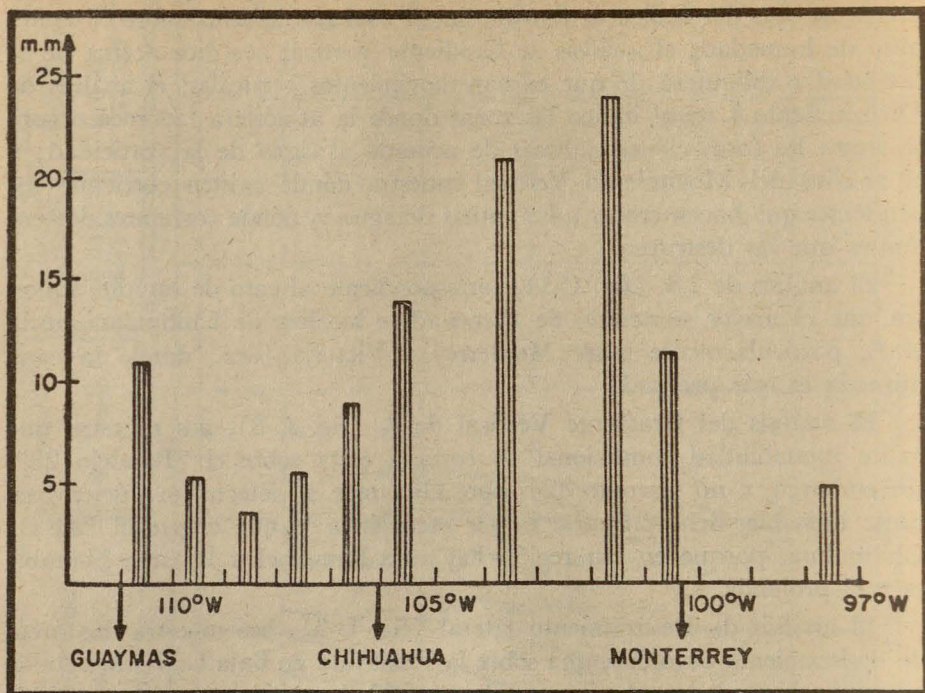


Fig. C-5. Precipitación media a lo largo del paralelo 28, del 30 al 31 de julio de 1978.

Los reportes de precipitación indican que, en este día en particular, se registraron lluvias en prácticamente toda la franja, desde el Golfo de California hasta el Golfo de México. Sin embargo, la precipitación media más significativa ocurrió en la zona comprendida entre Chihuahua y Monterrey, lo cual concuerda con la decisión final del análisis de Secciones Verticales, practicado con los datos de las 00:00 T.M.G., del día 31 de julio, es decir, a las 18:00 horas, local, del 30 de julio de 1978.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue realizado por el personal del Departamento de Investigación Tecnológica, particularmente por las siguientes personas: Manolo de la Barrera Testa, quien tuvo a su cargo el análisis matemático y desarrollo de los programas de cálculo; María Elena Centeno Durán que participó

en el análisis experimental, la interpretación y extracción de conclusiones y la redacción preliminar. En la fase de diseño de ilustraciones y redacción final participaron: Alejandro Arreola Contreras, María Isabel Briones Castañeda y Jaime Raúl Ochoa Noé. El trabajo de dibujo fue ejecutado por Humberto Acosta Godínez* y la transcripción mecanográfica por Rosa Arellano Ramírez** y Martha Isela Méndez Sáinz.**

Se agradece la colaboración del personal del Departamento de Proceso Numérico por la valiosa ayuda prestada para el procesamiento de los datos y al personal del Departamento de Control Técnico por su cooperación en la presentación final. Asimismo y muy particularmente, agradecemos los comentarios de orientación, apoyo y estímulo brindados por el Ing. Antonio Cejudo Báez, Subdirector de Previsión Atmosférica, que fueron fundamentales para la realización de este estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- HOLTON, J. R., 1972. An Introduction to Dynamic Meteorology, Academic Press.
SAUCIER, W., 1955. Principles of Meteorological Analysis. The University of Chicago Press.

* Departamento de Control Técnico.

** Subdirección de Previsión Atmosférica.