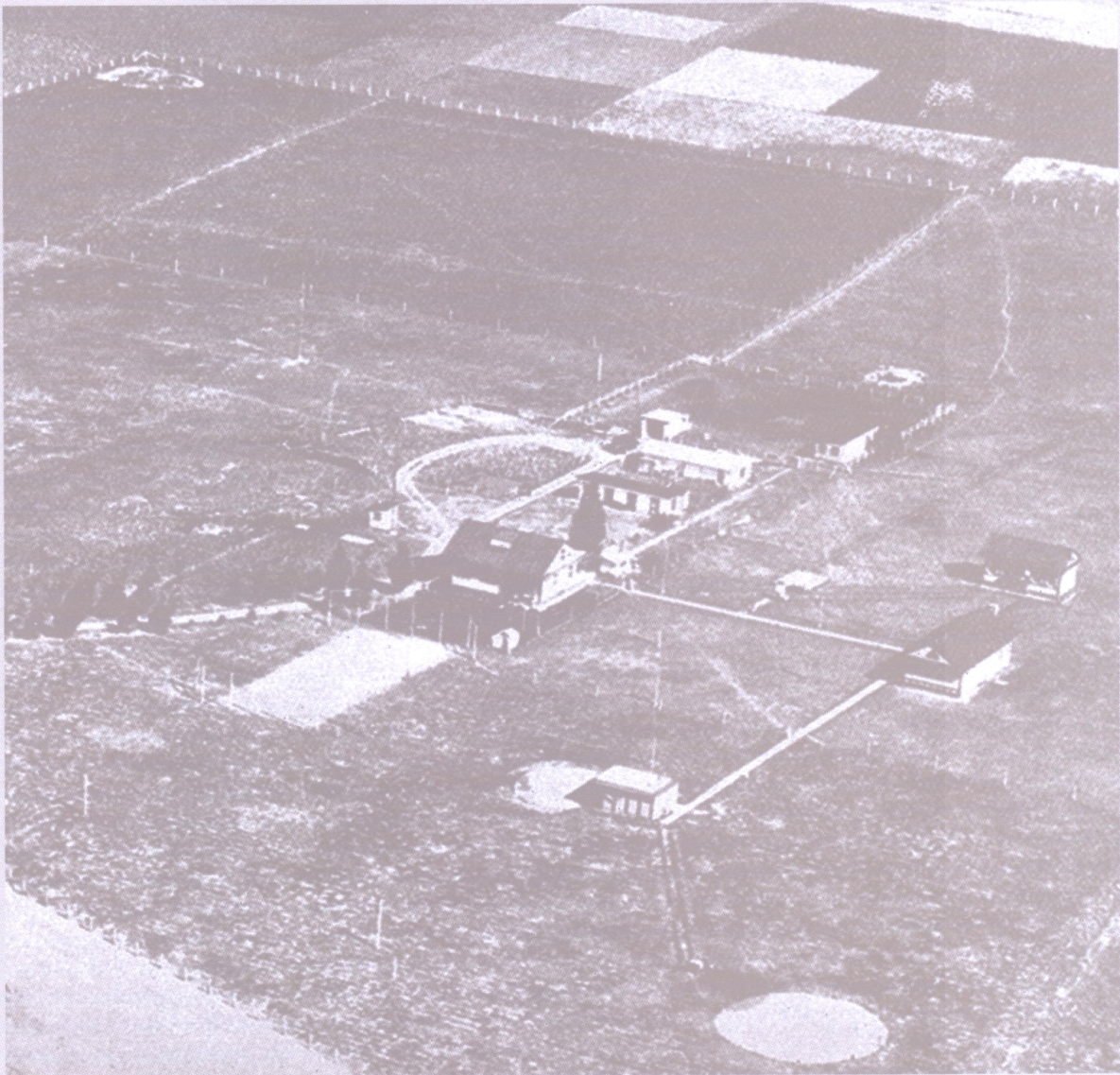


REVISTA



GEOFISICA



INSTITUTO PANAMERICANO DE GEOGRAFIA E HISTORIA

NUMERO 49

JULIO-DICIEMBRE 1998

Características de la Atmósfera Libre sobre la Región Central de Venezuela

Luis Fernández*
Walter Fernández**

Abstract

An investigation of the free atmosphere over the central region of Venezuela is made utilizing the radiosonde data from Maracay station (10.15° N, 67.39° W, 436 m of altitude) for the 1980-1995 period.

In general, a seasonal variation is observed. At the surface, the lowest values of temperature, relative humidity, and mixing ratio occur between November and February (dry season), while the highest values occur between April and October (rainy season). A similar pattern is observed at higher levels up to about 150 hPa. The tropopause axis is located at about 100 hPa the entire year.

The lowest values of the thickness between geopotential levels occur during the rainy season, while the highest values occur in April and May (when the highest temperatures at these levels are observed).

During the rainy season, potential instability occurs at lower layers (up to about 700 hPa). Above 700 hPa and up to 500 hPa a potentially neutral atmosphere is observed. In the dry season, potentially neutral conditions at the surface and potentially unstable conditions between 700 and 500 hPa are observed. Between 500 and 300 hPa, the atmosphere is potentially unstable the whole year.

In general, conditional instability occurs up to 500 hPa during the rainy season. Above this level and up to 300 hPa there is conditional stability the entire year. In the dry season, the atmosphere is conditionally stable from the surface up to 850 hPa, conditionally unstable from 850 up to 700 hPa, and conditionally neutral from 700 to 300 hPa.

* Servicio de Meteorología de la Fuerza Aérea Venezolana, Base Aérea Logística Aragua, Maracay, Estado Aragua, Venezuela.

** Laboratorio de Investigaciones Atmosféricas y Planetarias, DFAOP/Escuela de Física y Centro de Investigaciones Geofísicas, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Easterly winds from the surface to 400 hPa are observed all year round. Above this level and up to 70 hPa, westerly winds are present between November and April (dry season). The presence of these westerly winds increases the vertical shear.

In the dry season, the values of the Showalter index indicate unfavorable conditions for the occurrence of convective rain. On the contrary, during the rainy season the values of the Showalter index indicate the occurrence of showers and storms.

Resumen

Se hace una investigación de la atmósfera libre sobre la región central de Venezuela, utilizando los datos de radiosondeo de la estación de Maracay (10.15° N, 67.39° O, 436 m de altitud), para el periodo de enero de 1980 a diciembre de 1995.

En general, se observa una variación estacional. En superficie, los menores valores de temperatura, humedad relativa y razón de mezcla, ocurren entre noviembre y febrero (época seca), mientras que los mayores valores ocurren entre abril y octubre (época lluviosa). Un patrón similar se observa en niveles superiores hasta aproximadamente 150 hPa. El eje de la tropopausa se ubica cerca de 100 hPa durante todo el año.

Los menores valores del espesor entre niveles geopotenciales ocurren durante la época lluviosa, mientras que los mayores valores ocurren en abril y mayo (cuando se observan las temperaturas más altas en estos niveles).

En la estación lluviosa, ocurre inestabilidad potencial en capas bajas (hasta cerca de 700 hPa). Por encima de 700 hPa y hasta 500 hPa, se observa una atmósfera potencialmente neutra. En la estación seca, se observan condiciones potencialmente neutras en superficie y condiciones potencialmente inestables entre 700 y 500 hPa. Entre 500 y 300 hPa, la atmósfera es potencialmente estable durante todos los meses del año.

En general, se observa inestabilidad condicional hasta 500 hPa durante la época lluviosa. Por encima de este nivel y hasta 300 hPa, hay estabilidad condicional durante todo el año. En la época seca, se observa estabilidad condicional desde superficie hasta 850 hPa, inestabilidad condicional de 850 hasta 700 hPa y una atmósfera condicionalmente neutra de 700 hasta 300 hPa.

Se observan vientos del este durante todo el año, desde superficie hasta 400 hPa. Por encima de este nivel se observan vientos del oeste hasta 70 hPa entre noviembre y abril (estación seca). La presencia de estos vientos del oeste, aumenta la cortante vertical del viento.

En la estación seca, los valores del índice de Showalter indican condiciones no favorables para la ocurrencia de lluvia convectiva. Por el contrario, en la estación lluviosa, los valores del índice de Showalter indican que es probable la ocurrencia de aguaceros y tormentas.

Introducción

El objetivo principal de la presente investigación es estudiar el comportamiento de la atmósfera libre sobre la región central de Venezuela, con el propósito de describirla en forma detallada. Específicamente, se propone una climatología para la atmósfera libre sobre la región central de Venezuela.

Trabajos o estudios que expliquen detalladamente la estructura de la atmósfera libre sobre Venezuela, utilizando series largas de radiosondeos como la proporcionada por la estación Maracay, no han sido realizados. Este tipo de estudios es sumamente útil no sólo como conocimiento básico sino también en campos aplicados como la meteorología aeronáutica, aplicaciones ecológicas y agrícolas. Además, puede utilizarse como ayuda complementaria para el pronóstico del tiempo.

La posición que ocupa el territorio venezolano entre los paralelos extremos 0.6° y 12.2° N, lo sitúa en la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), en donde se manifiesta la influencia de los vientos alisios del noreste, correspondientes al Hemisferio Norte y los vientos alisios del sureste provenientes del Hemisferio Sur.

Debido a que la ZCIT oscila entre 5 y 15° N durante todo el año, el territorio venezolano está influenciado por vientos provenientes tanto del hemisferio sur como del hemisferio norte, dependiendo de la posición de la misma a lo largo del año. Riehl (1977c), señala que la latitud más al sur que alcanza la ZCIT es cerca de 5° N. Por otra parte, consideró los sistemas sinópticos que afectan la región norcentral de Venezuela durante la época lluviosa, identificando los siguientes: avance de líneas de nubes desde el hemisferio sur, vaguadas de vientos oestes con empuje de los alisios, vaguadas de vientos oestes retrocediendo con ondas de vientos inferiores, masas de nubes desde la zona ecuatorial con empuje de los alisios y huracanes incipientes. Riehl (1979) ha estudiado también la estructura de la ZCIT sobre Venezuela.

Como consecuencia de la presencia de la ZCIT sobre el territorio venezolano, es posible distinguir dos periodos denominados comúnmente como estación seca y estación lluviosa.

De diciembre hasta abril se observa que la mayor parte del norte de Venezuela está bajo la influencia de los vientos alisios del noreste, con campos anticiclónicos en altura. La divergencia del flujo resultante origina subsidencia de las masas de aire, provocando fuertes inversiones de temperatura en altura. Por encima de dichas inversiones, cuya altitud oscila entre 1500 y 2500 m, los valores de humedad son muy bajos, lo que limita el desarrollo de las nubes provocadas por convección (Goldbrunner, 1984).

Desde mediados de abril hasta noviembre, el territorio venezolano está casi en su totalidad bajo la influencia de la ZCIT, debido al desplazamiento gradual de ésta con dirección norte, y entonces las precipitaciones que se originan dan lugar al periodo lluvioso (Goldbrunner, 1984).

La presente investigación provee un estudio detallado de la atmósfera libre sobre la parte central del país, sirviendo de base o como complemento para investigaciones sobre temas relacionados, como la Oscilación Cuasibienal (e.g., Aceituno, 1988, 1989), el comportamiento estacional de la precipitación (e.g., Riehl, 1973, 1977a, 1977b) y su relación con la Oscilación del Sur, así como mesosistemas convectivos sobre Venezuela (e.g., Fernández, 1980, 1982, 1983, 1998).

Área de estudio y datos utilizados

Como área de estudio se seleccionó la atmósfera libre sobre la región central venezolana. Para dicho estudio se han tomado los datos de radiosondeo de la estación Maracay, ubicada en el Estado Aragua, Venezuela (10.15° N, 67.39° O, 436 m de altitud). Todos los datos utilizados fueron aportados por el Servicio de Meteorología de la Fuerza Aérea Venezolana y corresponden a un lapso comprendido entre enero de 1980 y diciembre de 1995, con un periodo de datos faltantes desde noviembre de 1988 hasta agosto de 1991. Entre 1980 y 1985, el equipo de sondeo utilizado fue el RS21. A partir de 1986 se comenzó a usar el RS8015 (Digicora Vaisala).

Las variables termodinámicas, de flujo y otros parámetros derivados que se estudiaron son los siguientes: temperatura, humedad, espesor entre niveles geopotenciales, temperatura potencial equivalente y estabilidad potencial o convectiva, temperatura potencial equivalente de saturación y estabilidad condicional, magnitud y dirección del viento, cortante vertical del viento e índice de Showalter.

Antes de analizar dichas variables, es importante considerar primero la variación mensual de la precipitación. En la Figura 1, se presenta la precipitación media para el periodo 1980-1995, para la estación Maracay (lugar en donde son realizados los sondeos). En dicha figura, se puede ver que los meses menos lluviosos van desde diciembre hasta marzo y los más lluviosos se encuentran entre mayo y octubre, siendo abril y noviembre meses de transición. También se puede apreciar que agosto es el mes más lluvioso del año.

Riehl (1977a) encontró que el 75% de la precipitación total en Venezuela se deriva de un pequeño número de sistemas lluviosos convectivos, indicando que la precipitación se origina principalmente por cumulonimbus. Riehl (1977a) define la precipitación debida a cumulonimbus como la lluvia que cae en dos o tres eventos aproximadamente, produciendo al menos 2 mm de lluvia en 10 minutos por cada uno de ellos, con diferentes intervalos entre cada suceso, así, los cumulonimbus producen el 70% de la precipitación local.

De acuerdo con información suministrada por el Servicio de Meteorología de la Fuerza Aérea Venezolana (no incluida aquí), la mayor parte de la precipitación que se presenta en la zona es de tipo convectivo, ocurriendo principalmente entre las 12:00 y las 16:00 HLV (Hora Local de Venezuela) con tiempo medio de duración

Distribución Mensual de la Precipitación en la Estación Maracay

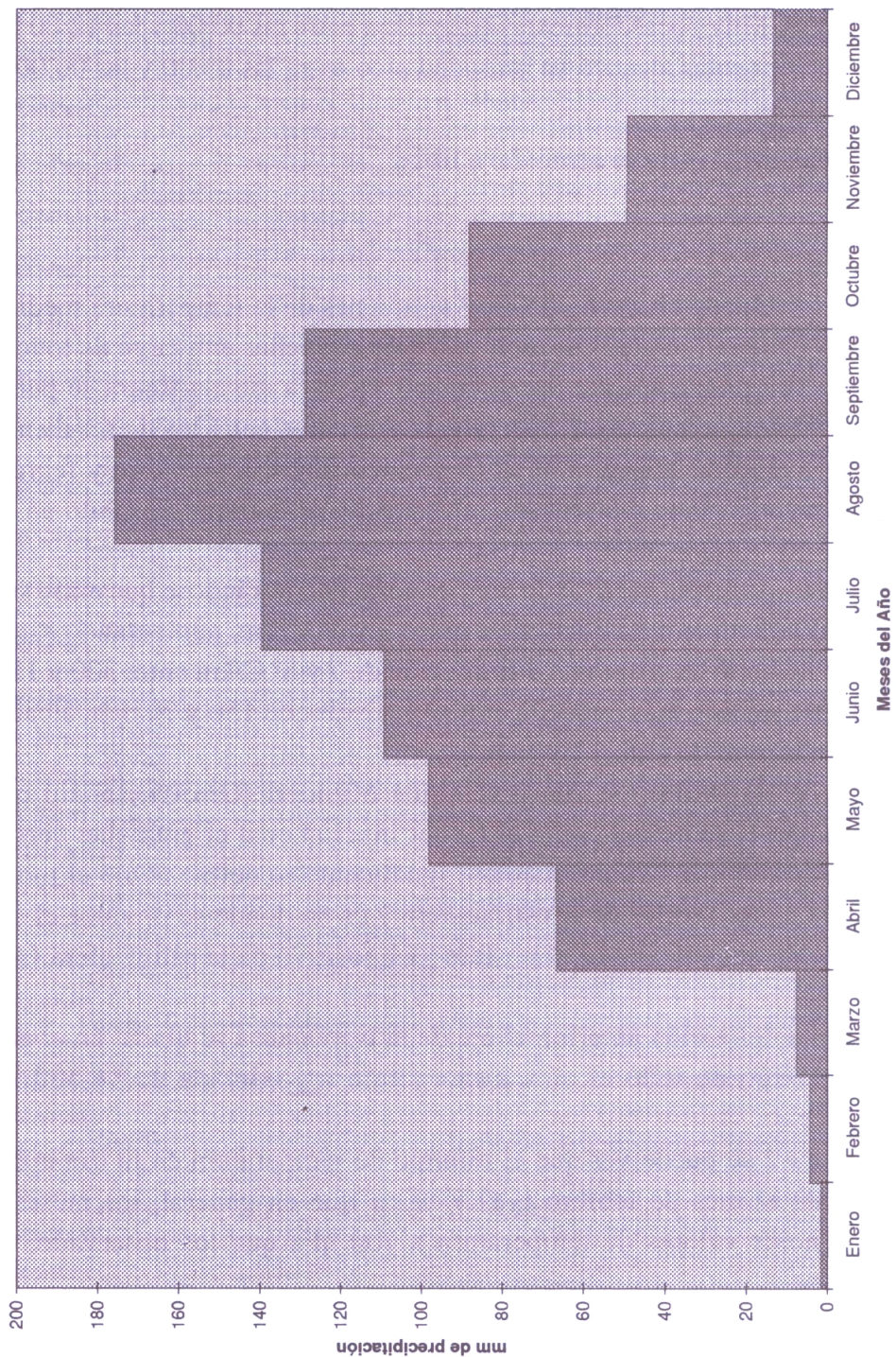


Figura 1. Precipitación media registrada en la estación Maracay, durante el periodo 1980-1995.

máxima de 15 minutos. Fernández (1983) encontró que el 86% de las tormentas observadas en VIMHEX-II alcanzaron su actividad pico (hora en que los ecos de radar mostraron su máxima altura, o su máxima área si no se tenía la máxima altura) entre las 12:00 y las 21:00 horas (HLV). El 50% lo hizo en el periodo entre las 15:00 y las 18:00 horas. Muy pocas tormentas ocurrieron entre las 00:00 y las 12:00 horas y ninguna de las tormentas alcanzó su actividad pico entre las 03:00 y las 06:00 horas.

Características medias de la atmósfera libre

Temperatura

En la Figura 2 se puede observar que las variaciones de la temperatura media entre 850 y 150 hPa en la latitud de Venezuela son muy pequeñas a lo largo de todo el año (las isotermas son prácticamente horizontales). En esta misma figura se puede ver que las máximas temperaturas en superficie se presentan entre los meses de marzo y agosto, con máximos relativos entre abril y mayo. Entre septiembre y febrero, las temperaturas en superficie disminuyen, alcanzando un mínimo absoluto en el mes de enero.

Se calculó el gradiente vertical de temperatura, encontrándose que entre superficie y 850 hPa, la temperatura disminuye entre 3 y 4° C/km, aumentando este valor progresivamente hasta alcanzar una disminución de 7 y 8° C/km entre 300 y 150 hPa. Dicho gradiente se hace más pequeño entre los niveles de 150 y 70 hPa, alcanzando valores cercanos a -2° C/km.

En 1957, la Organización Meteorológica Mundial (OMM), señaló que “la primera tropopausa, se define como el menor nivel al cual el gradiente vertical de temperatura decrece a 2° C/km o menos”, igualmente se define como el tope de la troposfera y la parte inferior de la estratosfera y es en donde se produce el cambio entre el gradiente negativo de la troposfera y el positivo de la estratosfera (Asnani, 1993).

Siguiendo la definición anterior, el eje de la tropopausa se ubica en el nivel de 100 hPa a lo largo de todo el año, a una altura aproximada de 16,500 metros geopotenciales.

En la Figura 2 se puede ver que el mínimo de temperatura en la tropopausa se alcanza durante el mes de febrero (-81.7° C) y que en general, los meses secos presentan menores valores de temperatura a 100 hPa que los observados en los meses lluviosos.

Por encima del nivel de 100 hPa, se puede observar una inversión de la temperatura, es decir, se comienza a notar la presencia de la estratosfera. De 100 a 50 hPa aproximadamente, los valores mínimos se presentan de septiembre a junio y los máximos de mayo a octubre. Por encima de 50 hPa, las isotermas se van haciendo más horizontales.

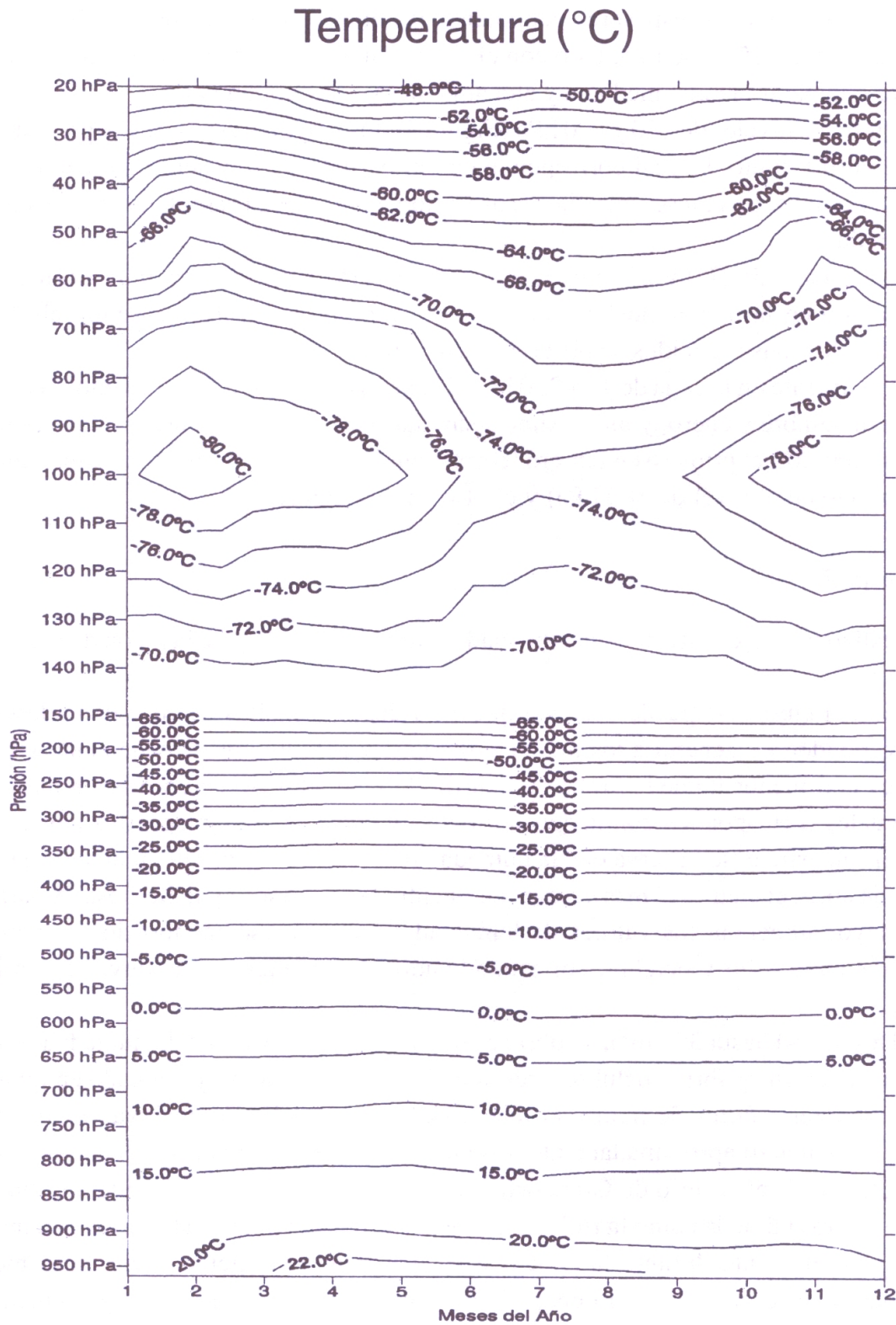


Figura 2. Corte vertical de la temperatura media mensual de la atmósfera sobre la región central de Venezuela, durante el periodo 1980-1995.

Espesores entre niveles geopotenciales

Se han calculado los espesores geopotenciales entre los niveles de 850-500 hPa, 500-250 hPa y 250-100 hPa. Esto con el fin de caracterizar el grosor de las capas y poder comparar la baja, mediana y alta atmósfera, respectivamente.

Entre los niveles de 850 y 500 hPa (Figura 3), los mayores espesores se presentan entre abril y junio, lo cual corresponde con el periodo de transición e inicio de la época lluviosa. Los meses más lluviosos (julio-septiembre), presentan los espesores más reducidos.

En la capa de 500 y 250 hPa (Figura 4), el comportamiento es muy similar al observado en la baja atmósfera, los mayores espesores se observan entre abril y mayo, y los más reducidos se observan entre junio y julio.

Finalmente en la capa de 100-250 hPa (Figura 5), se presenta un máximo espesor entre diciembre y enero, y un máximo secundario en agosto. Se observan dos espesores mínimos, el primero en febrero (correspondiente con el mínimo de temperatura observado en el nivel de 100 hPa) y el otro en noviembre.

Humedad

Se realizó un corte vertical de la humedad relativa (Figura 6) y de la razón de mezcla (Figura 7).

En la Figura 6 se puede observar que los valores más altos de humedad relativa corresponden en general a los meses entre abril y octubre aproximadamente y los meses con menor humedad relativa van desde mediados de octubre hasta marzo, los cuales corresponden con la época lluviosa y la época seca, respectivamente.

En superficie, se observa que la humedad relativa comienza a aumentar desde el mes de abril, el cual es el mes de transición entre la época seca y la lluviosa. A partir de mayo, aumentan los valores de humedad relativa, presentándose los mayores valores entre julio y octubre, correspondiendo con los meses más lluviosos en la zona.

Desde 850 hasta 300 hPa, se observa que los mayores valores de humedad relativa ocurren entre abril y octubre, presentándose un máximo muy marcado en junio. Los menores valores de humedad relativa en estos niveles se observan entre noviembre y marzo aproximadamente, los cuales corresponden con la época seca.

Utilizando el criterio de Grandoso *et al.* (1981), en donde se considera el límite de la capa húmeda como la isolínea del 50%, se puede ver que esta capa desciende considerablemente durante la época seca, alcanzando su menor nivel en el mes de marzo, encontrándose por debajo de los 750 hPa. El espesor de la capa aumenta notablemente durante la época lluviosa hasta alcanzar en junio un nivel cercano a los 500 hPa, siendo este último el mes con mayor espesor de la capa húmeda (Figura 6).

Espesor de la capa entre los niveles de 850 hPa y 500 hPa

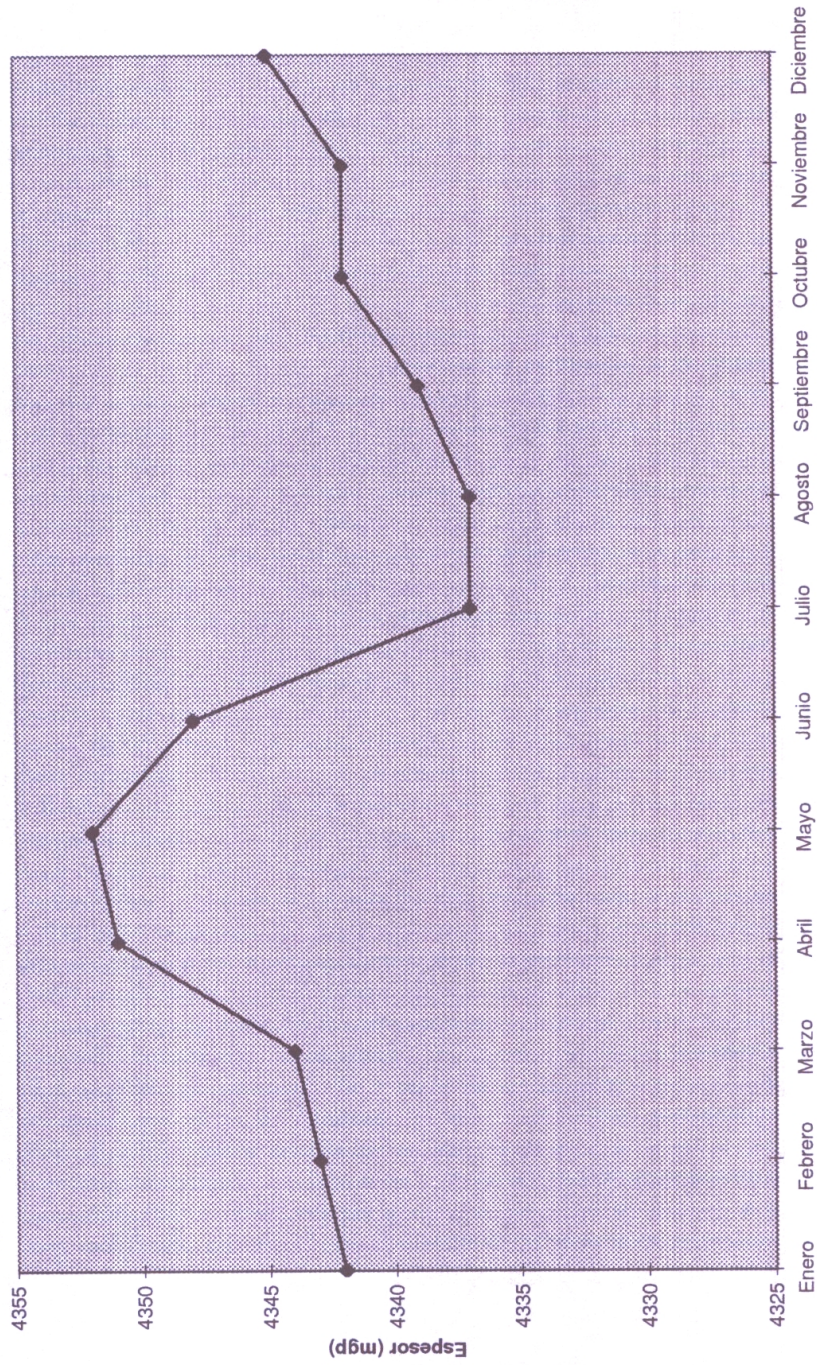


Figura 3. Espesor medio de la capa entre 850 y 500 hPa, durante el periodo 1980-1995.

Espesor de la capa entre los niveles de 500 hPa y 250 hPa

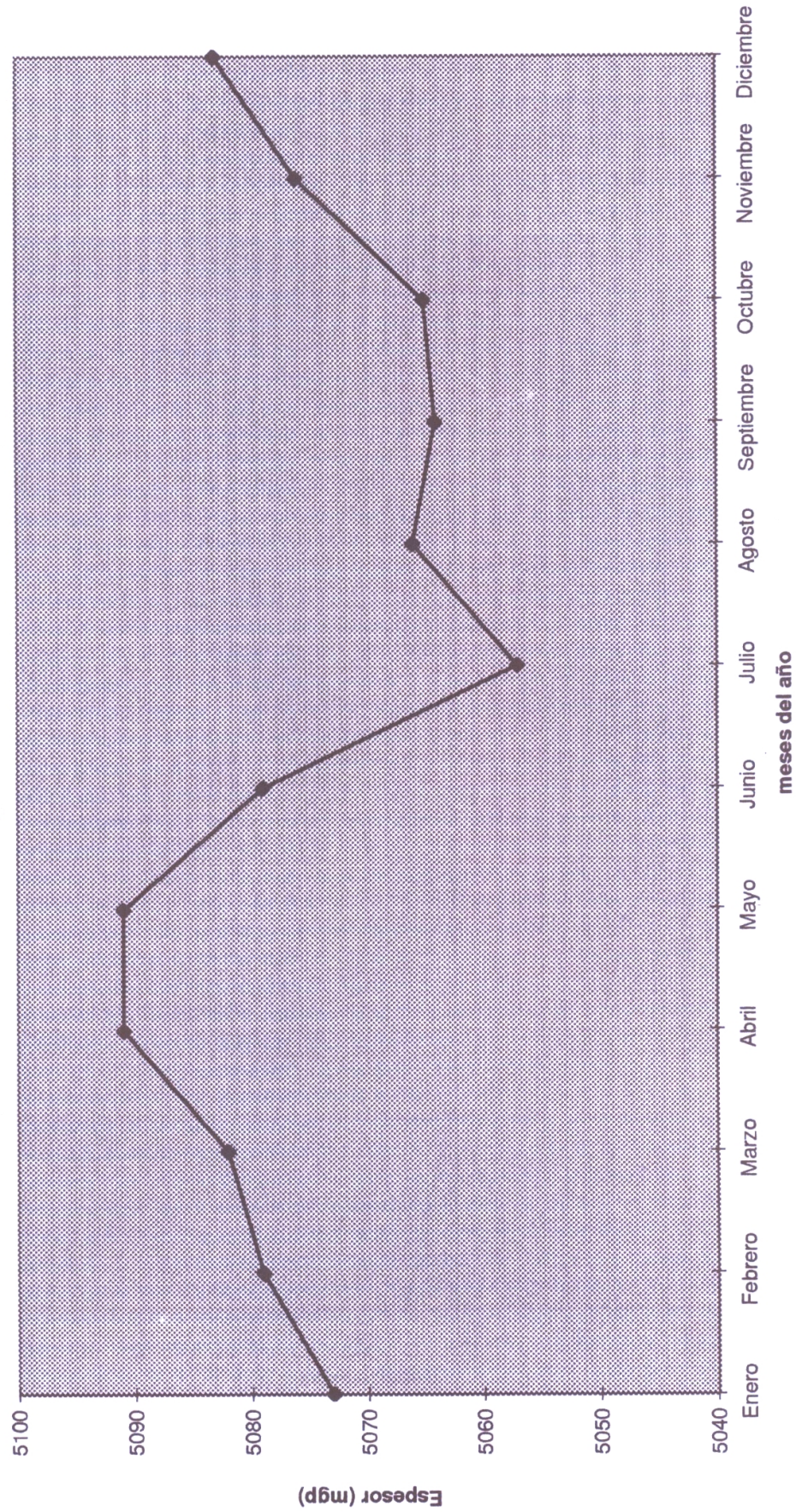


Figura 4. Espesor medio de la capa entre 500 y 250 hPa, durante el periodo 1980-1995.

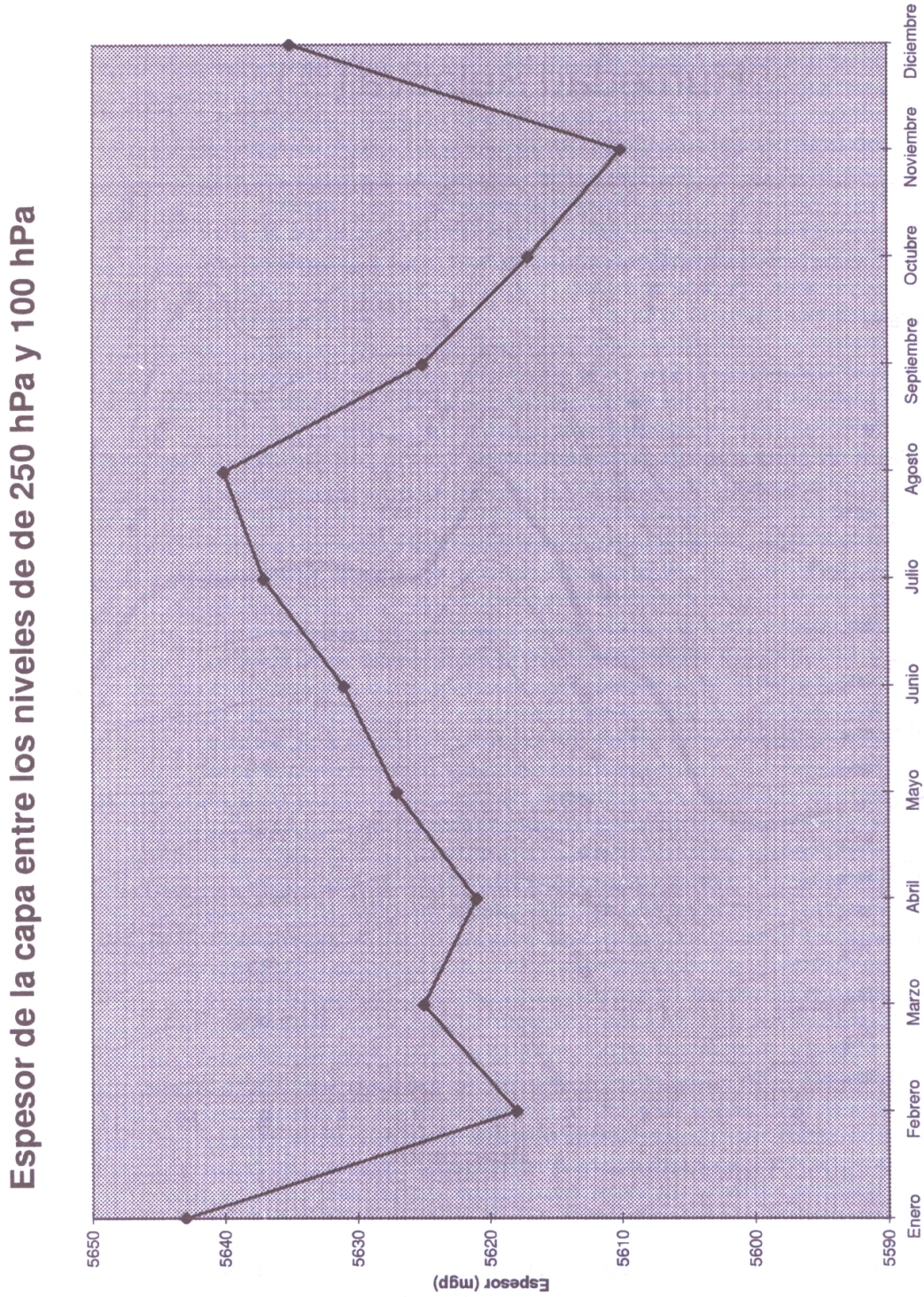


Figura 5. Espeor medio de la capa entre 250 y 100 hPa, durante el periodo 1980-1995.

Humedad Relativa (%)

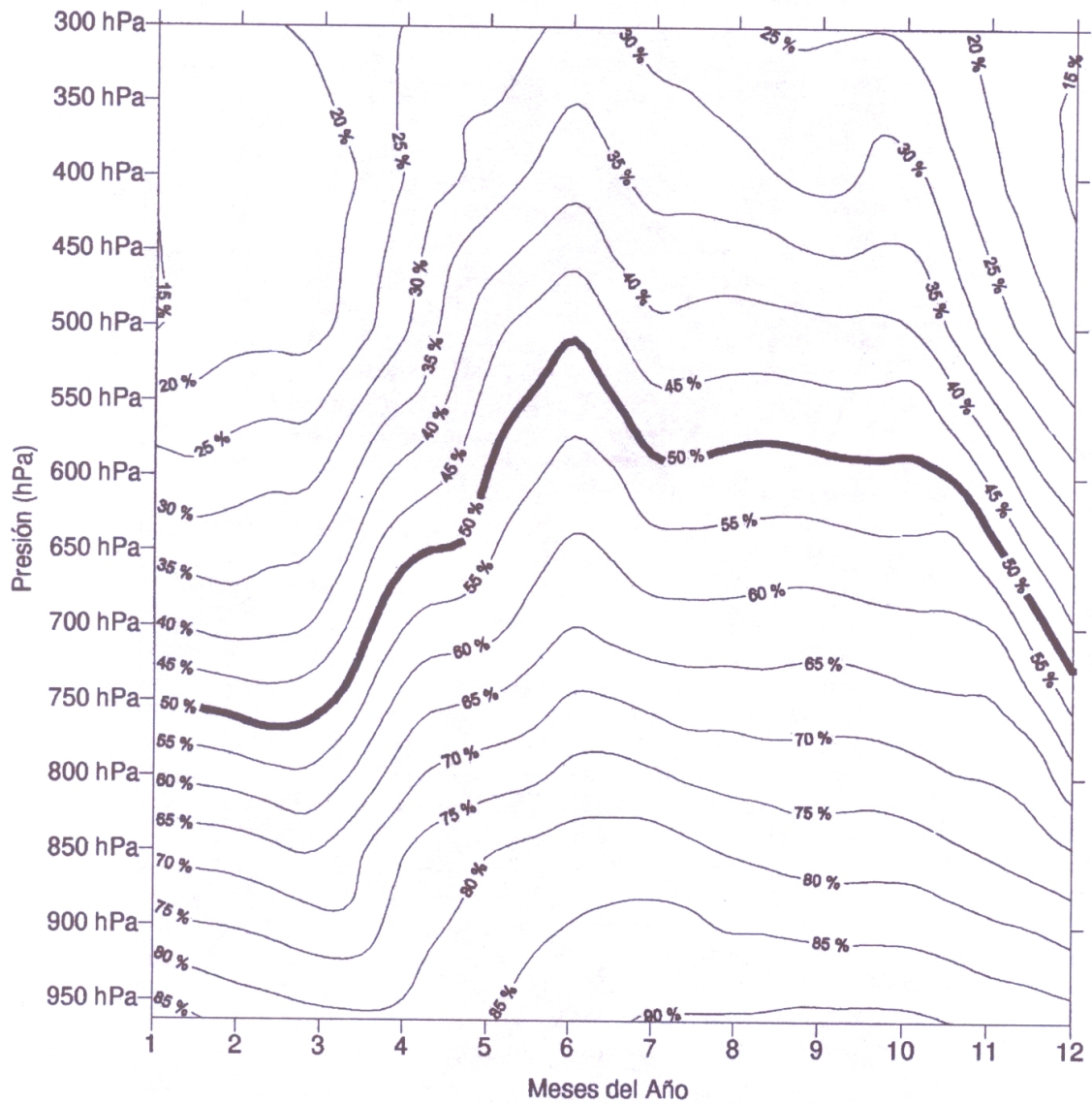


Figura 6. Corte vertical de la humedad relativa media mensual de la atmósfera sobre la región central de Venezuela, durante el periodo 1980-1995.

La Figura 7 muestra que la razón de mezcla sigue un patrón similar al de la humedad relativa, tal como era de esperarse. Sin embargo, en esta figura se puede ver que los mayores valores se encuentran entre mayo y junio, y los menores valores se encuentran entre diciembre y febrero, correspondientes con la época seca en la zona.

Entre 850 y 300 hPa, la razón de mezcla es mayor durante la época lluviosa (presentando los mayores valores durante el mes de junio) que durante la época seca (entre diciembre y marzo).

Por otra parte, también se puede observar que el gradiente vertical de la razón de mezcla es mucho mayor entre superficie y 700 hPa. A partir del nivel de 500 hPa, comienza a disminuir progresivamente hasta aproximarse a cero en el nivel de 300 hPa. Un resultado similar a éste, fue obtenido por Báez y Fernández (1995), para la atmósfera libre sobre Paraguay.

Estabilidad potencial o convectiva

Para determinar la estabilidad potencial o convectiva de una capa de aire sometida a movimientos verticales ascendentes o descendentes, se utilizó el gradiente vertical de la temperatura potencial equivalente, $\partial\theta_e/\partial z$. El criterio para estabilidad potencial o convectiva es el siguiente:

$$\partial\theta_e/\partial z > 0, \text{ convectiva o potencialmente estable.}$$

$$\partial\theta_e/\partial z < 0, \text{ convectiva o potencialmente inestable.}$$

$$\partial\theta_e/\partial z = 0, \text{ convectiva o potencialmente neutra.}$$

Para calcular la temperatura potencial equivalente (θ_e) se usó la ecuación propuesta por Bolton (1980):

$$\theta_e = \theta \exp [((3.376/T_L) - 0.00254) * W(1+0.81 \times 10^{-3}W)]$$

donde θ es la temperatura potencial, T_L es la temperatura del nivel de condensación por elevación (K) y W es la razón de mezcla (g/kg).

La Figura 8 muestra un corte vertical de θ_e . Se puede observar que los menores valores en superficie ocurren entre diciembre y marzo, con un mínimo absoluto en el mes de enero. Los mayores valores ocurren entre abril y noviembre, presentándose un máximo absoluto en el mes de mayo. Un comportamiento similar es observado aproximadamente hasta el nivel de 700 hPa. Entre 500 y 300 hPa se puede ver cómo la variación mensual de la temperatura potencial equivalente se hace menos significativa, con valores aproximadamente constantes durante todo el año.

Razón de Mezcla (g/kg)

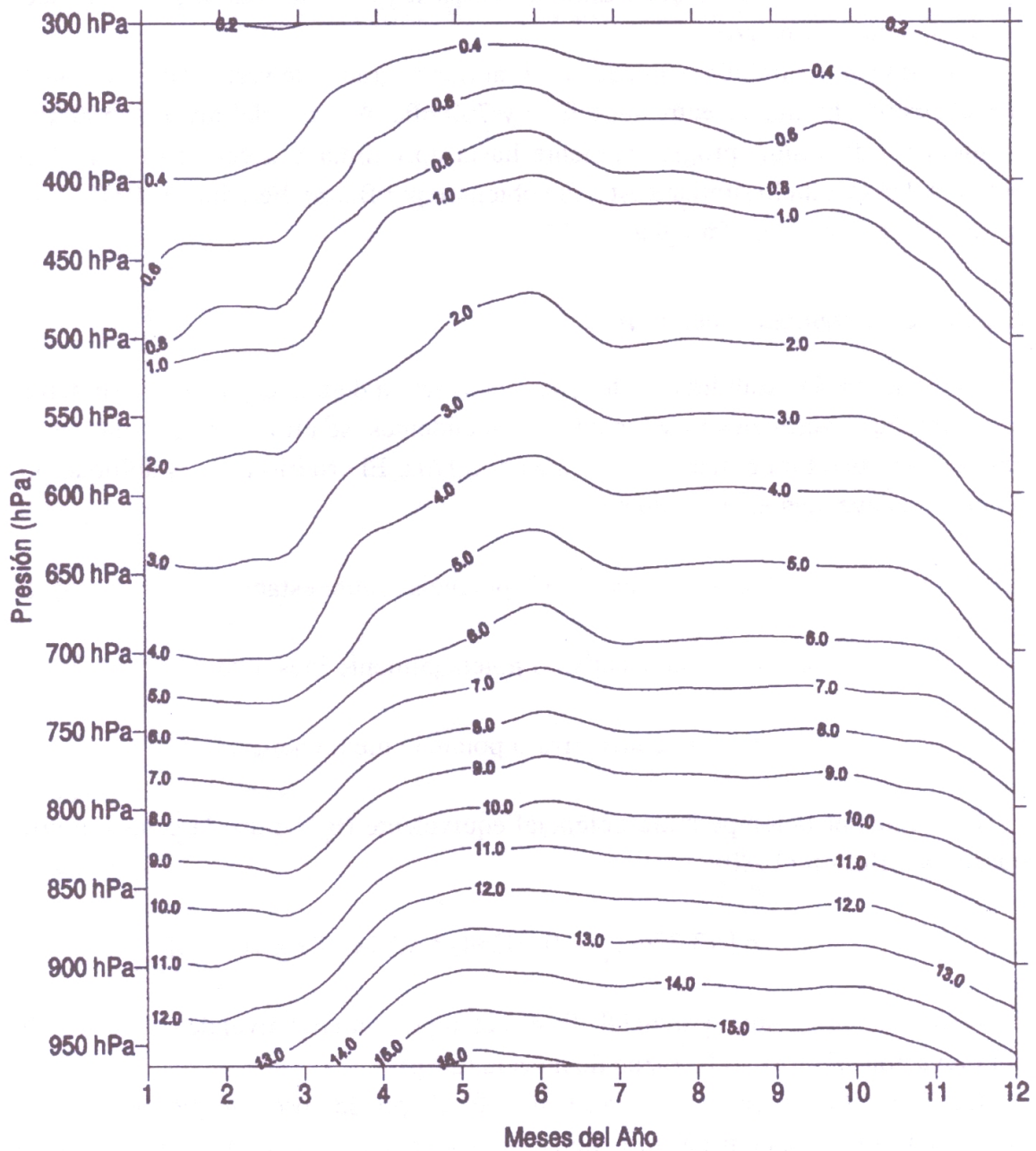


Figura 7. Corte vertical de la razón de mezcla media mensual de la atmósfera sobre la región central de Venezuela, durante el periodo 1980-1995.

Temperatura Potencial Equivalente (K)

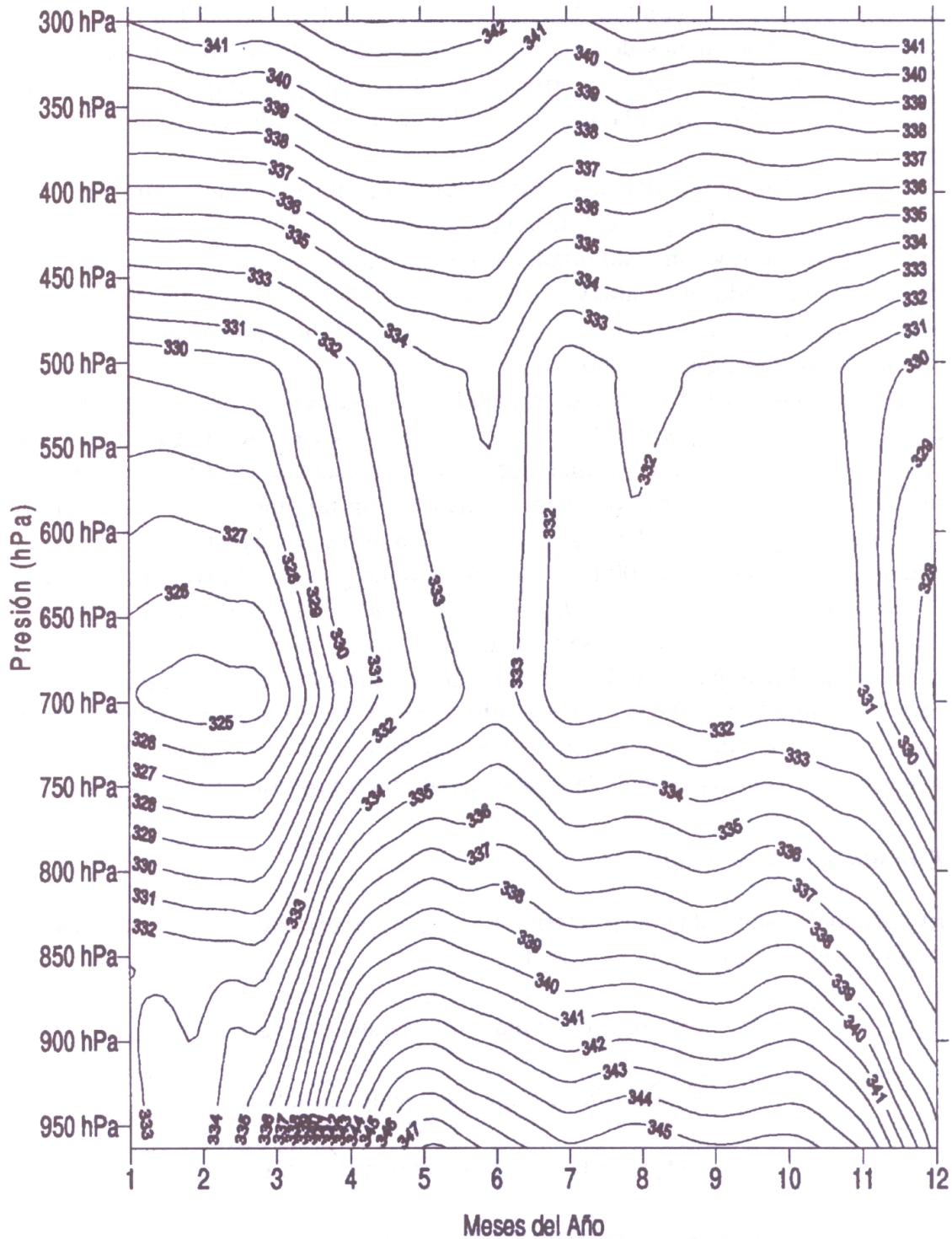


Figura 8. Corte vertical de la temperatura potencial equivalente media mensual de la atmósfera sobre la región central de Venezuela, durante el periodo 1980-1995.

Además, también se puede observar que entre la superficie y 850 hPa, el gradiente vertical de temperatura potencial equivalente presenta un comportamiento convectivamente neutro entre los meses de enero y marzo ($\partial\theta_e/\partial z = 0$). El resto de los meses disminuye con la altura ($\partial\theta_e/\partial z < 0$), presentando inestabilidad potencial en capas bajas desde finales de marzo hasta diciembre. Dicho gradiente es mucho mayor entre abril y noviembre, correspondiendo con la época lluviosa de la zona en estudio. Entre 850 y 700 hPa, hay inestabilidad potencial durante todos los meses del año.

Desde 700 hasta 500 hPa, la atmósfera es potencialmente estable entre diciembre y marzo, lo cual corresponde con la época seca. Entre abril y noviembre (meses lluviosos), se observa un comportamiento potencialmente neutro ($\partial\theta_e/\partial z = 0$), siendo aún más marcado entre julio y octubre, los cuales son los meses más lluviosos del año. De 500 a 300 hPa, se puede observar una atmósfera potencialmente estable durante todos los meses del año.

Analizando el perfil vertical de θ_e para los meses de enero y agosto, tomándolos como los meses más representativos de la estación seca y de la estación lluviosa respectivamente, se puede ver que ambos meses presentan un perfil vertical totalmente diferente. En el mes de enero se presenta un mínimo muy marcado en los 700 hPa y luego aumenta hasta los 300 hPa. En el mes de agosto, este mínimo se extiende desde 700 hasta 500 hPa, aumentando luego hasta el nivel de 300 hPa.

De acuerdo con Grandoso *et al.* (1981), éstos son perfiles típicos para convección limitada (enero) y convección severa (agosto), lo cual se puede comprobar con la cantidad de lluvia que se registra durante ambos meses en la zona. Igualmente, se hace notar que la existencia de inestabilidad potencial en la troposfera inferior es una característica de las zonas tropicales, por lo que el desarrollo vertical de las nubes convectivas depende de la estabilidad de la troposfera superior.

Estabilidad condicional

El criterio de estabilidad para determinar la estabilidad condicional de una parcela de aire es el siguiente (e.g., Holton, 1992):

$$\partial\theta_{es}/\partial z > 0, \text{ condicionalmente estable.}$$

$$\partial\theta_{es}/\partial z < 0, \text{ condicionalmente inestable.}$$

$$\partial\theta_{es}/\partial z = 0, \text{ condicionalmente neutra.}$$

Donde θ_{es} es la temperatura potencial equivalente de saturación. Para calcular θ_{es} se usó la ecuación dada por Bolton (1980):

$$\theta_{es} = \theta \exp [((3.376/T) - 0.00254) * W_s (1 + 0.81 \times 10^{-3} W_s)]$$

donde θ es la temperatura potencial, T es la temperatura proporcionada por el sondeo (K) y W_s es la razón de mezcla de saturación (g/kg).

Báez y Fernández (1995) encontraron que las ecuaciones propuestas por Bolton (1980) para θ_{es} y θ_e proporcionan una fórmula más simple comparado con los resultados de Betts y Dugan (1973) y Simpson (1978), con un error máximo de 0.3 K, siendo la principal fuente de error, la omisión de la variación del calor específico del aire seco con la temperatura y la presión.

La Figura 9 muestra un corte vertical de la temperatura potencial equivalente de saturación. Se observa que en superficie, los menores valores se presentan entre diciembre y febrero, siendo enero el mes con el menor valor en superficie. Los mayores valores se observan entre abril y agosto (el máximo absoluto se presenta en el mes de mayo).

Entre superficie y 850 hPa, se puede ver que la temperatura potencial equivalente de saturación aumenta con la altura ($\partial\theta_{es}/\partial z > 0$) entre diciembre y marzo, es decir, presenta estabilidad condicional en capas bajas. Entre abril y agosto, se observa inestabilidad condicional ($\partial\theta_{es}/\partial z < 0$) y entre septiembre y noviembre se observa un comportamiento aproximadamente neutro ($\partial\theta_{es}/\partial z = 0$).

Entre 850 y 700 hPa, se puede observar inestabilidad condicional durante todo el año. Arriba de este nivel, se puede ver que entre diciembre y marzo se presenta una atmósfera condicionalmente neutra hasta los 300 hPa. Entre mayo y noviembre se continúa observando inestabilidad condicional entre 700 y 500 hPa. Por encima de 500 y hasta 300 hPa, se presenta estabilidad condicional en estos meses.

Magnitud y dirección del viento

En la Figura 10, se puede observar la magnitud de la velocidad del viento resultante medio para el periodo 1980-1995, entre los niveles de superficie y 300 hPa. Igualmente en la Figura 11, se presenta la dirección en grados del viento vectorial medio para el mismo periodo y los mismos niveles de presión.

En dichas figuras, podemos observar que entre la superficie y 500 hPa, el viento medio durante todo el año es del este. En la superficie hay vientos del noreste durante el transcurso de todo el año, aunque dichos vientos presentan magnitudes medias siempre menores a 1 m/s. Entre 850 y 500 hPa se observan mayormente vientos del sureste, con magnitudes que oscilan entre 1.5 y 3.5 m/s, apareciendo un máximo de 3.5 m/s en julio, en el nivel de 700 hPa.

Los cambios estacionales más evidentes se observan en la alta troposfera entre los niveles de 500 y 200 hPa, en donde se presentan oestes entre noviembre y mayo. La magnitud de la velocidad del viento medio resultante aumenta hasta alcanzar valores de 7 m/s a 200 hPa en el mes de enero.

Temperatura Potencial Equivalente de Saturación (K)

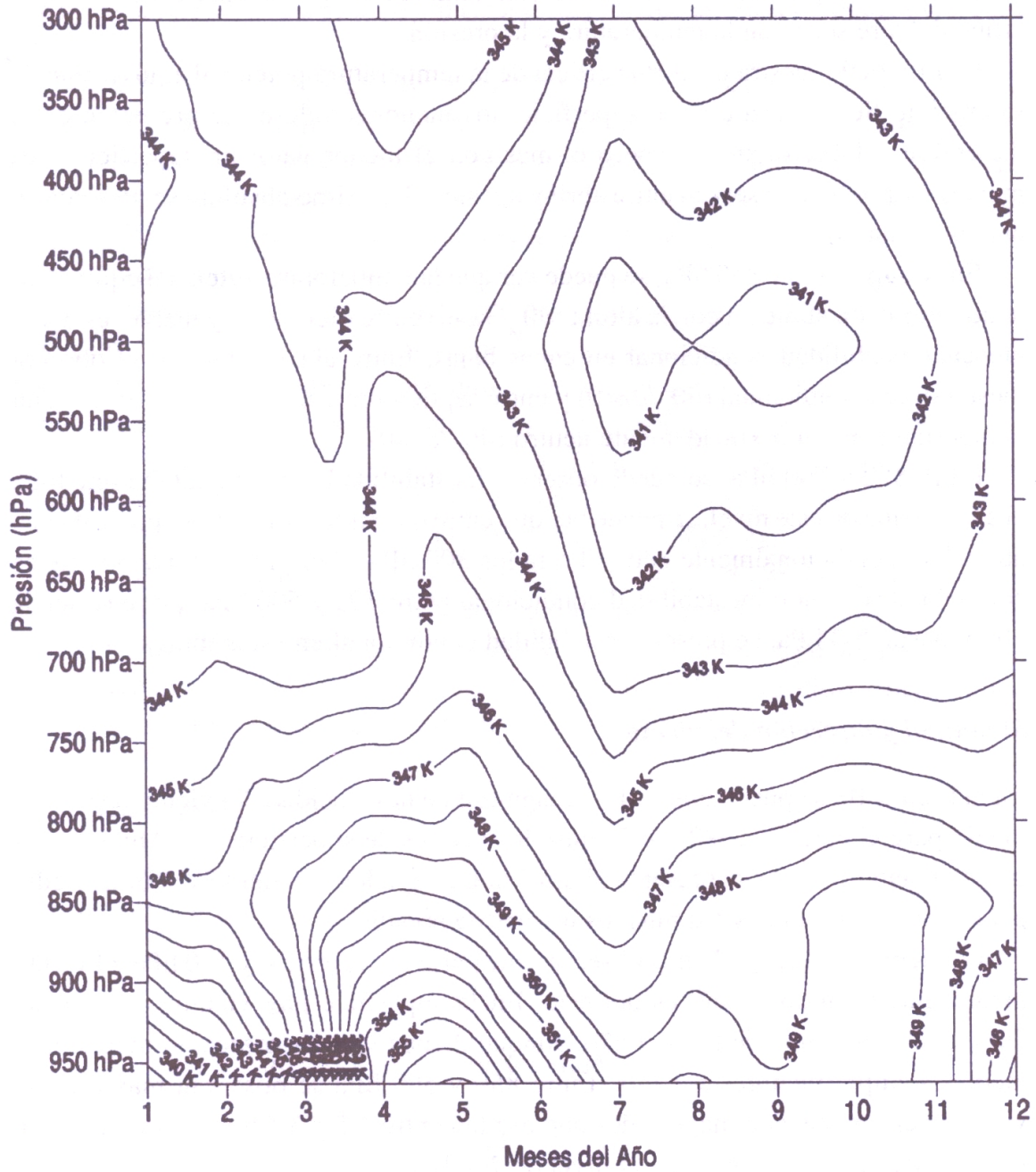


Figura 9. Corte vertical de la temperatura potencial equivalente de saturación media mensual de la atmósfera sobre la región central de Venezuela, durante el periodo 1980-1995.

Velocidad del Viento (m/s)

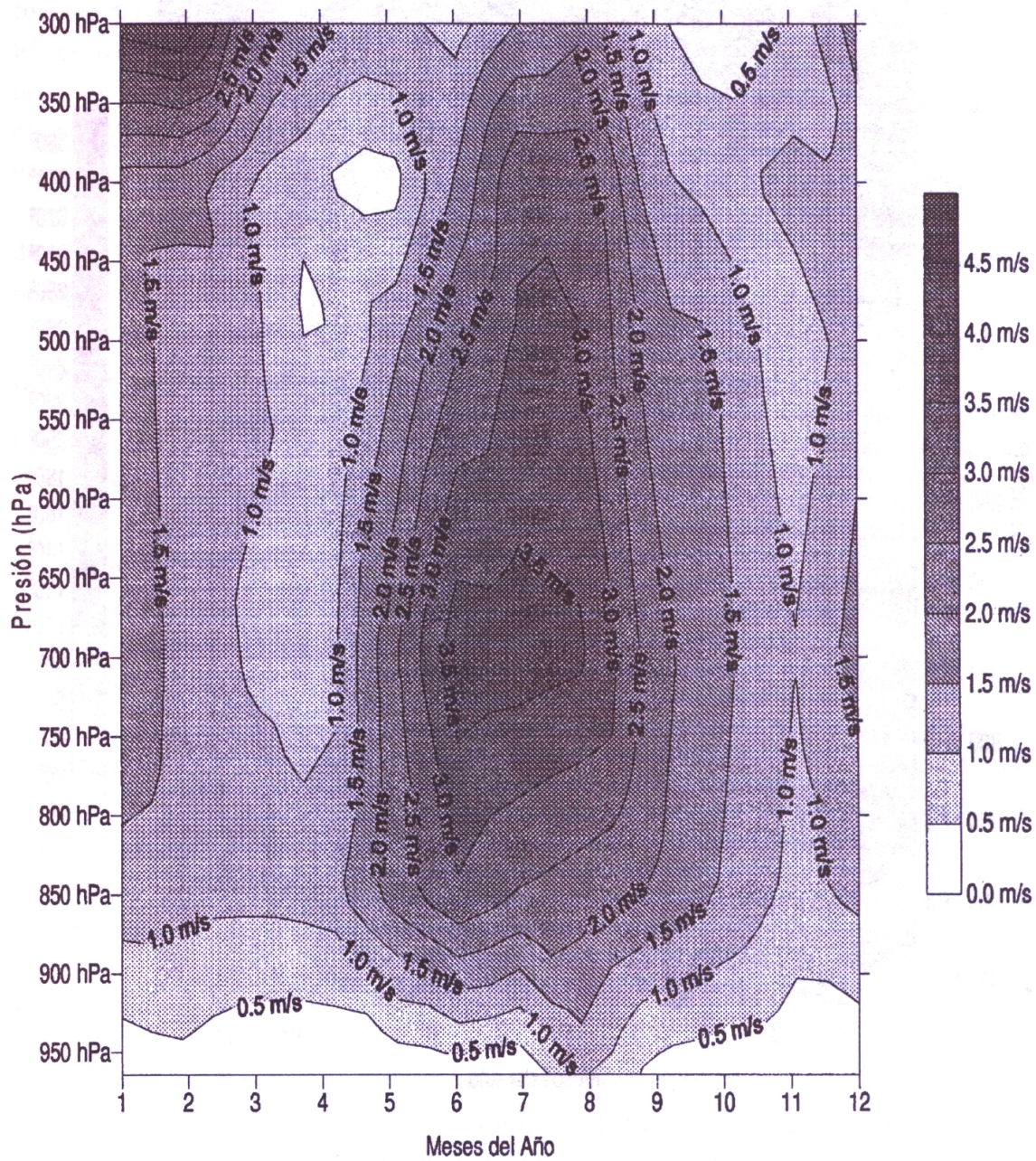


Figura 10. Corte vertical de la magnitud de la velocidad media mensual del viento resultante sobre la región central de Venezuela, durante el periodo 1980-1995.

Dirección del Viento (°)

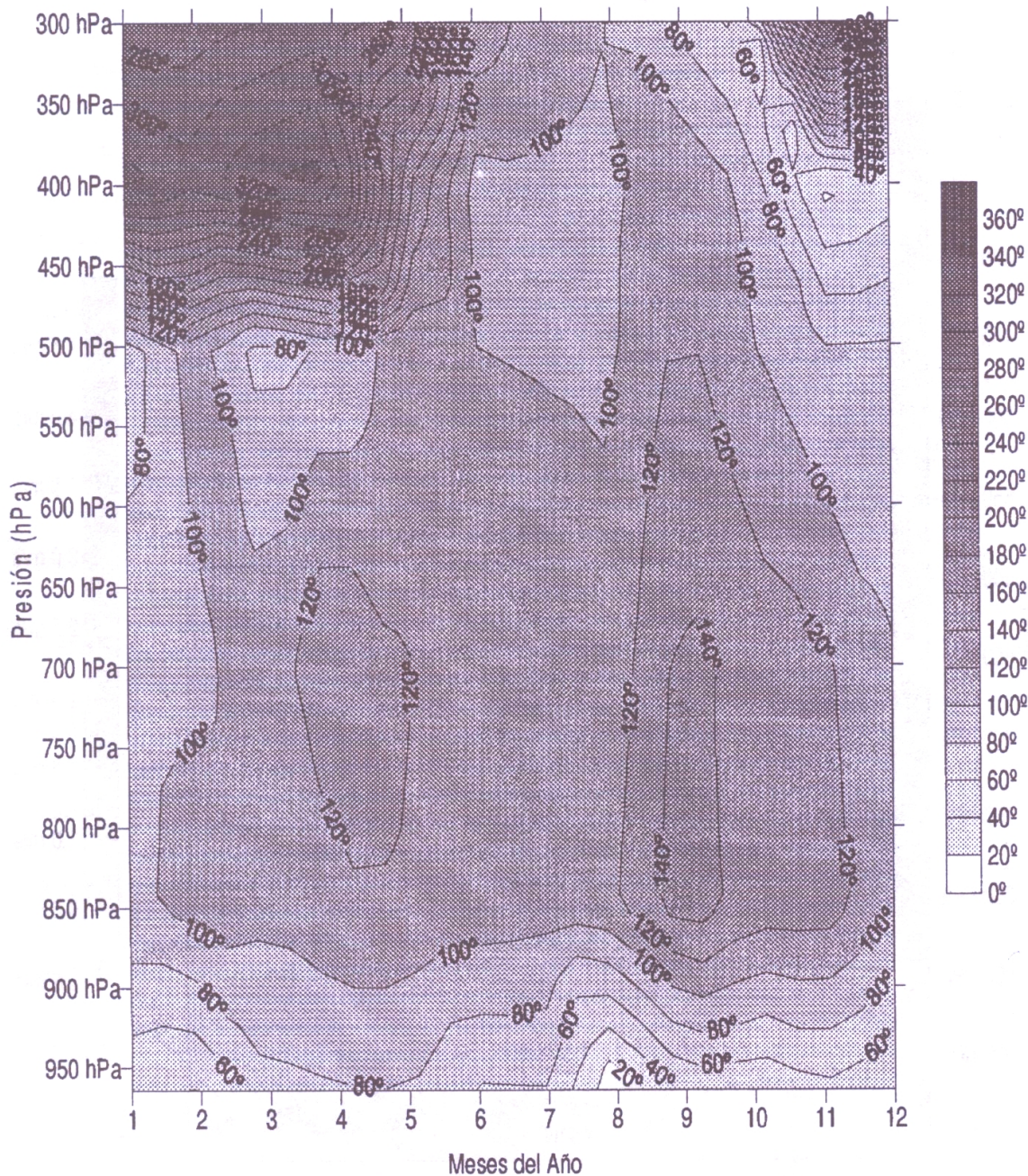


Figura 11. Corte vertical de la dirección en grados del viento medio resultante sobre la región central de Venezuela, durante el periodo 1980-1995.

Es importante notar que a partir de aproximadamente los 500 hPa, los meses que presentan oestes en la alta troposfera corresponden precisamente con la estación seca, mientras que los meses en que los vientos del este penetran hasta los niveles más altos, corresponden con los meses más lluviosos del año, tal como se puede observar en el caso del mes de agosto, en que los estes alcanzan niveles cercanos a los 200 hPa y es éste justamente el mes más lluvioso del año. Un resultado similar fue encontrado por Grandoso *et al.* (1981), en donde mencionan que la extensión de los oestes de latitudes medias hacia bajas latitudes es típica de los 10° N en los trópicos americanos en la época invernal, la cual mencionan es una característica climatológica en la latitud de Costa Rica. Por lo tanto, debido a que Maracay se encuentra a una latitud similar a la de Costa Rica, se puede verificar el mismo comportamiento de los oestes en niveles altos, aunque al comparar las magnitudes de las velocidades se encuentra que en Venezuela éstos presentan menores magnitudes que en Costa Rica.

Cortante vertical del viento

La Figura 12 muestra la variación mensual de la cortante vertical del viento, la cual se ha definido como una diferencia vectorial del viento entre los niveles de 850 y 300 hPa. Es de esperarse que los meses en que la cortante del viento es mayor, el desarrollo vertical de las nubes sea menor, impidiendo de esta forma el desarrollo de la convección. Opuesto a esto, si se presenta una cortante vertical débil, se va a facilitar el desarrollo vertical de las nubes convectivas.

En dicha figura se observa una marcada variación estacional, presentando las cortantes más débiles entre abril y noviembre (época lluviosa) y las más fuertes entre diciembre y marzo (época seca). En el mes de mayo se observa un incremento relativo con respecto a abril y junio. El máximo valor se observa en el mes de enero, correspondiente al mes con menor lluvia promedio. Por otra parte, el menor valor se presenta en agosto, que es cuando se ha manifestado la mayor cantidad de lluvia promedio.

Índice de Showalter

Un parámetro utilizado frecuentemente en forma operativa para determinar el desarrollo convectivo es el índice de Showalter (IS), propuesto por él mismo en 1953, el cual indica la estabilidad de una parcela en el nivel de 850 hPa cuando es elevada hasta los 500 hPa. Este índice se obtiene restando la temperatura de la parcela (T_p) elevada hasta el nivel de 500 hPa de la temperatura (T_s) del sondeo en el mismo nivel ($IS = T_s - T_p$). Por lo tanto, IS toma valores negativos para inestabilidad y valores positivos para estabilidad.

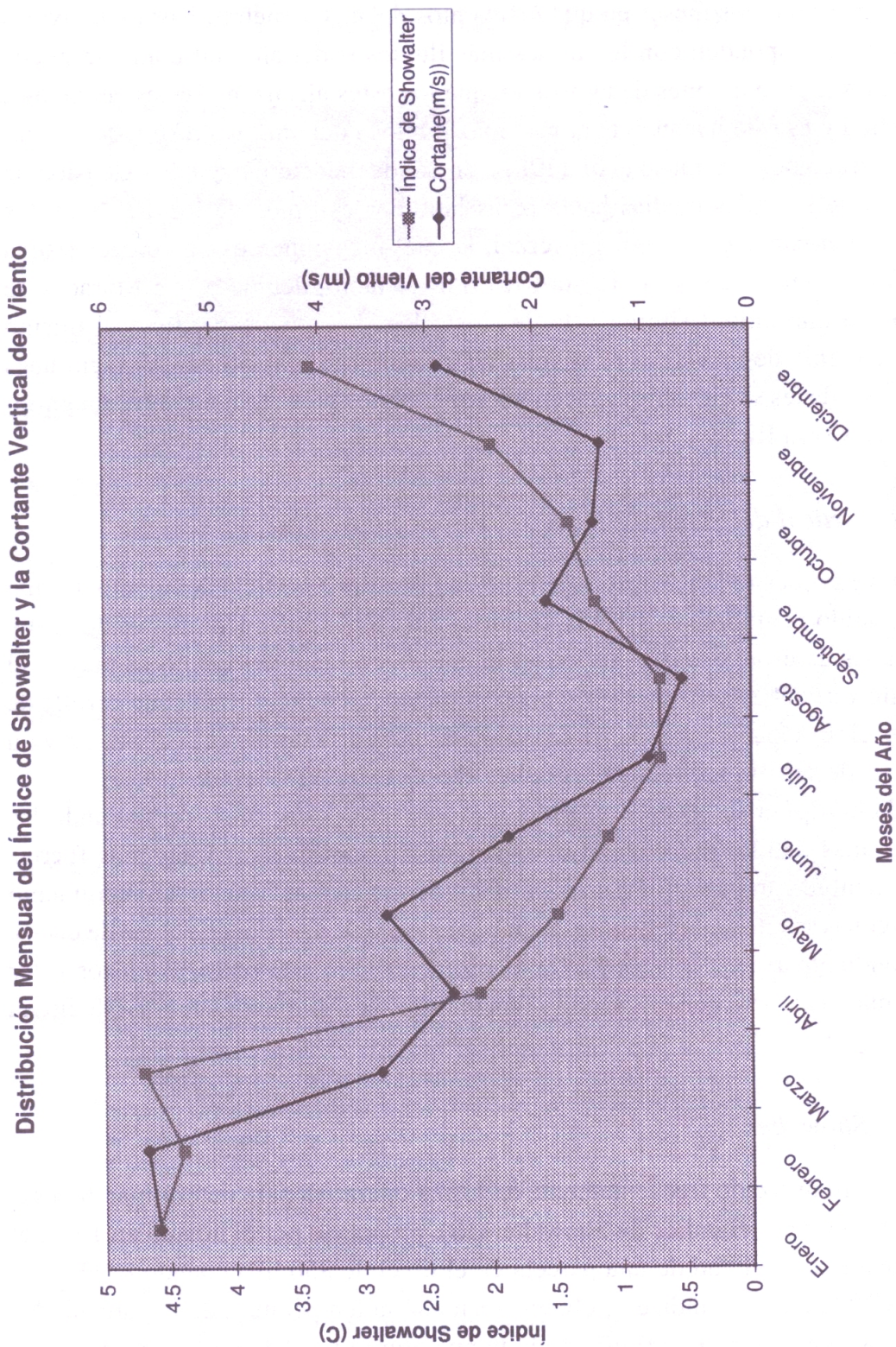


Figura 12. Distribución mensual de la cortante vertical del viento y del índice de Showalter.

Para fines de pronóstico, Showalter (1953) con base en la experiencia en latitudes medias, agrupó el rango de valores del índice de la siguiente manera: (a) Cuando el índice tiene valores entre +3 y +1, es probable la ocurrencia de aguaceros y algunas tormentas eléctricas en el área. (b) La probabilidad de tormentas eléctricas se incrementa rápidamente para valores del índice entre +1 y -2. (c) Valores del índice de -3 o menores están asociados con tormentas severas.

En la Figura 12 se puede ver la variación mensual del índice de Showalter para la estación Maracay. En esta figura se observa que entre los meses de diciembre y marzo, el valor del índice de Showalter es mayor que +3, por lo que se puede deducir que la ocurrencia de precipitación convectiva es muy improbable durante esta época. Estos meses corresponden a la estación seca en la zona.

En los meses de abril, mayo, junio, septiembre, octubre y noviembre, el índice de Showalter presenta valores entre +3 y +1, lo cual indica que es probable la ocurrencia de aguaceros y algunas tormentas.

En julio y agosto, se presentan valores del índice de Showalter entre +1 y -2, lo cual nos indica que durante este periodo la probabilidad de ocurrencia de lluvias de origen convectivo es la máxima.

Comparando la curva de la cortante del viento y la del índice de Showalter (Figura 12), se puede ver que ambas curvas presentan características similares. En cuanto al índice de Showalter, los meses que presentan el menor valor son julio y agosto, ocurriendo lo mismo con la cortante del viento. Esto explica la máxima precipitación media que se presenta en el mes de agosto e indica que ésta puede ser fundamentalmente de origen convectivo.

Conclusiones

Se hizo un análisis de las variables termodinámicas, de flujo y otros parámetros derivados (temperatura, humedad, espesor entre niveles geopotenciales, temperatura potencial equivalente y estabilidad potencial o convectiva, temperatura potencial equivalente de saturación y estabilidad condicional, magnitud y dirección del viento, cortante vertical del viento e índice de Showalter). Este análisis, correspondiente a la atmósfera libre sobre la región central de Venezuela, muestra un marcado comportamiento estacional, el cual distingue la estación seca (diciembre-marzo) y la estación lluviosa (abril-noviembre).

Las máximas temperaturas en superficie se presentan entre marzo y agosto, con máximos relativos entre abril y mayo. Luego, las temperaturas empiezan a disminuir progresivamente hasta alcanzar un mínimo en el mes de enero. Entre 850 y 150 hPa, el comportamiento es prácticamente isotérmico a lo largo de todo el año, presentando desviaciones típicas del orden de las décimas de grado. El eje de la tropopausa se ubica aproximadamente en 100 hPa, a lo largo de todos los meses del año, a una altura aproximada de 16,500 metros geopotenciales. El mínimo de temperatura por

encima de la tropopausa se alcanza durante el mes de febrero (-81.7°C) a 100 hPa. En general, los meses secos presentan menores valores de temperatura en estos niveles que en los meses lluviosos.

Tanto en la troposfera baja como en la media, los mayores espesores entre niveles geopotenciales se presentan entre abril y junio, lo cual corresponde al periodo de transición e inicio de la época lluviosa. Los meses más lluviosos (julio-septiembre), presentan los espesores más reducidos, tal como era de esperarse, de acuerdo con la disminución de temperaturas observada.

Como era de esperarse, los valores de humedad relativa y razón de mezcla, son mayores en la estación lluviosa que en la seca.

Se observa inestabilidad potencial durante la época lluviosa en capas bajas hasta aproximadamente los 700 hPa. Por encima de este nivel y hasta 500 hPa, se observa una atmósfera potencialmente neutra. En la época seca, se detecta un comportamiento potencialmente neutro en superficie y condiciones potencialmente inestables entre 700 y 500 hPa. Entre 500 y 300 hPa, la atmósfera se presenta potencialmente estable durante todos los meses del año.

Durante la estación lluviosa, ocurre inestabilidad condicional hasta el nivel de 500 hPa. Por encima de este nivel y hasta 300 hPa, ocurre estabilidad condicional durante todo el año. En la época seca se observa estabilidad condicional desde la superficie hasta 850 hPa, inestabilidad condicional de 850 a 700 hPa y una atmósfera condicionalmente neutra de 700 a 300 hPa.

En cuanto al viento medio resultante, se observan vientos del este durante todo el año, entre la superficie y 400 hPa. Entre noviembre y abril (estación seca), se presentan vientos del oeste por encima de 400 y hasta 70 hPa aproximadamente.

En cuanto a la cortante vertical del viento, se observa nuevamente una marcada variación estacional, presentándose las cortantes más débiles entre abril y noviembre (estación lluviosa) y las más fuertes entre diciembre y marzo (estación seca).

Entre diciembre y marzo, el índice de Showalter es mayor que +3, por lo que se puede deducir que la ocurrencia de precipitación convectiva es muy improbable durante esta época. Por otra parte, en julio y agosto se presentan valores del índice de Showalter entre +1 y -2, lo cual indica que la probabilidad de ocurrencia de lluvias de origen convectivo es máxima durante este periodo. El resto de los meses presentan valores entre +3 y +1, indicando que es probable la ocurrencia de aguaceros y algunas tormentas.

Entre diciembre y marzo, todos los parámetros indican que el desarrollo vertical de convección es improbable. No obstante, entre mayo y octubre (época lluviosa en Venezuela) estos parámetros muestran condiciones favorables para la ocurrencia de convección y desarrollo de nubosidad.

Agradecimientos

Uno de los autores (Luis Fernández) está profundamente agradecido con la Fuerza Aérea Venezolana por haberle otorgado la oportunidad de realizar sus estudios de Licenciatura en Meteorología en la Universidad de Costa Rica. Ambos autores agradecen las valiosas sugerencias y comentarios del Dr. Jorge Gutiérrez, del Lic. Eladio Zárate y de la Dra. Vilma Castro.

Referencias

- Aceituno, P. "On the Functioning of the Southern Oscillation in the South American Sector. Part I: Surface Climate," *Mon. Wea. Rev.*, 116, 505-524, 1988.
- . "On the Functioning of the Southern Oscillation in the South American Sector. Part II: Upper-Air Climate," *J. Climate*, 2, 341-355, 1989.
- Asnani, G., *Tropical Meteorology*, vol. I, Noble Printers Pvt. Ltd., Pune - 411002, India, 1993.
- Báez, J. y Fernández, W. "Características de la atmósfera libre sobre Paraguay y su influencia en el comportamiento estacional de la precipitación", *Revista Geofísica*, 42, 5-30, 1995.
- Betts, A. y Dugan, F. "Empirical Formula for Saturation Pseudoadiabatics and Saturation Equivalent Potential Temperature," *J. Appl. Meteor.*, 12, 731-732, 1973.
- Bolton, D. "The Computation of Equivalent Potential Temperature," *Mon. Wea. Rev.*, 108, 1046-1053, 1980.
- Fernández, W. "Environmental Conditions and Structure of Some Types of Convective Mesosystems Observed over Venezuela," *Arch. Met. Geoph. Biokl.*, A29, 249-267, 1980.
- . "A Review of Downdrafts at the Rear of Tropical Squall Lines," *Arch. Met. Geoph. Biokl.*, A31, 71-89, 1982.
- . "Radar Characteristics of Tropical Convective Systems Observed During VIMHEX-II," *Revista Geofísica*, 18/19, 99-110, 1983.
- . "VIMHEX-1972 Revisited: The Life Cycles of Two Tropical Convective Mesosystems over Land," *Meteorol. Atmos. Phys.*, 69, 67-80, 1998.
- Goldbrunner, A. *Atlas Climatológico de Venezuela, Periodo 1951-1970*, Servicio de Meteorología de la Fuerza Aérea Venezolana, 1984.
- Grandoso, H.; Montero, A. y Castro, V. "Características de la Atmósfera Libre sobre Costa Rica y sus Relaciones con la Precipitación", *Informe Semestral (enero-junio, 1981)*, Instituto Geográfico Nacional, San José, Costa Rica, 11-52, 1981.
- Holton, J. *An Introduction to Dynamic Meteorology*, Third Edition, Academic Press, 1992.

- Riehl, H. "Controls of the Venezuelan Rainy Season," *Bull. Amer. Met. Soc.*, 54, 9-12, 1973.
- . "Venezuelan Rain Systems and the General Circulation of the Summer Tropics I: Rain Systems," *Mon. Wea. Rev.*, 105, 1402-1420, 1977a.
- . "Venezuelan Rain Systems and the General Circulation of the Summer Tropics II: Relations Between Low and High Latitudes," *Mon. Wea. Rev.*, 105, 1421-1433, 1977b.
- . "On the Weather of Venezuela: A Summary Report on the Venezuelan Experiments of 1969 and 1972," NCAR, Technical Note 126, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, 1977c.
- . "Ocurrence and Structure of the Equatorial Through Zone in Venezuela," *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 105, 217-229, 1979.
- Showalter, A.K. "A Stability Index for Thunderstorm Forecasting," *Bull. Amer. Met. Soc.*, 34, 250-252, 1953.
- Simpson, R.H. "On the Computation of Equivalent Potential Temperature," *Mon. Wea. Rev.*, 106, 124-130, 1978.