

Consideraciones sobre la interpolación de elementos meteorológicos en latitudes tropicales

RAFAEL IZQUIERDO y JOSEFA ARIAS

RESUMEN

Se hace un estudio de las características de las masas de aire sobre Cayo Hueso y Caimán Grande, durante el invierno 1976-1977, realizándose un detallado análisis de la capa baja de la Troposfera sobre las estaciones señaladas, a las 1200 GMT, antes de la entrada e inmediatamente después de la entrada de los frentes en la región occidental de Cuba. Se comparan los elementos en el marco de una misma masa de aire y en el de dos masas de aire diferentes, en busca de criterios que permitan su interpolación espacial y definan los distintos tipos de frentes fríos, según la clasificación establecida por el Instituto de Meteorología de la Academia de Ciencias de Cuba.

1. INTRODUCCIÓN

La condición de estabilidad de una porción cualquiera de la atmósfera puede expresarse como una función de la temperatura y la humedad en su distribución vertical; a su vez, el análisis de estabilidad debe considerarse representativo sólo de la columna de aire sobre el punto, salvo que pueda determinarse el comportamiento espacial de los elementos que la caracterizan, realizándose siempre extrapolaciones o interpolaciones discretas.

Durante el período invernal los sistemas sinópticos más importantes son los frentes, como sistemas de baroclinicidad pronunciada, y, por ende, donde los análisis de estabilidad resultan imprescindibles para obtener los elementos necesarios de uno de los dos aspectos del pronóstico: predecir los valores de las variables meteorológicas.

Cualquier estudio que en Cuba quiera hacerse sobre el pronóstico de las gamas de precipitación, a través de la estabilidad y vinculada a las superficies frontales, necesariamente deberá tener en cuenta su comportamiento espacial de acuerdo con los distintos tipos de frentes, lo que implícitamente significa conocer el comportamiento espacial de algunos

Manuscrito aprobado el 15 de marzo de 1979.

R. Izquierdo y J. Arias pertenecen al Instituto de Meteorología de la Academia de Ciencias de Cuba.

elementos meteorológicos importantes para el cálculo de la estabilidad en una extensión adecuada, tanto horizontal como verticalmente. Para esto no debe perderse de vista que nuestra clasificación frontal está fundamentada en la intensidad de los vientos asociados a la masa de aire frío, y que los valores de intercambio entre la masa de aire continental fría y la superficie oceánica caliente son significativos, produciendo en muchas ocasiones verdaderos enmascaramientos en el comportamiento de las variables.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del trabajo, se escogieron las estaciones 72201 y 78384, ambas con condiciones geográficas similares, orientadas prácticamente de *N* a *S*, y separadas por unas 330 millas náuticas aproximadamente, la línea que las une, utilizada como línea de interpolación, cruza sobre la Provincia de Matanzas.

Se analizaron todas las cartas pseudoadiabáticas de las 1200 GMT anteriores a la entrada de los frentes en la región occidental de Cuba, o de las 1200 GMT inmediatamente después de haber penetrado en la región occidental de Cuba, garantizando de esta forma homogeneidad en la distribución vertical del flujo cuando las estaciones se encontraban en la masa de aire caliente, y una verdadera banda de discontinuidad entre ellas cuando se encontraban en masas de aire diferentes. Con este método de trabajo se perseguía: (a) obtener una condición teórica de reposo en la atmósfera, (b) obtener gamas de caracterización de los distintos tipos de frentes, tanto para el aire caliente como para el aire frío, y (c) obtener gamas cuantitativas para la interpolación de algunas variables, tanto en condiciones de homogeneidad como de no homogeneidad de la masa de aire.

Para cada frente, se trazó en un mapa la secuencia de su movimiento hasta que penetraba en la región occidental de Cuba, y la trayectoria del anticiclón frío a él vinculado con su valor central. Con esta fuente de datos se confeccionaron las tablas que se adjuntan, para cada uno de los elementos analizados. En todos los casos se utilizó la nomenclatura oficial del Instituto de Meteorología de la Academia de Ciencias de Cuba para la clasificación de los frentes fríos. El análisis de las cartas pseudoadiabáticas se realizó mediante el método convencional (SAUCIER, 1965).

El comportamiento de la temperatura potencial se analizó no bajo el precepto de su definición teórica de "la temperatura de una masa de aire húmedo que no contiene fase condensada de agua, llevada a la presión normal de 1 000 milibares mediante un proceso adiabático reversible, durante el cual la masa de aire no llega a estar saturada" (DUFOUR, 1966), sino bajo la definición práctica de trabajo de la temperatura potencial parcial con respecto al aire seco, o sea, "la temperatura que tendrá la partícula si se reduce adiabáticamente de la presión ejercida exclusivamente por el aire seco, a una presión de 1 000 milibares" (DUFOUR, 1966). No resulta necesario resaltar la importancia del estudio de esta variable como elemento determinante para la obtención del grado de estabilidad (AIR WEATHER SERVICE, 1948). De igual forma debe destacarse que pudo haberse utilizado cualquiera de las temperaturas potenciales definidas para el caso de transformaciones adiabáticas reversibles, o de temperaturas pseudopotenciales para el caso de las transformaciones pseudoadiabáticas pseudorreversibles.

Se analizó el gradiente vertical de la temperatura adiabática, aunque podía haberse hecho el mismo estudio con la temperatura potencial, utilizándose como elemento de identificación de la trayectoria de la corriente de aire (MILLER, 1948), sin perder de vista sus variaciones en las capas bajas producto de la radiación y la

turbulencia (NAMIAS, 1940). Como en el caso anterior, no resulta necesario destacar la importancia de este elemento en el cálculo de la estabilidad vertical, el viento térmico y la convección (HALTINER y MARTIN, 1968).

El resto de las variables estudiadas, o sea, el nivel de condensación por ascenso (NCA), el nivel de congelación, la humedad relativa (HR), y la capa de inversión de la temperatura más próxima a la superficie de la tierra, quedan enmarcadas en el tópico de la Humedad y su selección responde a la necesidad de conocer el comportamiento de los contenidos de vapor de agua por niveles y capas, vinculado a los diferentes tipos de frentes fríos y su distribución entre las dos estaciones.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Temperatura potencial

Este elemento se analizó para todos los niveles de presión constante en la troposfera baja, haciéndose énfasis en los frentes del tipo Moderado clásico y Débil clásico, teniendo en cuenta, en cada caso, la masa de aire sobre la estación.

Los resultados demuestran que para una masa de aire caliente, sobre la estación 78384, las diferencias de los valores máximos entre los frentes Moderados clásicos y Débiles clásicos oscila de 3 a 1 grado Kelvin (K), los valores mínimos entre 3 y 2 grados K, y los medios entre 1,5 y 0,4 grados K (Tabla 1).

Para una masa de aire caliente sobre la estación 72201, las diferencias de los valores máximos de la temperatura potencial entre estos frentes,

TABLA 1. Temperatura Potencial. Las estaciones en la masa de aire caliente.

Milibares	Débil clásico (K)	Moderado clásico (K)	Diferencia (K)
Estación 78384 (valor máximo reportado)			
1 000	300	299	1
850	303	305	2
700	313	316	3
500	327	328	1
Estación 78384 (valor mínimo reportado)			
1 000	293	295	2
850	302	300	2
700	307	310	3
500	324	322	2
Estación 78384 (valor medio hallado)			
1 000	297,2	297,8	0,6
850	302,6	302,2	0,4
700	311,2	312,7	1,5
500	325,2	324,4	0,8

por niveles, oscila entre 3 y 1 grado K, los mínimos entre 11 y 3 grados K, y los medios entre 11,2 y 1,4 grados K (Tabla 2).

Para una masa de aire frío sobre la estación 72201, las diferencias de los valores máximos oscila entre 6 y 1 grado K, los mínimos entre 4 y 2 grados K, y los medios entre 0 y 1,2 grados K (Tabla 3).

TABLA 2. Temperatura Potencial. Las estaciones en la masa de aire caliente.

Milibares	Débil clásico (K)	Moderado clásico (K)	Diferencia (K)
Estación 72201 (valor máximo reportado)			
1 000	296	297	1
850	302	303	1
700	311	314	3
500	325	326	1
Estación 72201 (valor mínimo reportado)			
1 000	295	284	11
850	302	293	9
700	309	306	3
500	323	318	5
Estación 72201 (valor medio hallado)			
1 000	295,5	292,8	2,7
850	302,0	299,2	2,8
700	310,0	298,8	11,2
500	324,0	322,6	1,4

TABLA 3. Temperatura Potencial. La estación en la masa de aire frío.

Milibares	Débil clásico (K)	Moderado clásico (K)	Diferencia (K)
Estación 72201 (valor máximo reportado)			
1 000	298	296	2
850	302	303	1
700	308	314	6
500	328	328	0
Estación 72201 (valor mínimo reportado)			
1 000	288	291	3
850	299	296	3
700	313	309	4
500	321	319	2
Estación 72201 (valor medio hallado)			
1 000	292,8	292,8	0,0
850	300,6	300,6	0,0
700	310,6	310,4	0,2
500	324,4	323,2	1,2

Las diferencias mayores entre los tipos se presentaron en la masa de aire caliente antes de la entrada de los frentes, en la estación 72201, fundamentalmente en los valores mínimos y medios. En el resto de los casos estos valores oscilaron entre 0 y 6 grados K. Para tener una idea de las gamas normales de variación de la temperatura potencial, baste señalar que para los espesores 1 000-850 mb y 850-700 mb, considerando la temperatura adiabática 0 grados C y la atmósfera standard, sus variaciones deben ser de 11,8 y 16,4 grados K, respectivamente.

El número de veces que para cualquier tipo de frente y masa de aire sobre las estaciones, la diferencia por niveles de presión constante, osciló entre 0 y 3 grados K, representa el 67 % de los casos analizados; el 33 % restante corresponde a variaciones mayores de 4 grados K (Tabla 5).

TABLA 4. Temperatura Potencial. Gama de exactitud en la interpolación de la temperatura potencial para una masa de aire caliente o diferentes masas de aire sobre las estaciones.

Masa de aire caliente sobre las estaciones	
1 000 mb	más-menos 1 grado K
850	más-menos 5 grados K
700	más-menos 1 grado K
500	más-menos 2 grados K
Masas de aire diferentes sobre las estaciones	
1 000 mb	más-menos 3 grados K
850	más-menos 2 grados K
700	más-menos 1 grado K
500	más-menos 2 grados K

TABLA 5. Temperatura Potencial. Comportamiento de las diferencias para cualquier tipo de frente, masa de aire sobre las estaciones, y nivel de presión constante.

Diferencias entre 0 y 3 grados K	%	Diferencias iguales o mayores de 4 grados K	%
62 veces	67	30 veces	33

TABLA 6. Variación latitudinal de la razón de cambio vertical de la temperatura.

Capa (mb)	Moderado clásico (°C)	Todos los tipos (°C)	Diferencia (°C)
Las dos estaciones en la misma masa de aire			
1 000-850	1,9	1,9	0,0
850-700	3,2	2,7	0,5
Las estaciones en diferentes masas de aire			
1 000-850	4,3	4,2	0,1
850-700	3,7	2,3	1,4

3.2 Variación latitudinal de la razón de cambio vertical de la temperatura

Este elemento, en las capas 1 000-850 mb y 850-700 mb, se analizó considerando primero que las dos estaciones se encontraban en la misma masa de aire y, posteriormente, que las estaciones se encontraban en masas de aire diferentes (Tabla 6).

Debe destacarse que los valores mayores de las variaciones quedaron enmarcados en los casos de masas de aire diferentes para la capa 1 000-850 mb, fundamentalmente a consecuencia de los mecanismos de intercambio. No obstante la razón de cambio latitudinal, medida en grados Centígrado por milla náutica no excede nunca, en la capa más baja, a magnitudes del orden de las centésimas, y en la capa más alta a valores del orden de las milésimas (Tabla 7).

TABLA 7. Variación latitudinal de la razón de cambio vertical de la temperatura. Variación de los valores medios en grados Centígrados por milla náutica.

Capa (mb)	Valor medio (°C)	Grados C/m. n.
Las dos estaciones en la misma masa de aire		
1 000-850	1,86	0,0056
850-700	2,68	0,0081
Las estaciones en diferentes masas de aire		
1 000-850	4,21	0,012
850-700	2,26	0,0068

3.2 Variación latitudinal de la razón de cambio vertical de la temperatura

De los casos estudiados, el 94 % corresponde a inversiones por enfriamiento nocturno, cuya existencia y espesor dependen de las características del lugar y la masa de aire que sobre él se encuentra; por este motivo no puede considerarse como elemento interpolable.

Del total de inversiones recogidas en la muestra de datos, el 71 % se registró en la estación 78384 cuando sobre ella se encontraba una masa de aire caliente. Su espesor nunca fue mayor de 20 mb ni menor de 10 mb; el valor medio computado fue de unos 17 mb.

Se halló que la mayor profundidad se alcanza antes de la entrada de los frentes del tipo Moderado clásico y Moderado reversino; la menor se alcanzó antes de la entrada de los frentes del tipo Débil clásico y Débil reversino, como regla general.

La estación 72201 registró el 18 % de las inversiones estudiadas, seis de las cuales corresponden al tipo de enfriamiento nocturno con un espe-

sor medio de unos 17 mb y valores máximo y mínimo de 20 y 13 mb, respectivamente. Los espesores mayores se alcanzaron antes de la entrada de los frentes del tipo Moderado clásico y los menores en los del tipo Débil clásico.

El resto de las inversiones no fue computado por no poderse determinar con exactitud su origen.

3.4 Nivel de condensación por ascenso

El nivel de condensación por ascenso se analizó sin tener en cuenta el efecto de la turbulencia en la capa de mezclamiento.

Se halló que estando las dos estaciones inmersas en la misma masa de aire, la diferencia de altura del NCA, entre una y otra, es de unos 12 mb. Las variaciones de las alturas máximas y mínimas son del orden de los 28 y 12 mb, respectivamente (Tabla 8).

Cuando las masas de aire sobre las estaciones eran diferentes, los valores obtenidos fueron: diferencia de la altura media, 14 mb; diferencia de la altura mínima, 10 mb; y diferencia de la altura máxima, 28 mb. Es fácil apreciar que aun en el caso de contraste extremo, las diferencias en las alturas son discretas, por lo que resulta válido suponer continua la estructura y distribución nubosa asociada a la banda frontal en movimiento entre las dos estaciones.

En el 83 % de los casos la magnitud de la variación de altura, expresada en mb/milla náutica, es del orden de las centésimas.

TABLA 8. Nivel de condensación por ascenso. Comportamiento de la altura del NCA para cualquier tipo de frente de acuerdo a la masa de aire imperante.

Altura	Milibares
Estación 78384 en la masa de aire caliente	
Media	994
Mínima	1 010
Máxima	958
Estación 72201 en la masa de aire caliente	
Media	982
Mínima	1 008
Máxima	930
Estación 72201 en la masa de aire frío	
Media	980
Mínima	1 000
Máxima	930

Cuando se tuvo en cuenta, además de la masa de aire, el tipo de frente, se encontró (Tabla 9) que los frentes del tipo Moderado clásico producen diferencias de hasta 14 mb en la altura media del NCA, entre las dos estaciones, al igual que los frentes Débiles clásicos.

Cuando sobre las estaciones las masas de aire son diferentes, la diferencia obtenida entre las alturas medias, para el caso de los frentes Moderados clásicos, fue de 27 mb.

TABLA 9. Nivel de condensación por ascenso. Comportamiento de la altura del NCA de acuerdo a los distintos tipos de frentes y masas de aire sobre las estaciones.

	Moderado clásico (mb)	Débil clásico (mb)	Diferencia (mb)
Las dos estaciones en el marco de la misma masa de aire			
78384	997	999	2
72201	984	985	1
Diferencia	13	14	
Las estaciones en diferentes masas de aire			
78384	997	999	2
72201	970	982	12
Diferencia	27	16	

3.5 Nivel de congelación

La diferencia de altura del nivel de congelación presentó un valor de 35 mb en su altura promedio al analizarse las dos estaciones en el marco de la masa de aire caliente, y de 39 mb al encontrarse en diferentes masas de aire. Esta diferencia no acentuada obedeció básicamente a que la estación 72201 no se encontraba influenciada, en toda la troposfera baja, por la masa continental fría. No obstante, se pudo comprobar que, a consecuencia de lo pronunciado de las pendientes frontales y el acentuado intercambio de calor entre la masa de aire frío y la superficie oceánica caliente, esta diferencia aun en los casos extremos, oscila entre los 45 y los 15 mb.

Si para los casos de masas de aire diferentes sobre las estaciones, calculamos la variación latitudinal de la altura promedio en mb/milla náutica, entre los dos puntos, podemos hallar que resulta una magnitud del orden de las centésimas, por lo que al igual que en el caso del NCA este elemento es posible interpolarlo con un margen de seguridad apreciable.

Para la estación 78384 se encontró que la variación de altura, en una masa de aire caliente, teniendo en cuenta los distintos tipos de frentes, oscilaba alrededor de los 41 mb. La estación 72201, bajo las mismas con-

diciones, presentó el valor de 12 mb, y bajo las condiciones de una masa de aire frío, el valor de 25 mb.

3.6 Humedad relativa

Los valores de la humedad relativa se calcularon sólo teniendo en cuenta la masa de aire sobre la estación, no el tipo de frente (Tabla 10). Si consideramos masas de aire diferentes sobre las estaciones y reducimos el intervalo de variación latitudinal a una milla náutica, se obtiene que en el nivel de los 1 000 mb la diferencia del valor medio de humedad relativa es 0 % y en los 850 y 700 mb las magnitudes son del orden de las centésimas. Para los valores máximos, en 1 000, 850, y 700 mb, las magnitudes oscilan entre las milésimas y las centésimas. Para los valores mínimos en 1 000, 850, y 700 mb, las magnitudes arrojan valores del orden de las décimas y 0 %. Por ello son aplicables las mismas consideraciones hechas para el NCA y el nivel de congelación.

TABLA 10. Comportamiento de la Humedad Relativa de acuerdo al tipo de masa de aire sobre las estaciones.

Milibares	Diferencia del valor medio (%)	Diferencia del valor máximo (%)	Diferencia del valor mínimo (%)
Las dos estaciones en el marco de la misma masa de aire			
1 000	2	6	1
850	7	2	17
700	15	6	3
Las estaciones en diferentes masas de aire			
1 000	0	2	0
850	11	8	36
700	27	8	0

3.7 Razón de cambio vertical de la temperatura

Para la muestra de datos analizada mediante el método de las diferencias finitas (ARNASON, 1967), en las dos capas más próximas a la superficie de la Tierra, se encontró que en todos los casos los mayores gradientes verticales aparecen en la capa 1 000-850 mb, excepto en las masas de aire frío, en las que la razón de cambio más pronunciada se localiza en la capa 850-700 mb (Tablas 11 y 12).

Es necesario destacar, como elemento de comparación, para tener una idea de la gama de variación de la temperatura verticalmente, que si el ascenso de la masa fuera adiabático seco, el gradiente en la capa 1 000-850 mb debe ser 14 grados C, y en la capa 850-700 mb unos 16 grados C. Si por el contrario el ascenso fuera pseudoadiabático, el gradiente

TABLA 11. Razón de cambio vertical de la temperatura de acuerdo a los tipos de frentes y masas de aire (Estación 78384).

Milibares	Valor medio (C)	Valor máximo (C)	Valor mínimo (C)	Valor medio (C)		
				Débil clásico	Moderado clásico	Diferencia
En la masa de aire caliente						
1 000-850	9,3	11,0	6,3			
850-700	6,7	11,0	4,0			
En la masa de aire caliente de acuerdo con los tipos de frentes						
1 000-850				9,6	8,9	0,7
850-700				6,0	8,1	2,1

TABLA 12. Razón de cambio vertical de la temperatura de acuerdo a los tipos de frentes y masas de aire (Estación 72201).

Milibares	Valor medio (C)	Valor máximo (C)	Valor mínimo (C)	Valor medio (C)		
				Débil clásico	Moderado clásico	Diferencia
En la masa de aire caliente						
1 000-850	7,6	8,2	5,7			
850-700	6,7	12,0	0,1			
En la masa de aire caliente de acuerdo con los tipos de frentes						
1 000-850				7,9	8,2	0,3
850-700				5,7	7,0	1,3
En la masa de aire frío						
1 000-850	5,5	10,5	5,0			
850-700	7,8	14,5	5,0			
En la masa de aire frío de acuerdo con los tipos de frentes						
1 000-850				6,0	4,7	1,3
850-700				6,1	9,0	2,9

vertical de la temperatura en la capa 1 000-850 mb debe ser 6 grados C y en la capa 850-700 mb debe tener el mismo valor.

4. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que las diferencias en los valores de la temperatura potencial encontrados pueden despreciarse y que es válido inferir que los tipos de frentes no se relacionan con ellos.

En general la temperatura potencial puede considerarse como elemento interpolable entre las dos estaciones y la gama de exactitud; cuando la interpolación se realiza en una masa de aire caliente por niveles de presión constante es de ± 1 grado K en el nivel de los 1 000 mb, ± 5 grados K en el nivel de los 850 mb, y de ± 1 grado K en el nivel de los 700 mb (Tabla 4). Cuando las estaciones se encuentran en diferentes masas de aire, las gamas de exactitud por niveles son de ± 3 grados K para los 1 000 mb, ± 2 grados K para los 850 mb, y ± 1 grado K para los 700 milibares.

Las diferencias de la variación latitudinal de la razón de cambio vertical de la temperatura no parecen estar relacionadas con los tipos de frentes próximos a afectar. De los resultados se desprende, para la muestra de datos analizada, que el gradiente vertical de la temperatura, tratado por capas y teniendo en cuenta las características de las masas de aire, es un elemento que permite ser interpolado, fundamentalmente en el espesor 850-700 mb, aun cuando se traten masas de aire diferentes. Los tipos de frentes no parecen estar vinculados a las gamas de variación por capas de este elemento.

Los mecanismos de intercambio pueden modificar hasta diez veces los valores de la razón de cambio latitudinal en la capa más próxima a la superficie de la Tierra.

Aunque la muestra de datos no permite establecer conclusiones definitivas, los resultados hacen suponer que para una misma masa de aire afectando las dos estaciones, la altura del nivel de condensación por ascenso no está en dependencia del tipo de frente que se aproxima, o sea, es independiente de la dirección y el sentido del transporte de masa en el aire caliente, al menos mientras éste sea del primero o segundo cuadrantes. Sin embargo, las diferencias se hacen acentuadas entre los tipos de frentes cuando a una de las estaciones se superpone un flujo del cuarto cuadrante. En esto influye determinantemente la superficie oceánica subyacente y la rapidez del movimiento en la masa de aire frío. No obstante, el rango de variación nunca excedió los 10 mb.

RECONOCIMIENTO

Queremos dejar constancia de nuestro agradecimiento a la colega Pilar Pérez Vázquez, por el trabajo realizado en la obtención y verificación de la fuente de datos utilizada, y al compañero Miguel Naranjo Quintas por la esmerada asistencia técnica brindada.

REFERENCIAS

- AIR WEATHER SERVICE. (1948): *Constant pressure analysis and forecasting manual*. Air Weather Service, Manual 105-0-1, Headquarters Air Weather Service, 75 pp.
- ARNASON, G. (1967): A case study of validity of finite difference approximation in solving dynamics stability problems. *J. Atms. Soc.*, 24(1):5-32.

- DUFOUR, L. (1966): *Sobre la noción de la temperatura potencial*. Instituto Real Meteorológico de Bélgica. Serie b, 50:10-48.
- HALTINER, J., y MARTÍN, L. (1968): *Dynamical and physical meteorology*. Instituto del Libro, La Habana, 470 pp.
- MILLER, J. (1948): *Studies of large scale vertical motions of the atmosphere*. *New York Univ. Meteorol. Pap.*, 1(1):1-24.
- NAMIAS, J. (1940): *Introducción al estudio de las masas de aire y el análisis isentrópico*. American Meteorological Society, Massachusetts, 232 pp.
- SAUCIER, W. (1965): *Principles of meteorological analysis*. Instituto del Libro, La Habana, 438 pp.

ABSTRACT

Characteristics of the masses of air in Key West and Caiman Brack were studied during the winter of 1976-1977, making a detailed analysis of the layer of the Troposphere upon the mentioned station, at 1200 GMT, before the arrival and immediately after the arrival of cold fronts in the western region of Cuba. The elements are compared in the frame of the same mass of air and of two different masses of air, in search of criteria for their spatial interpolation and for the definition of the different types of fronts, according to the established classification of the Meteorological Institute of the Academy of Sciences of Cuba.

CDU 551:510:536