

Comunicación B-3

CAMPOS Y TRAYECTORIAS SOBRE SUPERFICIES ISENTRÓPICAS EN SAIDAS

A. García Méndez *
F. Elizaga Rodríguez

STAP (INM)

* Afiliación actual ECMWF

RESUMEN

En este trabajo se presenta la técnica de análisis isentrópico desarrollada recientemente por el STAP en el entorno SAIDAS. A partir de los campos básicos de un modelo numérico, la técnica calcula diferentes campos (presión, componentes de viento, vorticidad potencial, etc) sobre la superficie isentrópica elegida. Además, una vez calculados los campos para dos o más instantes, es posible obtener trayectorias sobre esa superficie. Se describe en primer lugar el esquema de cálculo usado para generar los campos y, posteriormente, se muestran algunos ejemplos del uso del análisis isentrópico como herramienta de diagnóstico.

1. Introducción

Los conceptos teóricos relacionados con el análisis isentrópico, aunque conocidos desde hace tiempo, han ido paulatinamente cayendo en desuso en las prácticas operativas de la mayor parte de los centros dedicados a la predicción, quizás debido a que la generación de mapas sobre superficies isentrópicas en tiempo real no es una tarea sencilla. Sin embargo, la posibilidad de usar los campos que pueden obtenerse sobre estas superficies ha sido siempre considerada de gran utilidad como herramienta de diagnóstico, principalmente por lo que respecta al análisis y estructura de las distintas masas de aire. El hecho que confiere toda su importancia al análisis isentrópico es que, siempre que los procesos de condensación, evaporación y cualquier otra fuente de calentamientos (o enfriamientos) diabáticos puedan considerarse despreciables, las parcelas de aire conservarán en su movimiento su temperatura potencial (o su entropía). De esta forma, y es la principal ventaja con respecto al análisis clásico con la presión como coordenada vertical, la evolución a escala sinóptica de las estructuras meteorológicas es más fácilmente abordable, debido al alto grado de conservación que muestran en el sistema de referencia isentrópico. En particular, todos los conceptos asociados a la conservación de la vorticidad potencial pueden ser aplicados de forma amplia, aunque el predictor haya de tener siempre presente que en las evoluciones de las diferentes estructuras los efectos de fricción y diabáticos (que, aunque se desprecien, siempre están presentes) modificarán en mayor o menor medida las conclusiones obtenidas.

A la hora de usar mapas sobre superficies isentrópicas existen diferencias con respecto a los mapas sobre superficies isobáricas. En condiciones normales, con la temperatura potencial incrementándose con la altura, las superficies isentrópicas se inclinan con la altura hacia el aire frío, de forma que las depresiones o bajas en superficie, que son centros cálidos, se corresponden con áreas de alta presión. Además, la proporción de mezcla se conserva siguiendo el flujo en condiciones adiabáticas, de forma que las parcelas de aire que fluyen sobre una superficie isentrópica retienen su proporción de mezcla hasta que se alcanza la condensación; posteriormente, la parcela se mueve hacia una superficie de temperatura potencial mayor, siguiendo una trayectoria adiabática húmeda en la que se conserva la temperatura potencial del termómetro húmedo.

Probablemente, uno de los aspectos más interesantes de este tipo de mapas es que permiten diagnosticar el movimiento vertical. Se demuestra fácilmente que, si se supone que las características sinópticas se mueven sin cambio de forma a velocidad casi uniforme, el movimiento vertical puede evaluarse midiendo la advección de la presión por el viento relativo al sistema. Esa suposición implica que el cambio local de temperatura potencial (6) en un punto se calcula a partir de la velocidad de traslación del sistema (C) y del gradiente local VO:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\bar{C} \nabla \theta \quad [1]$$

de forma que:

$$\omega \simeq V_r \left(\frac{\partial p}{\partial s} \right)_\theta \quad [2]$$

donde s es la coordenada natural a lo largo del flujo y V_r el viento relativo. Así, para procesos adiabáticos secos y superficies isentrópicas que se trasladan de forma estacionaria, existirá movimiento ascendente si el viento relativo fluye hacia presiones más bajas y descendente si lo hace hacia presiones más altas. Debe tenerse en cuenta que es el viento relativo el que aparece en la fórmula y, por tanto, para aplicar correctamente esa fórmula debe restarse el movimiento de traslación del sistema del flujo absoluto.

2. Cálculo de campos sobre superficies isentrópicas

Para poder realizar la **interpolación** necesaria desde unos campos con la coordenada como coordenada vertical a la superficie isentrópica elegida, lo primero que hay que hacer es simular estaciones con los perfiles verticales. Para ello se ha diseñado un esquema de extracción de datos en el que, para cada columna del *grid* original, se leen los datos de todos los niveles para cada una de las filas. Una vez simuladas todas las estaciones de una columna, se calcula el perfil de temperatura potencial (θ), geopotencial (z), razón de mezcla (q) y viento para cada una [véase la Fig. 1.a)].

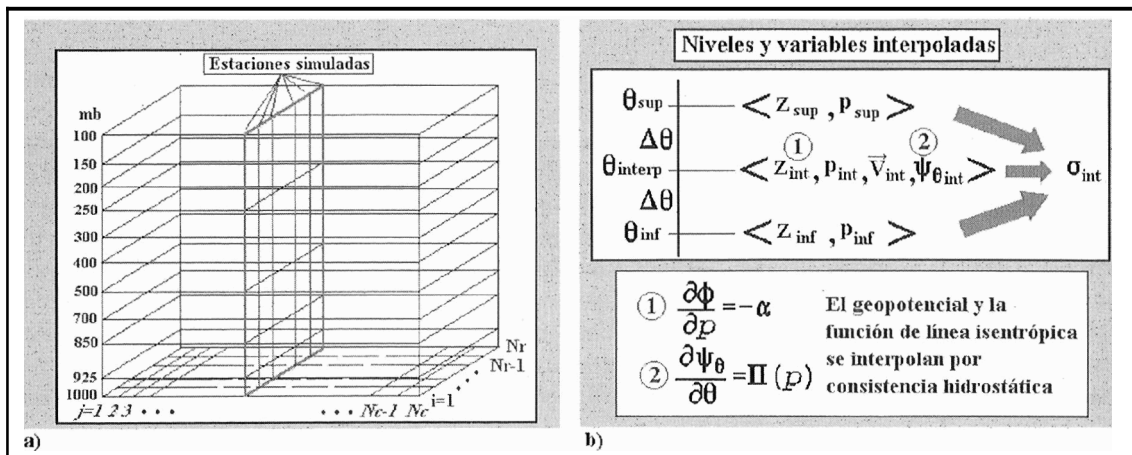


Fig. 1. Ilustración de a) esquema de extracción de datos utilizado y b) esquema de interpolación isentrópica

En la interpolación de los perfiles verticales a la superficie elegida [Fig. 1.b)] se usa un esquema de interpolación en el cual la presión, la razón de mezcla, y el viento se interpolan linealmente respecto a Π^k , siendo Π la función de Exner ($\Pi = C_p T / \theta$) y $\Gamma = R / C_p$. El geopotencial y la función de línea de Montgomery se interpolan por consistencia hidrostática.

La elección de un esquema u otro, entre los diversos disponibles, es muy importante de cara al cálculo de la estabilidad estática (a), ya que el error relativo en el cálculo de a es un orden de magnitud mayor que el que involucra el cálculo de vorticidad (Zip y Albert, 1993). El problema que aparece cuando la superficie isentrópica intersecta a la superficie se resuelve en este esquema considerando laminas infinitesimales con estabilidad constante pegadas a la superficie.

Entonces, si los niveles n y $n+1$ son los niveles del modelo entre los que se encuentra la superficie isentrópica, se usa un factor de interpolación dado por:

$$FI = \frac{\theta_n^{OK} - \theta_{imp}^{OK}}{\theta_n^{OK} - \theta_{n+1}^{OK}} \quad [3]$$

donde $OK = k^{-1}$, de forma que

$$p_{imp} = p_n + (p_{n+1} - p_n) FI \quad [4]$$

$$q_{imp} = q_n + (q_{n+1} - q_n) FI \quad [5]$$

$$\langle u_{imp}, v_{imp} \rangle = \langle u_n, v_n \rangle + (\langle u_{n+1}, v_{n+1} \rangle - \langle u_n, v_n \rangle) FI \quad [6]$$

Para el cálculo por consistencia hidrostática del geopotencial y de la función de línea (ω_ϕ) se utilizan las ecuaciones:

$$\frac{\partial \psi_\theta}{\partial \theta} = \Pi(p) \quad [7]$$

$$z_n - z_{n+1} = -\frac{R}{g} \bar{T}_v \text{Ln} \frac{p_n}{p_{n+1}} \quad [8]$$

Respecto al cálculo de la estabilidad, punto fundamental de cara a una descripción adecuada de la vorticidad potencial, es preciso elegir un espesor determinado alrededor del nivel de interpolación. En la Fig. 2 se muestran dos perfiles de estabilidad estática obtenidos sobre el modelo LAM-INM para valores del espesor de $\Delta\theta$ de 2 y 5 K.

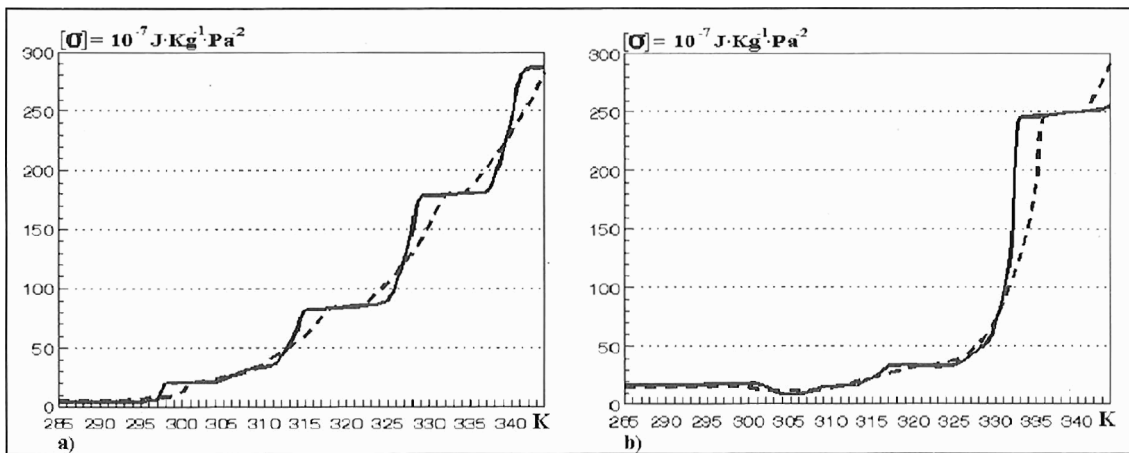


Fig. 2. Perfiles de estabilidad estática en función del espesor usado. Las líneas continuas son para $\Delta\theta = 2K$ y las discontinuas para $\Delta\theta = 5K$. a) perfil en $39^\circ N$ $9^\circ W$, b) perfil en $36^\circ N$ $2^\circ E$. Ambos obtenidos para el día 8 de octubre de 1992 a 00 Z con el análisis del LAM-INM

Se ve cómo, al usar un espesor de 2K, los perfiles resultantes presentan una elevada fluctuación, lo que provocaría un campo de vorticidad potencial demasiado ruidoso. Por esta razón, en el esquema actual se trabaja con un espesor de 5K. En el futuro, cuando la resolución vertical de ingestión a SAIDAS sea mayor, será posible reducir ese espesor. Para el cálculo de la vorticidad potencial, una vez que se ha interpolado la función de línea a la superficie elegida y se ha calculado la estabilidad, se aplica la siguiente fórmula:

$$P_{\theta} = \frac{g\theta}{\alpha} (f + f^{-1} \nabla_{\theta}^2 \Psi_{\theta}) \sigma \quad [9]$$

3. Cálculo de trayectorias isentrópicas

Para el cálculo de trayectorias en el marco de referencia isentrópico se utiliza un método cinemático. Antes de proceder al cálculo de las trayectorias se precisan las interpolaciones isentrópicas de las situaciones inicial y final, así como de los estados intermedios conocidos que se vayan a usar. La trayectoria de la partícula se obtiene como la suma de todas las subtrayectorias que pueden obtenerse a partir de todos los estados conocidos. El procedimiento tal como estaba diseñado en McIdas no incluía el uso de estados intermedios, ni la posibilidad de trazar trayectorias retrógradas, ni tampoco la inclusión de aceleración en los cálculos. Este último punto es muy importante ya que tiene enorme influencia en el resultado final (Danielssen-1961) y se mostrarán ejemplos de ello más adelante.

Una vez que se dispone de todas las interpolaciones el proceso se realiza según el esquema de la Fig. 3. Las principales etapas del proceso son:

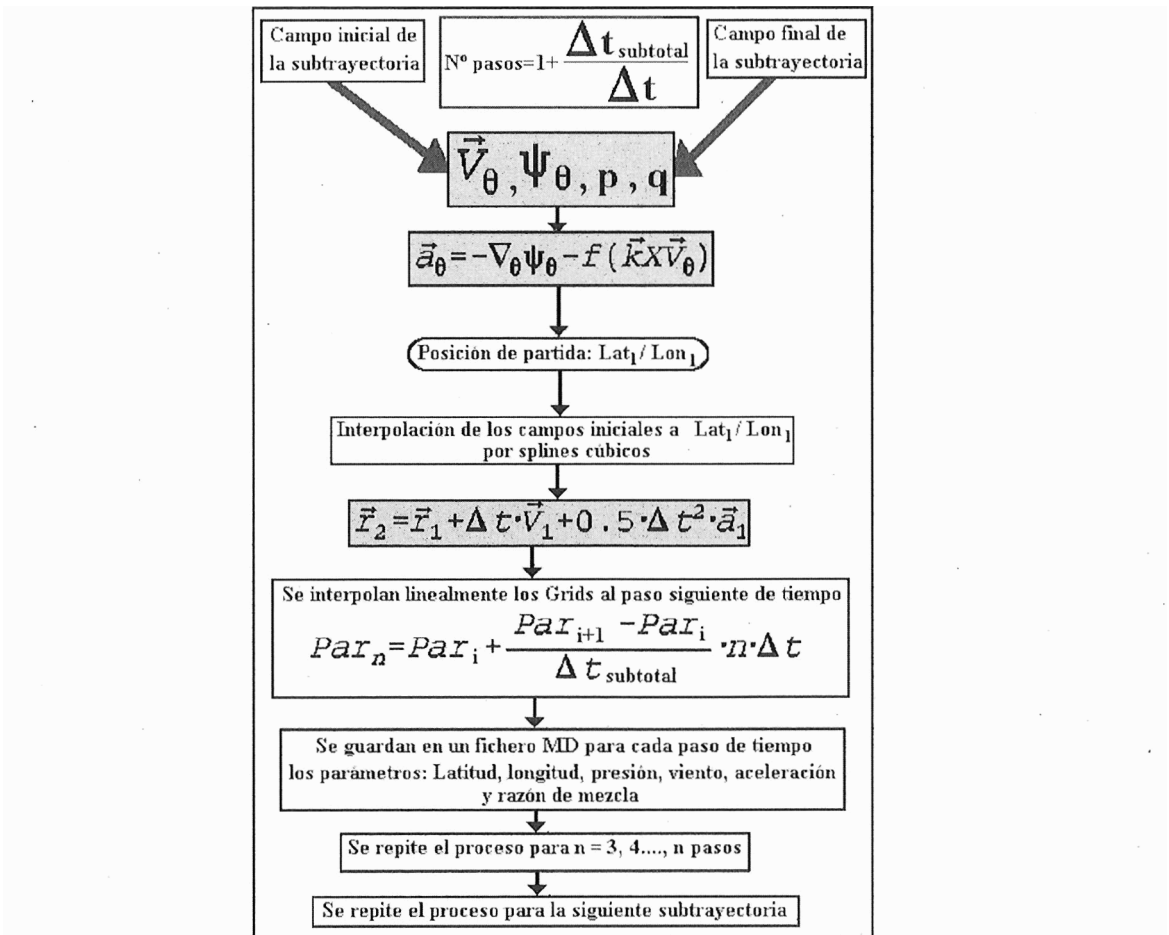


Fig. 3. Esquema para el cálculo de las trayectorias isentrópicas

- a) Se interpolan los campos iniciales a la posición Lat_1, Lon_1 mediante *splines* cúbicos.
- b) Dentro de cada subtrayectoria se calcula la posición de la partícula para el paso de tiempo elegido. Naturalmente el término cuadrático no se considera cuando el usuario prefiera efectuar el trazado sin aceleración.
- c) Para el paso de tiempo n , se interpolan los *grids* linealmente entre los dos estados conocidos.
- d) Se repite el proceso para los pasos de tiempo $n = 3, 4, \dots, N$ pasos
- e) Para cada paso de tiempo se guardan en un fichero MD los parámetros:
 Latitud, longitud, presión, viento, aceleración y razón de mezcla

Este proceso se repite para la siguiente subtrayectoria. El punto de partida será el punto de llegada de la subtrayectoria anterior.

El esquema de trazado es reversible y tanto el uso de trayectorias hacia delante en el tiempo como hacia atrás tiene aplicaciones interesantes y un tipo no excluye al otro. El trazado de trayectorias hacia delante puede resultar interesante cuando se realiza sobre predicciones de modelos numéricos. Por otra parte el trazado de trayectorias hacia atrás resulta útil cuando el usuario está interesado en averiguar de qué posición y nivel proceden trayectorias que terminan en puntos determinados. Otro punto interesante es la representación de secciones verticales de trayectorias individuales, que dan una idea clara de si la partícula se eleva o desciende dentro de la atmósfera a lo largo de su trayectoria isentrópica. Estas secciones están incluidas en el comando de visualización de trayectorias.

Para ver la diferencia que existe entre trayectorias con y sin aceleración, se muestra un caso correspondiente al período comprendido entre el 16 y el 18 de agosto de 1993 a 00 Z. En la Fig. 4.a) se muestran trayectorias retrógradas con y sin aceleración sobre la superficie de 315 K, calculadas usando los análisis del INM cada 6 horas desde el 16 a 00 Z hasta el 18 a 00 Z. Resulta evidente de la Fig. 4.a) cómo se separan las trayectorias con aceleración (subíndices = 1) y sin aceleración (subíndices = 2). En algunos casos la dispersión entre ambos tipos de trayectorias puede superar los 1 000 km en 48 horas. En las Figs. 4.b) y 4.c), se muestran secciones verticales de dos trayectorias con aceleración (a_1 y d_1). El eje de ordenadas es logarítmico con la presión y en el eje horizontal se representan las distancias horizontales recorridas desde el punto inicial de la trayectoria.

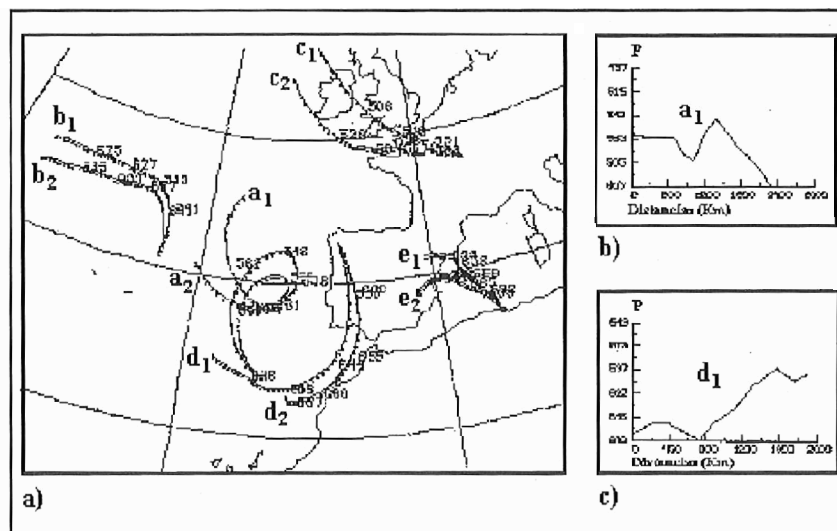


Fig. 4. a) trayectorias retrógradas sobre la superficie de 315 K, con aceleración (subíndice 1) y sin aceleración (subíndice 2); b) y c) secciones verticales mostrando la evolución de las trayectorias a_1 y d_1 . Período del 16 al 18 de agosto de 1993 (modelo LAM-INM)

Para finalizar este apartado, un breve comentario sobre las ventajas que ofrecen este tipo de trayectorias sobre las isobáricas. En 1961, Danielssen publicó un interesante trabajo sobre este punto. En esta publicación se **comparan** trayectorias isobáricas, isentrópicas y reales, estas últimas deducidas mediante el uso de trazadores. Las conclusiones son las que cabe esperar teniendo en cuenta los movimientos del aire en la atmósfera. Danielssen muestra que las trayectorias isentrópicas utilizando el factor de aceleración, son las que mejor se ajustan con diferencia a las trayectorias reales. La desviación de una trayectoria isobárica respecto a una isentrópica puede llegar a 2 000 km en 24 horas.

4. Ejemplos de aplicación

Se mostrarán a continuación dos situaciones en las que la aplicación de la nueva técnica de análisis isentrópico permite abordar algunos aspectos interesantes. En el primer ejemplo se usarán básicamente campos sobre superficies isentrópicas, mientras que en el segundo las trayectorias isentrópicas serán el núcleo principal.

4.1. Intrusión seca en niveles medios

Este ejemplo, correspondiente a los días 5-6 de enero de 1996, mostrará que el análisis isentrópico puede convertirse en una herramienta básica para diagnosticar el estado de la atmósfera. Se trata de un caso en el que una línea de turbonada se **desarrolla** por detrás de un frente frío, estando asociados los desarrollos convectivos en esta línea al aumento de inestabilidad que se produce al ir avanzando una **intrusión** seca en niveles medios y altos, sobre una zona en la que la humedad es relativamente alta en bajos niveles. Los primeros desarrollos convectivos aparecen en la **parte delantera** de la intrusión seca, a la **izquierda** de la zona de salida de un máximo de viento, para ir posteriormente organizándose en forma de línea, como puede verse en la Fig. 5.

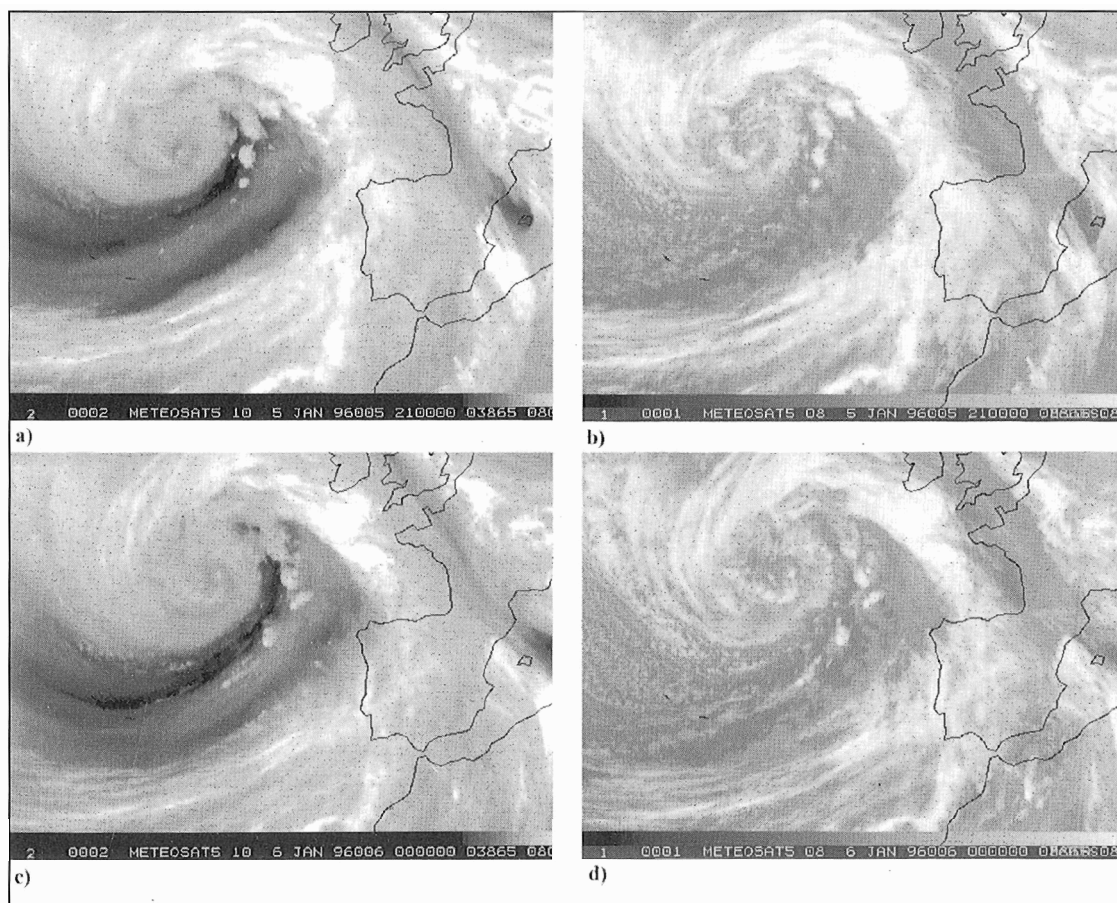


Fig. 5. a) y c) *Imágenes vapor de agua del día 5 a 21 Z y del día 6 a 00 Z;* b) y d) *imágenes infrarrojas correspondientes*

El campo de vorticidad potencial sobre la superficie de 320 K (que corresponde a presiones entre 300 y 350 hPa en las cercanías de la baja atlántica) aparece en la Fig. 6.a) y la presión y el viento sobre la superficie de 305 K en la Fig. 6.b) (ambos para el día 6 a 00 Z). Se observa cómo el aire que forma parte de la intrusión seca está siendo advectado desde niveles altos a niveles medios (desde unos 420 hPa hasta aproximadamente 550 hPa), poseyendo valores relativamente altos de vorticidad potencial. Esto nos indica que este aire tiene su origen en la troposfera alta o en la estratosfera baja, y está sufriendo un proceso de subsidencia según va avanzando y entra a formar parte de la circulación de la baja. Al superponerse sobre aire más húmedo que existe en la troposfera inferior se produce un fuerte aumento de inestabilidad potencial, inestabilidad que puede liberarse en la zona favorable a los ascensos situada a la izquierda de la salida del máximo de viento [en la Fig. 6.c) aparece el viento sobre la superficie de 320 K]. En la Fig. 7.d) se muestra la proporción de mezcla sobre la superficie de 305 K, donde se confirma la idea de que el aire que forma parte de la intrusión seca tiene un contenido de humedad bajo, como corresponde a su origen y al proceso de subsidencia al que ha estado sometido.

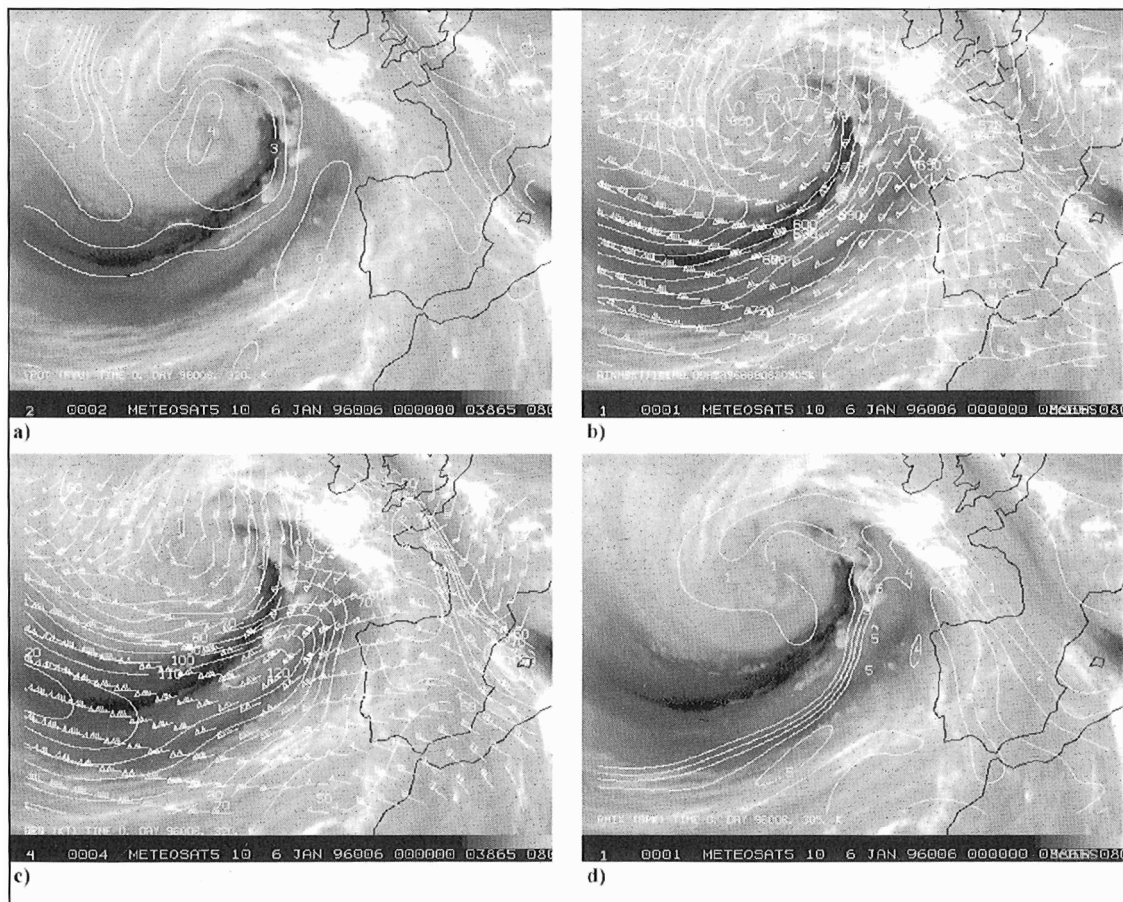


Fig. 6. a) vorticidad potencial (PVU) y c) viento (kt) sobre la superficie de 320 K; b) presión (hPa) y viento (kt) y d) proporción de mezcla (g/kg) sobre la superficie de 305 K. Los campos se han obtenido con los análisis del HIRLAM del día 6 a 00 Z

El análisis isentrópico también sirve de ayuda a la hora de diagnosticar las zonas donde los ascensos son más importantes. Las imágenes de la Fig. 5 muestran que, entre la línea de turbonada y la banda nubosa con topes más fríos existe un área (donde se sitúa el frente frío en niveles bajos) con topes nubosos relativamente cálidos. El análisis de presión y viento sobre la superficie de 300 K (Fig. 7) permite explicar estas características: se ve que el aire que forma parte del *conveyor* cálido (lengua con presiones relativamente altas sobre la superficie isentrópica) sufre un ascenso débil sobre la zona del frente frío (de ahí que los topes nubosos no sean muy fríos), mientras que la zona donde existe una fuerte advección de presión sobre la superficie isentrópica, indicativa de que ahí los ascensos son más vigorosos, coincide perfectamente con la banda que posee los topes nubosos más fríos.

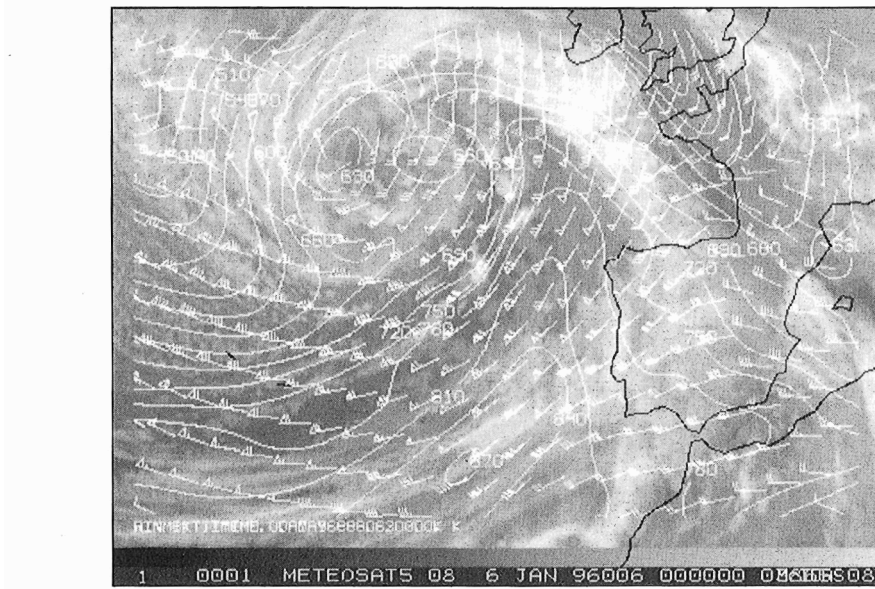


Fig. 7. Presión (hPa) y viento (kt) sobre la superficie de 300 K

4.2. Advección de polvo africano sobre Canarias

Durante los días 22 al 26 de febrero de 1995 tuvo lugar una situación de invasión de polvo en suspensión sahariano sobre Canarias con características especiales, ya que estuvo dividida en dos períodos separados por dos días, 23 y 24 de febrero, en los que desapareció el polvo en suspensión mientras que los valores medidos de ozono en la estación base de Izaña fueron muy altos, con clara subsidencia sobre Tenerife. En la Fig. 8 se muestran trayectorias isentrópicas retrógradas de dos días sobre la superficie de 305 hPa, para los días 22, 23, 25 y 26 de febrero a 12 Z. Se observa cómo, mientras que el día 22 el aire que llega a Tenerife tiene un largo y marcado recorrido africano, la situación cambia completamente al día siguiente, cuando el aire que llega a la isla proviene del Atlántico al norte de Canarias y, además, está sufriendo una fuerte subsidencia. Estas dos trayectorias explican por sí solas los valores de ozono medidos en Izaña, bajos el día 22 y altos el 23, así como la presencia de polvo en suspensión el día 22. Posteriormente, los días 25 y 26, principalmente el día 25, el aire que llega a las islas vuelve a tener un recorrido africano, con la consiguiente disminución de los valores de ozono y la presencia nuevamente de polvo en suspensión.

5. Conclusiones

La posibilidad de analizar las estructuras atmosféricas sobre una o varias superficies meteorológicas es fundamental y casi necesaria para poder obtener una correcta diagnóstico tridimensional del estado de la atmósfera. Con la técnica desarrollada los predictores y analistas disponen de una herramienta operativa de fácil manejo para abordar esos estudios. Poder analizar la estructura de las distintas masas de aire, su origen y los movimientos de ascenso o descenso que está sufriendo en su evolución permite conocer algunos aspectos tan importantes como pueden ser, por ejemplo, los aumentos o disminuciones de estabilidad que puedan producirse debido a la superposición de distintas masas de aire, o la caracterización de los *conveyor* y, en general, de los sistemas frontales, mediante la determinación de las áreas donde los ascensos son más vigorosos. Además, la posibilidad de obtener trayectorias isentrópicas, tanto hacia delante como retrógradas, es de gran ayuda en la investigación de la evolución de las distintas parcelas de aire.

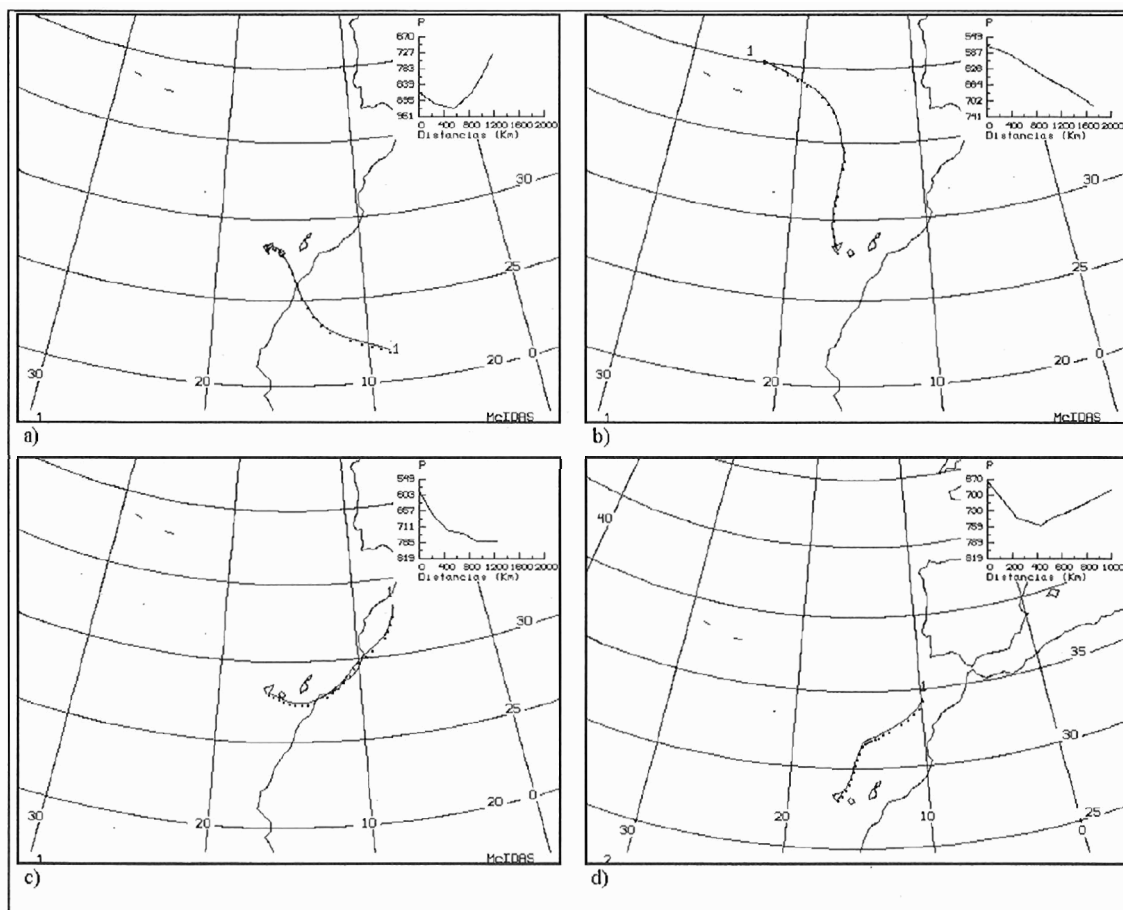


Fig. 8. Trayectorias retrógradas de dos días sobre la superficie de 305 K para los días a) 22, b) 23, c) 25 y d) 26 de febrero de 1995

Referencias

- Bleck, R., 1990. Depiction of upper/lower interaction associated with extratropical cyclogenesis. *Mon. Wea. Rev.*, 118, pp. 573-585.
- Danielssen, E. F., 1961. Trajectories: isobaric, isentropic and actual. *J. Meteor.*, 18, pp. 479-486.
- Danielssen, E. F., 1968. STE based on radioactivity ozone and potential vorticity. *J. Atmos. Sci.*, 25, pp. 502-518.
- García, A., 1991. La vorticidad potencial como campo de pronóstico/diagnóstico. 2. Simposio Nacional de Predicción INM, pp. 384-397.
- García, A. y F. Elizaga, 1995. Campos y trayectorias sobre superficies isentrópicas en SAIDAS. Nota Técnica Núm. 22 STAP (INM).
- Hoskins, B. J.; M. E. McIntyre and W. Robertson, 1985. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 111, pp. 877-946.
- Keyser, D. and M. A. Shapiro, 1986. A review of the structure and dynamics of upper levels frontal zones. *Mon. Wea. Rev.*, 114, pp. 452-459.
- Keyser, D. and M. J. Pecnick, 1985. A two dimensional primitive equation model of frontogenesis forced by confluence and horizontal shear. Parts a and b. *J. Atmos. Sci.*, 42, pp. 1259-1305.