

## Comunicación AII-15

# ANÁLISIS DE PROCESOS DE INTERCAMBIO ESTRATOSFERA-TROPOSFERA, A TRAVÉS DE MEDIDAS DE OZONO, TRAZADORES RADIOACTIVOS Y DIFERENTES HERRAMIENTAS DINÁMICAS

**Emilio Cuevas**  
**Juanma Sancho**  
**Sergio Afonso**

Observatorio Especial de Izaña, Tenerife, INM

**Ricardo Riosalido**

Servicio de Técnicas de Análisis y Predicción, INM

### RESUMEN

*En este trabajo se analizan diferentes episodios en los que los valores de ozono fueron anormalmente altos o bajos en la troposfera sobre Madrid, Tenerife y Azores utilizando para ello datos de ozonosondeos, trazadores radioactivos y diferentes herramientas dinámicas. El desarrollo de DANAs al oeste de la Península, afecta de una manera muy importante a la distribución de ozono troposférico en la región subtropical, sobre todo en primavera y verano, ya que dichos desarrollos inducen generalmente procesos de intercambio estratosfera-troposfera. Por otro lado, el ozono se puede considerar como un excelente indicador de procesos de intercambio estratosfera-troposfera. Para el análisis detallado de la distribución espacio-temporal del ozono troposférico son de gran utilidad las herramientas dinámicas utilizadas hasta ahora casi exclusivamente en tareas de predicción.*

### 1. Introducción

El estudio de la distribución del ozono troposférico en latitudes medias y subtropicales, junto con su evolución temporal, ha sido en los últimos años uno de los temas más controvertidos dentro de las investigaciones que se llevan a cabo para comprender el comportamiento de este importante gas en la atmósfera. La situación geográfica y la excepcional calidad del aire sobre Tenerife hacen de la estación de ozonosondeos

de Sta. Cruz de Tenerife (INM) un emplazamiento ideal para la investigación de la distribución del ozono troposférico en dicha región. Por otro lado, en el Observatorio de Izaña se llevan a cabo medidas de ozono superficial (representativas de la atmósfera libre) y de ozono total en columna que junto con los ozonosondeos conforman una serie completa de medidas única en la región subtropical.

Desde hace unos cuantos años se están realizando en el Observatorio Especial de Izaña (INM) estudios combinados de ozono troposférico, trazadores radioactivos ( $^7\text{Be}$  y  $^{210}\text{Pb}$ ) y diferentes herramientas dinámicas (vorticidad potencial, trayectorias isentrópicas, etc.), para intentar explicar las variaciones de ozono troposférico, y sobre todo para llegar a conocer el origen de los valores extremadamente altos de este gas que se registran en primavera y verano sobre Tenerife (Cuevas *et al.*, 1996), en prácticamente toda la troposfera. En este trabajo nos centraremos en el análisis de diferentes episodios del mes de junio de 1995, mes en que se llevó a cabo una campaña intensiva de ozonosondeos en las estaciones de Madrid, Azores y Tenerife en el marco del proyecto Europeo BOA («Budget of Ozone over North Atlantic»), que nos ha permitido conocer la evolución diaria, durante este mes, de la concentración de ozono y diferentes variables meteorológicas a lo largo de toda la troposfera para estos tres lugares.

Se han analizado diferentes episodios en los que la concentración de ozono sobre Tenerife alcanzó valores anormalmente altos o bajos en distintos días del mes combinando el uso de los datos de los sondeos diarios con los campos de presión en superficie y en 500 hPa, y diferentes herramientas dinámicas facilitadas por el STAP (Servicio de Técnicas de Análisis y Predicción), como campos de presiones, vientos y vorticidad potencial en distintos niveles isentrópicos, retrotrayectorias isentrópicas y secciones verticales de vorticidad potencial (García Méndez y Elizaga, 1995).

El objeto de este estudio es establecer una relación entre las variaciones espacio-temporales experimentadas en la concentración de ozono troposférico y los diferentes procesos dinámicos que tuvieron lugar en la atmósfera.

## 2. Campaña intensiva de ozonosondeos en Madrid, Tenerife y Azores

En junio de 1995 se «volaron» 21 sondeos de ozono en Madrid, 20 en Tenerife y 22 en Azores. Esta campaña nos ha permitido conocer en detalle en este mes la distribución de ozono troposférico en tres regiones muy diferentes:

- Continental industrializada: Madrid
- Atlántico Norte: Azores
- Subtropical: Tenerife

Los sondeos de ozono se realizaron utilizando sondas ECC (*Electro Chemical Cell*) modelo A5 acopladas a las radiosondas RS-80 que proporcionan presión, temperatura y humedad relativa.

Con los datos de los sondeos diarios de ozono se han construido secciones verticales de ozono en los que se representan la concentración de ozono (contornos coloreados en ppb —partes por billón—) en función del tiempo (eje horizontal en días) y de la temperatura potencial (eje vertical en grados Kelvin). La razón de utilizar la temperatura potencial en lugar de la altura es con el fin de poder comparar y relacionar mejor las secciones verticales de distintos emplazamientos ya que la temperatura potencial es invariante en los procesos de desplazamiento de masas de aire suponiendo éstos adiabáticos.

## 3. Análisis de distintas distribuciones verticales de ozono

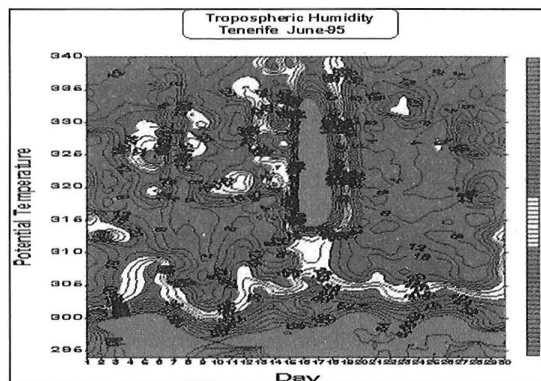
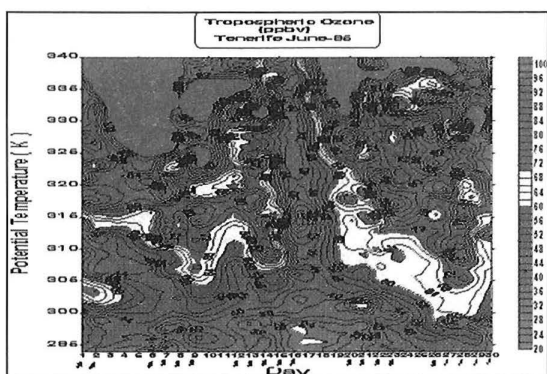
Si bien en el análisis de los diferentes episodios se utilizan de forma rutinaria los valores de los radio-trazadores medidos en el Observatorio de Izaña, desgraciadamente para la campaña intensiva de junio de 1995 no se pudo realizar el muestreo de estos componentes y los valores de otros aerosoles normalmente utilizados como son los sulfatos y los nitratos, no están aún disponibles.

Durante el mes de junio de 1995 tuvieron lugar en Tenerife tres situaciones muy diferentes en cuanto a la distribución del ozono troposférico que hicieron de este mes un período muy interesante para el análisis de los mecanismos que rigen las variaciones diarias de ozono en los distintos niveles. La primera distribución tipo comprende los primeros días del mes (días 2 y 3) en los que el ozono alcanzó valores muy bajos hasta una altura de unos 5 km, registrándose valores normales para este mes a partir de dicha altura. La segunda distribución tipo de ozono tuvo lugar en dos períodos diferentes de este mes, del día 9 al 13, y del 22 al 24, respectivamente, en los que el ozono mostró valores muy bajos en los dos primeros kilómetros de altura aumentando muy rápidamente a partir de esta altura, manteniéndose los valores altos hasta la tropopausa. Por último, la tercera distribución tipo a destacar se produjo durante los días 16 y 17 en los que se registraron valores muy bajos de ozono en toda la troposfera (hasta aproximadamente 12 km).

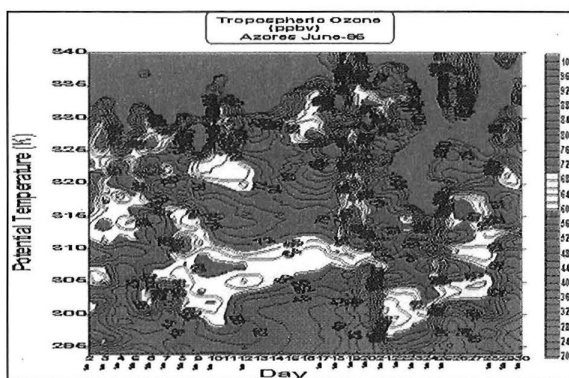
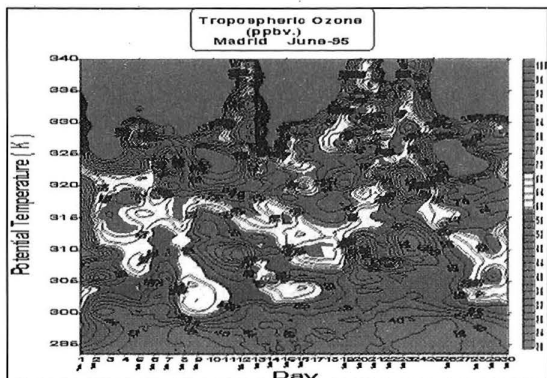
A continuación se analiza cada uno de dichos episodios relacionando estas observaciones con las realizadas en las estaciones de Azores y Madrid y utilizando las herramientas descritas anteriormente para explicar cada una de ellas.

**3.1. Invasión de polvo sahariano: días 2 y 3 de junio**

En este episodio los valores de ozono fueron bajos (menores de 50 ppb) hasta los 5 kilómetros de altura, mientras que la troposfera media y alta permanecía con valores altos de ozono (mayores de 70 ppb) por encima de 5,5 km (Fig. 1.1), observándose concentraciones de ozono más bajas sobre Tenerife que sobre Madrid (Fig. 2.1).



*Figs. 1.1 y 1.2. Sección vertical de ozono y de humedad relativa para el mes de junio de 1995 en la estación de Santa Cruz de Tenerife. El eje vertical indica la altura en temperatura potencial (Kelvin), el eje horizontal el tiempo (días) y las isóneas corresponden a concentración de ozono (ppb) y humedad relativa (%), respectivamente*



*Figs. 2.1 y 2.2. Sección vertical de ozono para el mes de junio de 1995 en las estaciones de Madrid y Azores, respectivamente. El eje vertical indica la altura en temperatura potencial (Kelvin), el eje horizontal el tiempo (días) y las isóneas corresponden a concentración de ozono (ppb)*

El día 2 de junio se observó la presencia de polvo en suspensión en el Observatorio de Izaña reduciéndose notablemente la visibilidad. Asimismo, el corte vertical de humedad Tenerife-África siguiendo el paralelo 28°N muestra para este día valores muy bajos de la humedad relativa (< 30%) por encima del nivel de 900 hPa.

En cuanto a la situación sinóptica del día 2 de junio, cabe destacar la existencia de una baja térmica en el norte de África en superficie y de una alta situada al noroeste de la Península en 500 hPa.

Las retrotrayectorias isentrópicas de 315 K para este día y los dos días anteriores, nos indican que la masa de aire que llegó al observatorio tenía su origen en el continente africano en niveles muy cercanos al suelo, lo cual explica la gran cantidad de polvo observada. Esta masa de aire alcanzó rápidamente niveles altos (entre 700 hPa y 550 hPa) y viajó en estos niveles para finalmente «caer» sobre Tenerife.

Estos episodios de invasión de polvo procedente del Sahara son bastante frecuentes en las Islas Canarias en los meses de verano cuando en el continente africano, debido al fuerte calentamiento del suelo, se producen potentes movimientos convectivos que provocan el ascenso de gran cantidad de partículas en suspensión que son transportadas hasta Canarias. Estas situaciones suelen tener una duración de entre 3 y 7 días.

Los valores anormalmente bajos de ozono bajo estas situaciones se deben a los siguientes hechos:

- a) El origen de la masa de aire está en niveles muy bajos (cercaos al suelo) en los que la concentración de ozono es menor. Además, al generarse en regiones desérticas sin contaminación industrial, no hay producción neta de ozono por procesos fotoquímicos debido a la ausencia de los principales precursores de ozono: los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos no metálicos.
- b) La concentración de ozono presenta una variación latitudinal disminuyendo hacia las latitudes inferiores en esta época del año. Dado que el origen de dicha masa de aire se encuentra frecuentemente en latitudes más bajas a las de Canarias, es de esperar valores más bajos de ozono.
- c) Cuando se producen choques mecánicos entre el ozono y las partículas de polvo en suspensión, éste se destruye. Este proceso se conoce como deposición seca. En situaciones de invasión de aire sahariano aumenta considerablemente la superficie eficaz de las partículas de polvo y se produce una mayor destrucción de ozono por deposición seca.
- d) Se ha comprobado que existe un aumento de la razón: radiación ultravioleta difusa/radiación ultravioleta directa en los episodios de masas de aire procedentes del Sahara con un mayor contenido de polvo en suspensión, lo que podría acelerar la destrucción del ozono en ausencia de precursores.

La medida en que cada una de las causas descritas anteriormente explica los bajos valores de ozono registrados en estos episodios, es un tema en investigación actualmente.

### 3.2. Fenómenos convectivos: días 16 y 17 de junio

Entre los días 15 y 17, el ozono troposférico mostró valores muy bajos en toda la troposfera, no superando los 55 ppb, ni siquiera en niveles cercanos a la tropopausa (Fig. 1.1). El ozonosondeo de Tenerife del día 14 muestra valores de ozono superiores a los registrados ese mismo día en el ozonosondeo de Madrid en casi todos los niveles, mientras que el día 16 la situación cambió radicalmente, siendo la concentración de ozono en Tenerife mucho menor que en Madrid, con diferencias de hasta 30 ppbv en la mayor parte de los niveles.

La situación sinóptica para el día 16 indica la existencia de inestabilidad sobre Tenerife debido a la presencia de una vaguada en 500 hPa. Este hecho fue confirmado por las observaciones realizadas ese día en el Observatorio de Izaña, las cuales nos informan de fuertes desarrollos convectivos con chubascos.

Los valores tan bajos de ozono durante los fenómenos convectivos se deben principalmente a dos causas:

- a) Los desarrollos convectivos elevan masas de aire cercanas al suelo, en la capa de mezcla, capa que se caracteriza por tener valores altos de humedad, sobre todo en los océanos, como sucede en la región de

Canarias. El ozono se destruye rápidamente en presencia de vapor de agua y los fenómenos convectivos contribuyen a empobrecer de ozono toda la columna donde se están produciendo ascensos de masas de aire.

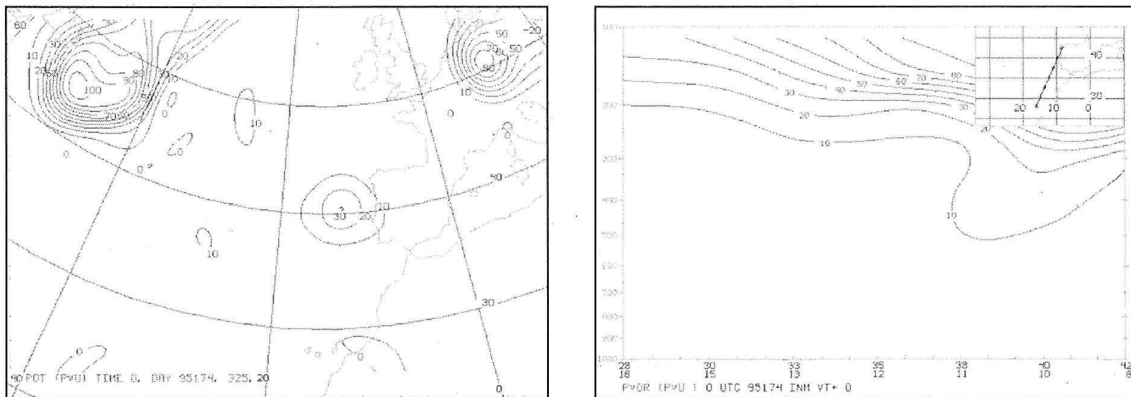
b) El aumento de la humedad relativa asociado a la condensación y formación de nubosidad en los movimientos ascendentes provoca destrucción de ozono en toda la columna.

### 3.3. Desarrollo de DANA sobre el Atlántico: días 22, 23 y 24 de junio

Durante los días 22, 23 y 24 de junio se produjo en Tenerife y en Azores un episodio en el que se registraron valores muy altos de ozono (70-80 ppb) a partir de aproximadamente 2 km de altura (Figs. 1.1 y 2.2). En Tenerife es frecuente que se registren este tipo de episodios durante el mes de junio, siendo su duración típica de dos o tres días. En el Observatorio de Izaña, situado a 2 367 m de altitud, se midieron también, durante estos días, valores muy altos de ozono superficial con el analizador DASIBI. Sin embargo, en Madrid la situación fue totalmente opuesta, registrándose valores de ozono anormalmente bajos (menores de 60 ppbv) hasta 9 km de altura (Fig. 2.1).

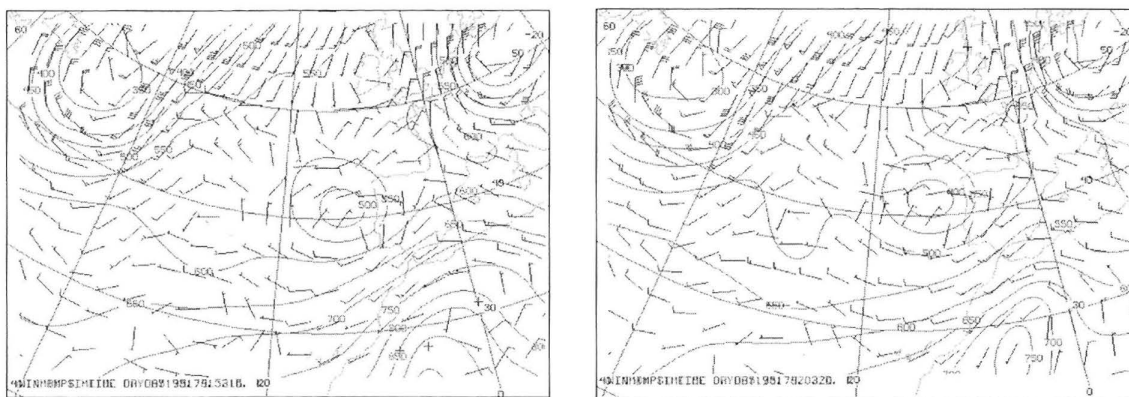
Un estudio detallado de la dinámica atmosférica utilizando retrotrayectorias isentrópicas, campos de vorticidad potencial y campos de vientos y presiones en varias superficies isentrópicas (García Méndez y Elizaga, 1995), muestra que el origen de las masas de aire en este tipo de episodios se encuentra en la alta troposfera y la baja estratosfera, donde la concentración de ozono es muy alta, estando por lo general asociadas a un flujo subsidente con dirección sur localizado al oeste de las Depresiones Aisladas en Niveles Altos (DANAS) que se desarrollan al oeste de la Península Ibérica, en latitudes medias (Cuevas *et al.*, 1996).

En 500 hPa, el día 23 se observa la existencia de un vórtice ciclónico aislado de la circulación general centrada al oeste de Portugal. El mapa de vorticidad potencial en la superficie isentrópica de 325 K (Fig. 3.1) muestra un máximo de más de 3 UPV (unidades de vorticidad potencial) centrado en la misma región en la que se encuentra la depresión en altura. Si se tiene en cuenta que la tropopausa dinámica se sitúa en 1,6 UPV, nos encontramos ante un claro hundimiento de la tropopausa (Fig. 3.2), que llega a alcanzar 400 hPa al oeste de Portugal.



**Figs. 3.1 y 3.2.** Mapa de vorticidad potencial (décimas de UVP) a 325 K para el día 23 de junio de 1995 y sección vertical de vorticidad potencial (décimas de UVP) según el perfil Galicia-Canarias, respectivamente

Los campos de vientos y presiones en las superficies isentrópicas de 315 K y 320 K nos indican la existencia de movimientos descendentes de masas de aire en la parte trasera de la depresión en altura (Fig. 4). Estas masas de aire son ricas en ozono debido a que tienen su origen en la alta troposfera y baja estratosfera, y aunque al atravesar la media troposfera se mezclan con masas de aire más pobres en ozono, siempre conservan una mayor concentración de ozono que el aire circundante, incluso cuando llegan a la baja troposfera.



**Fig. 4.** Campos de vientos y presiones en las superficies isentrópicas de 315 K y 320 K

Las retrotrayectorias isentrópicas en 305 K para los días 22, 23 y 24 nos indican que las masas de aire que alcanzaron Tenerife procedían efectivamente de niveles altos al oeste de la DANA. Otra prueba del origen estratosférico de estas masas de aire nos la proporcionan los sondeos de Tenerife. Se observa cómo existe una excelente correlación negativa entre el ozono y la temperatura de rocío, indicando la existencia de una masa de aire fría y seca procedente de niveles muy altos (Oltmans *et al.*, 1995). Sin embargo, los fenómenos convectivos que tuvieron lugar en estas fechas en Madrid, al encontrarse en la parte delantera de la depresión en altura, dieron lugar a valores altos de humedad relativa en la baja y media troposfera y, por tanto, a la destrucción neta de ozono, tal y como muestran los ozonosondeos de estos días.

En definitiva, los valores altos de ozono troposférico registrados en la región subtropical están asociados a movimientos descendentes de masas de aire, y generalmente procedentes de latitudes más altas, y por el contrario los valores bajos están asociados a movimientos ascendentes procedentes de la misma o más baja latitud. Este comportamiento se puede comprobar observando la sección vertical de humedad relativa de este mismo mes que nos muestra una clara anticorrelación con la sección vertical del ozono, reproduciendo estructuras sorprendentemente parecidas (Figs. 1.1, 1.2).

#### 3.4. Desarrollo de DANA sobre el Atlántico: días 15, 16, 17 18 y 19 de agosto de 1993

Otra herramienta útil para la determinación del origen de masas de aire es la medida de la concentración de los isótopos radioactivos  $^7\text{Be}$  y  $^{210}\text{Pb}$  contenidos en partículas microscópicas en suspensión (aerosoles). Estas medidas se llevan a cabo analizando, mediante la técnica de absorción atómica, filtros de fibra de vidrio por los que ha circulado aire ambiente durante 12 horas.

El  $^7\text{Be}$  es producido por la acción de los rayos cósmicos que rompen los núcleos de los átomos de N, O y Ar en la atmósfera. La mayoría del  $^7\text{Be}$  en la atmósfera se produce en la estratosfera, ya que los rayos cósmicos se atenúan muy rápidamente en la troposfera. El máximo de producción de  $^7\text{Be}$  se produce a 15 km de altura y la concentración de  $^7\text{Be}$  en la troposfera decrece exponencialmente con la altura siendo muy baja en las proximidades del suelo. Por lo tanto, el  $^7\text{Be}$  es un buen trazador de masas de aire procedentes de la alta troposfera y baja estratosfera.

Así pues, es de esperar que aumente la concentración de  $^7\text{Be}$  en Tenerife durante episodios de intercambio estratosfera-troposfera asociados al desarrollo de DANAS al oeste de la Península Ibérica como de hecho se comprueba experimentalmente.

En los días 15-19 de agosto de 1993 se produjo el desarrollo de una DANA al oeste de la Península Ibérica. La subsidencia en la parte trasera de la DANA es de tal intensidad que puede ser perfectamente detectada en las imágenes de vapor de agua del METEOSAT (Fig. 5). Las trayectorias isentrópicas de 310 K confirman el transporte subsidente de masas de aire hacia Canarias desde la parte trasera de la DANA. Durante estos días los sondeos mostraron valores muy altos de ozono a lo largo de toda la troposfera por encima de

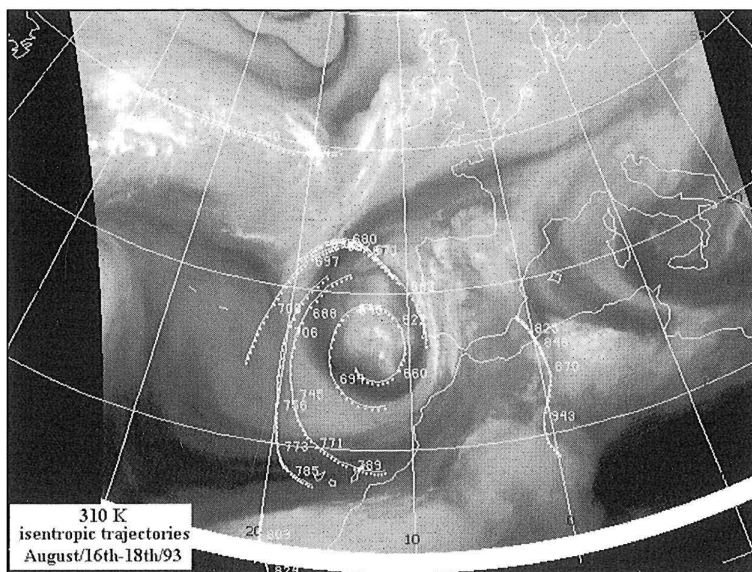


Fig. 5. Imagen de vapor de agua del METEOSAT para el día 16 de agosto de 1993 y trayectorias isentrópicas LAM-INM a 310 K entre los días 16-18 de agosto-93

1800 metros, y una perfecta correlación negativa con la temperatura de rocío (Fig.6), lo que indica que los valores altos de ozono se deben a que la masa de aire procede de la alta troposfera/baja estratosfera. Durante estos días los valores de  $^7\text{Be}$  medidos en Izaña fueron extremadamente altos: 11,6; 11,7; 11,8; 10,8; 10,4  $\text{mBq m}^{-3}$  (si tenemos en cuenta que el valor medio mensual más alto se registra en junio con 7,4  $\text{mBq m}^{-3}$ ) para los días 15, 16, 17, 18 y 19, respectivamente. Por el contrario, los valores de  $^{210}\text{Pb}$ , trazador radioactivo de masas de aire procedentes de la capa de mezcla (el  $^{210}\text{Pb}$  se produce por decaimiento radiactivo del  $^{222}\text{Rn}$  que se origina en el suelo), fueron muy bajos para los mismos días: 0,7; 0,5; 0,4; 0,3 y 0,4  $\text{mBq m}^{-3}$ .

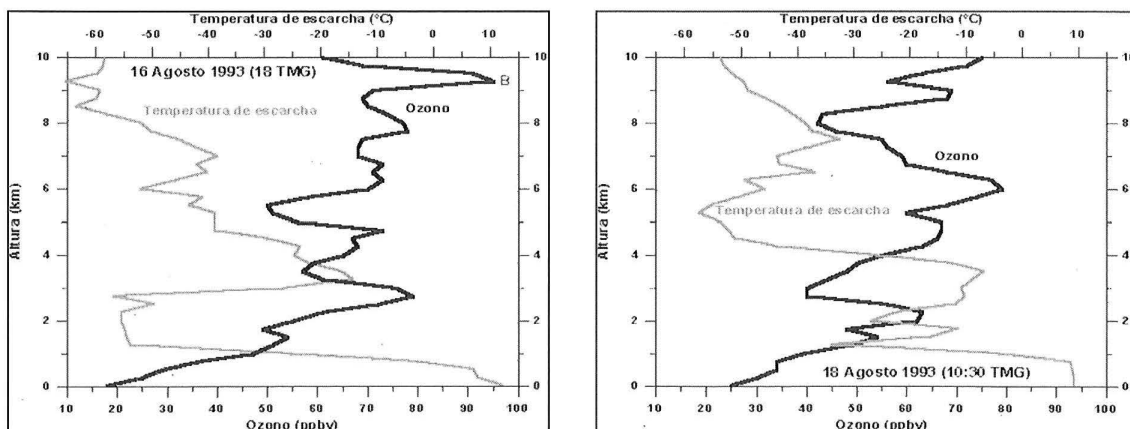


Fig. 6. Perfiles verticales de ozono (ppb) y punto de escarcha ( $^{\circ}\text{C}$ ) para los días 16 y 18 de agosto de 1993, respectivamente

#### 4. Conclusiones

1. Los fenómenos relacionados con movimientos descendentes de masas de aire han sido estudiados habitualmente en menor detalle que aquellos relacionados con movimientos ascendentes debido principalmente a que están asociados a situaciones sinópticas de estabilidad atmosférica y por tanto a buen tiempo. Sin embargo, aquellos estudios en los que interesa conocer los procesos dinámicos que gobiernan la distribución espacio-temporal de los distintos componentes atmosféricos, dan gran importancia a los procesos de in-

tercambio estratosfera-troposfera. Para este tipo de estudios el ozono resulta ser un excelente indicador de fenómenos de intercambio entre la alta troposfera y la baja estratosfera.

2. Es necesario destacar la gran utilidad de las distintas herramientas dinámicas que se utilizan habitualmente en predicción, a la hora de determinar los procesos de transporte de numerosos componentes atmosféricos (dióxido de carbono, ozono, metano, óxidos de nitrógeno, etc.).

3. El desarrollo de DANAs sobre el Atlántico en latitudes medias modula los valores altos y muy altos de ozono troposférico que se registran en primavera y verano en latitudes medias y sobre todo en la región subtropical.

4. Sorprendentemente los valores de ozono en toda la troposfera, para el mes de junio, son superiores en Tenerife a los registrados en la troposfera sobre Azores y Madrid, a pesar de que en esta época del año existe, a nivel mundial, un gradiente positivo de ozono hacia latitudes más altas. Esto es debido a que las intrusiones estratosféricas que tienen lugar en latitudes medias afectan más a las regiones subtropicales que a aquellas sobre las que tienen lugar dichas intrusiones.

### **Referencias**

Cuevas, E.; A. García Méndez; J. Prospero; J. Merrill; H. Levy II. *Tropospheric Ozone Over the Eastern North-Atlantic Subtropical Region. Connections with Dynamic Processes*, enviado al *J. Geophys. Res.*, 1996.

García Méndez, A.; F. Elizaga. *Campos y Trayectorias Sobre Superficies Isentrópicas en SAIDAS*, Nota Técnica Núm. 22, STAP, INM, 1995.

Oltmans, S.; H. Levy II; J. M. Harris; J. T. Merrill; J. L. Moody; J. Lathrop; E. Cuevas; M. Trainer; M. S. O'Neill; J. M. Prospero; H. Vömel; B. J. Johnson. *Summer and Spring Ozone Profiles Over the North Atlantic from Ozononesonde Measurements*, aceptado en *J. Geophys. Res.*, 1995.

### **Agradecimientos**

Al STAP (INM) por su inestimable colaboración.