

# ANÁLISIS DE PROCESOS DE INTERCAMBIO ESTRATOSFERA-TROPOSFERA ASOCIADOS AL CHORRO SUBTROPICAL NO PERTURBADO

Emilio Cuevas (1)  
Juan Manuel Sancho (1)  
Matthias Schneider (2)  
Juan José Bustos (3)

- (1) Observatorio Atmosférico de Izaña, INM  
(2) Becado en el Observatorio Atmosférico de Izaña por el *Forschungszentrum Karlsruhe GMBH* (IMK, Alemania)  
(3) CMT en Canarias Occidental, INM

## RESUMEN

Entre 1 de febrero y el 23 de abril de 1999 se llevó a cabo una campaña intensiva de *ozonosondeos* (41) en la estación de Santa Cruz de Tenerife (28°N, 16°W). Esta campaña tuvo lugar en el marco del proyecto europeo TRACAS (*TRANsport of Chemical species Across the Subtropical tropopause*). En esta época el chorro subtropical (*ChS*) se encuentra muy próximo a Canarias, y por lo tanto es posible estudiar los procesos de intercambio estratosfera-troposfera asociados al mismo. En esta comunicación se describe la campaña de medida y los resultados más importantes obtenidos en la misma, utilizando además de la información proporcionada por los *ozonosondeos*, los análisis meteorológicos realizados con el modelo HIRLAM y la información de *HF*, *HCl*, *CH<sub>4</sub>* y *N<sub>2</sub>O* obtenida en la baja estratosfera y la alta troposfera por el interferómetro FTIR (*Fourier Transform Infra Red*) que opera en el Observatorio Atmosférico de Izaña desde enero de 1999.

## 1. Introducción

Existen numerosos trabajos sobre los procesos de intercambio estratosfera-troposfera (*IET*) y se puede encontrar una detallada descripción sobre los resultados más importantes obtenidos en los más relevantes en Holton (1995). Sin embargo la inmensa mayoría de estos trabajos se centran en el desarrollo de Depresiones Aisladas en Niveles Altos (*DANA's*) y vaguadas en altura en latitudes medias. También se han realizado algunos trabajos que relacionan procesos de *IET* con concentraciones altas de ozono en la troposfera media y baja sobre el Atlántico Norte Subtropical. En Izaña (28°N, 16°W, 2360m) son frecuentes los episodios en los que se observan valores muy altos de ozono (superiores a 70 ppbv) a finales de la primavera y principios de verano, coincidiendo con valores altos de  $Be^7$ , trazador radioactivo de masas de aire procedentes de la alta troposfera y/o la baja estratosfera (Cuevas, 1996; Prospero y otros, 1995). Las trayectorias isentrópicas confirman este origen. Por otro lado campañas intensivas de *ozonosondeos* llevadas a cabo en latitudes medias y en la región subtropical sobre el Atlántico Norte muestran una troposfera libre con valores de ozono y punto de rocío muy estratificada, típica de potentes subsidencias, principalmente en primavera y verano (Cuevas, 1996; Oltmans et otros., 1996). Estos episodios están conectados con el desarrollo de *DANA's* o vaguadas en altura que suelen desarrollarse al oeste de la Península Ibérica en esta época del año (Cuevas, 1996). En algunas ocasiones se desarrollan *DANA's* en las proximidades de Canarias dando lugar a procesos de intercambio estratosfera-troposfera y en consecuencia a valores muy altos registrados en el Observatorio de Izaña (Kentarchos et al., 2000). Folkins y Appenzeller (1996) mediante medidas in-situ desde aviones demuestran que también existe un transporte desde la troposfera subtropical a la estratosfera de latitudes medias. Baray y otros (2000) han presentado resultados de una campaña intensiva de *ozonosondeos* en el hemisferio sur (isla de La Reunión), en los que se muestra que la estructura en capas de la vorticidad potencial (*VP*) y el ozono, entre 6 Km y 10 Km, está íntimamente asociada a la presencia del Chorro Subtropical (*ChS*). Se han detectado incursiones de aire subtropical en la baja estratosfera de latitudes medias a partir de datos observados (por ejemplo, Dessler y otros, 1995). Kowol-Santel y Ancellet y otros (1999; 2000) han analizado y modelizado algunos casos de estudio de procesos de *IET* asociados al *ChS* sobre Canarias utilizando medidas desde un avión y *ozonosondeos*, proporcionando además una estimación del flujo de aire troposférico que entra en la estratosfera causado por *frontogénesis* en niveles altos asociada al *ChS*. Sin embargo estos estudios se basan en análisis de casos individuales.

En este trabajo se mostrarán intrusiones de aire troposférico subtropical en la estratosfera de latitudes medias, y de aire estratosférico en la troposfera subtropical, a lo largo de una campaña intensiva de casi tres meses realizada en el marco del Proyecto Europeo *TRACAS (TRANsport of Chemical species Across the Subtropical tropopause)*. El primer objetivo de este trabajo consiste en describir los procesos de *IET* asociados a un *ChS* no perturbado mediante un caso de estudio representativo. El segundo objetivo es el de mostrar la perturbación que sufre la alta troposfera y la baja estratosfera subtropical sobre Tenerife durante la campaña intensiva, como consecuencia de la presencia del *ChS*.

## 2. Datos y método. Descripción de la campaña de medidas

En el periodo entre el 1 de febrero y el 23 de abril de 1999 se llevó a cabo una campaña intensiva de ozonosondeos en Tenerife (28°N, 16°W), en la época en la que se esperaba que el *ChS* se encontrara localizado en las proximidades de Canarias.

Se realizaron 41 ozonosondeos utilizando sondas electroquímicas *ECC-6A*, radiosondas *RS-80* y globos de látex de 1200 g. El correcto funcionamiento de las ozonosondas fue comprobado en tierra utilizando una Unidad de generación de ozono y de control TSC-1. Para el cálculo del ozono residual se supuso una razón de mezcla de ozono constante igual a la registrada en el momento de la rotura del globo si éste había alcanzado una altura equivalente a 17 hPa. Se aplicó la corrección de la eficiencia de la bomba y se controló la temperatura de la "caja" siguiendo las recomendaciones sobre control de calidad de la *NDSC (Network for Detection the Stratospheric Change)*. Se calculó el cociente entre el ozono integrado en columna del ozonosondeo (comenzando en 2400 metros de altura) y el ozono total en columna medido con el espectrofotómetro *Brewer* nº 157 situado en el Observatorio de Izaña (estación *OMM* nº 300), como control de calidad. Prácticamente todos los coeficientes obtenidos durante la campaña se encontraban dentro del rango 0,95-1,05. La decisión de realización de un ozonosondeo (día y hora) se tomaba a partir de un sistema de alerta (utilizando correo electrónico) basado en las predicciones sobre la posición del *ChS* y de capas con valores altos de *VP* proporcionados por el *KNMI* (Instituto de Meteorología holandés).

Los análisis meteorológicos utilizados fueron los del *HIRLAM (High Resolution Limited Area Model)* con el *McIDAS* del *CMT* en Canarias Occidental. Para el estudio de mezcla *cuasi-isentrópica* a través del *ChS* se analizaron campos isentrópicos entre 300 K y 400 K utilizando el ozono y el vapor de agua como trazadores.

Se obtuvieron concentraciones de diferentes gases traza estratosféricos ( $O_3$ , HF y HCl) y gases traza troposféricos ( $CH_4$  y  $N_2O$ ) entre 11 y 18 Km mediante un interferómetro *FTIR (Fourier Transform Infra Red)*, Bruker IFS 120M del *Forschungszentrum Karlsruhe GMBH (IMK, Alemania)* que está instalado en el Observatorio de Izaña desde enero de 1999 (Schneider y otros, 1999).

## 3. Resultados

### 3.1 Caso de análisis de 25 y 26 de marzo de 1999

Se eligió este caso de análisis por ser muy representativo de los procesos *IET* que tiene lugar alrededor del *ChS*. El 25 de marzo de 1999 el *ChS* está localizado justo encima de Canarias, tal y como se puede ver en la Figura 1.

El centro del *ChS* se localizó entre 9,6 Km y 12, 2 Km con velocidades del viento superiores a  $60 \text{ ms}^{-1}$  en la dirección W-SW. La imagen de vapor de agua del *Meteosat* muestra una banda oscura que indica subsidencia generalizada mientras que la banda de cirros coincide con una región de alto contenido en vapor de agua. La *VP* muestra una clara "barrera" situada justo en la posición del *ChS*, con valores entre 1 y 2 unidades de vorticidad potencial (*UVP*), que separa claramente la baja estratosfera de latitudes medias de la alta troposfera subtropical. La primera tropopausa, la correspondiente a latitudes medias, no es detectada ni el día 25 a las 12 *TMG* ni el día 26 a las 12 *TMG*.

Promediando todos los ozonosondeos realizados durante la campaña se ha obtenido un valor umbral de 160 ppbv, que corresponde al ozono promedio encontrado al nivel de la primera tropopausa, indicando éste el límite inferior de las concentraciones de ozono en la estratosfera. Como se puede ver en la Figura

2, valores muy altos de ozono (superiores a 160 ppbv) se observan entre 330 K y 335 K. En esta capa se observan también valores muy altos de la frecuencia *Brünt-Väisälä* (FBV) y una razón de 99 ppbv/*UVP*, lo que indica una entrada de aire procedente de niveles estratosféricos.

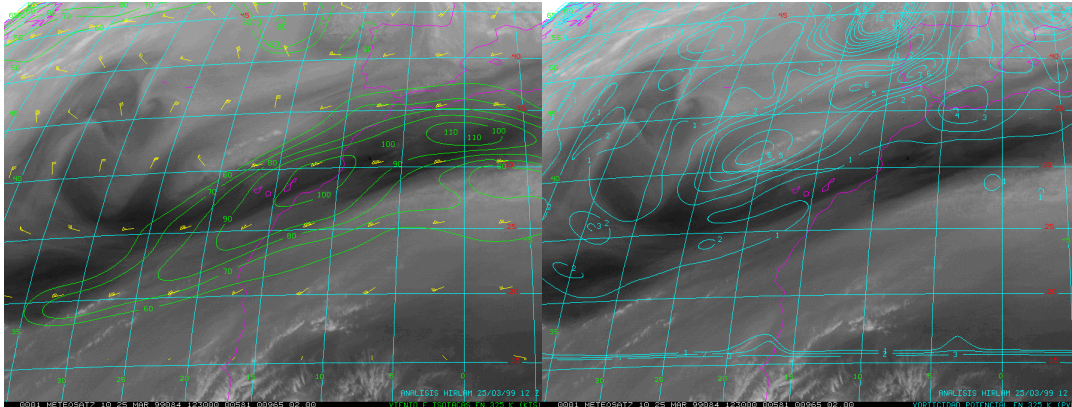


Figura 1: Imagen de vapor de agua del *Meteosat* con isotacas en 325 K (izquierda), y *VP* en el mismo nivel (derecha).

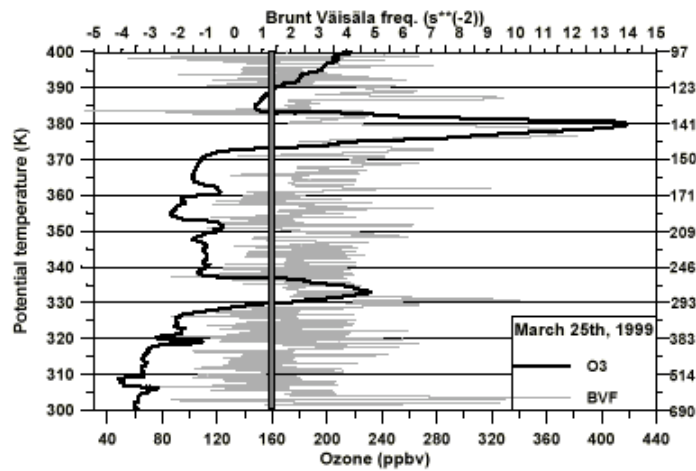


Figura 2: Perfil vertical de ozono (ppbv) y Frecuencia *Brünt-Väisälä* ( $s^{-2}$ ) entre 300 K (3,2 Km) y 400 K (16,5 Km) el día 25 de marzo de 1999.

Por encima de este pico se encuentran valores muy bajos de ozono entre 340 K y 370 K con razones *O3/VP* de alrededor de 30 ppbv/*UVP*. En esta capa se observan valores negativos de la *FBV* lo que indica inestabilidad. La sección vertical de la humedad relativa (Figura 3c) muestra una entrada de aire húmedo de la troposfera alta subtropical en la baja estratosfera lo que explica los valores bajos observados de ozono (86 ppbv en 355 K). Justo por encima de 380 K se observan valores bajos de ozono y valores negativos de *FBV*.

El día 25 de marzo el *ChS* se acelera sobre Tenerife, por lo que tenemos una Circulación Directa (*CD*) en la región de entrada del *ChS*. Con esta circulación se esperan ascensos bajo zonas de divergencia en altura, a la derecha de la entrada del *ChS*. Por el contrario se esperan descensos en la parte izquierda del *ChS*. La *CD* se puede deducir del conjunto de gráficas de la Figura 3.

El día siguiente, 26 de marzo la posición del *ChS* se mueve hacia el sur, siendo localizado su centro en torno a 25°N. La primera tropopausa es encontrada a 11,1 Km (229 hPa, 342 K) con 5,1 *UVP* y 357 ppbv (Figura 4). Justo de bajo de la tropopausa encontramos una capa rica en ozono (alrededor de 360 ppbv a 340 K) y una razón *O3/VP* alta (70 ppbv/*UVP*). Esta capa es el resultado de una intrusión estratosférica en la troposfera subtropical. El perfil vertical de ozono (Figura 4) es muy similar al del día 25 pero los valores observados entre 340 K y 370 K son ligeramente superiores. Además, la capa con valores bajos de ozono y valores negativos de *FBV* observada el día 25 en 380 K ha desaparecido, indicando este hecho

que la inyección de aire troposférico subtropical en la estratosfera de latitudes medias se debilita cuando el *ChS* se mueve hacia el sur.

Se han realizado secciones verticales de diferentes parámetros meteorológicos a diferentes longitudes (desde 30°W a 0°) tanto para el 25 como el 26 de marzo de 1999, mostrando resultados muy similares (no mostrados aquí). Se observa en todos ellos un desdoblamiento de la tropopausa asociado al *ChS* y las correspondientes intrusiones: aire troposférico subtropical en la estratosfera de latitudes medias, e intrusiones estratosféricas en la troposfera subtropical. Estos resultados muestran claramente que los procesos IET asociados al *ChS* tienen lugar a lo largo de miles de kilómetros. La mayor parte de los análisis llevados a cabo en esta campaña intensiva muestran un desdoblamiento de la tropopausa similar al observado los días 25 y 26 de marzo.

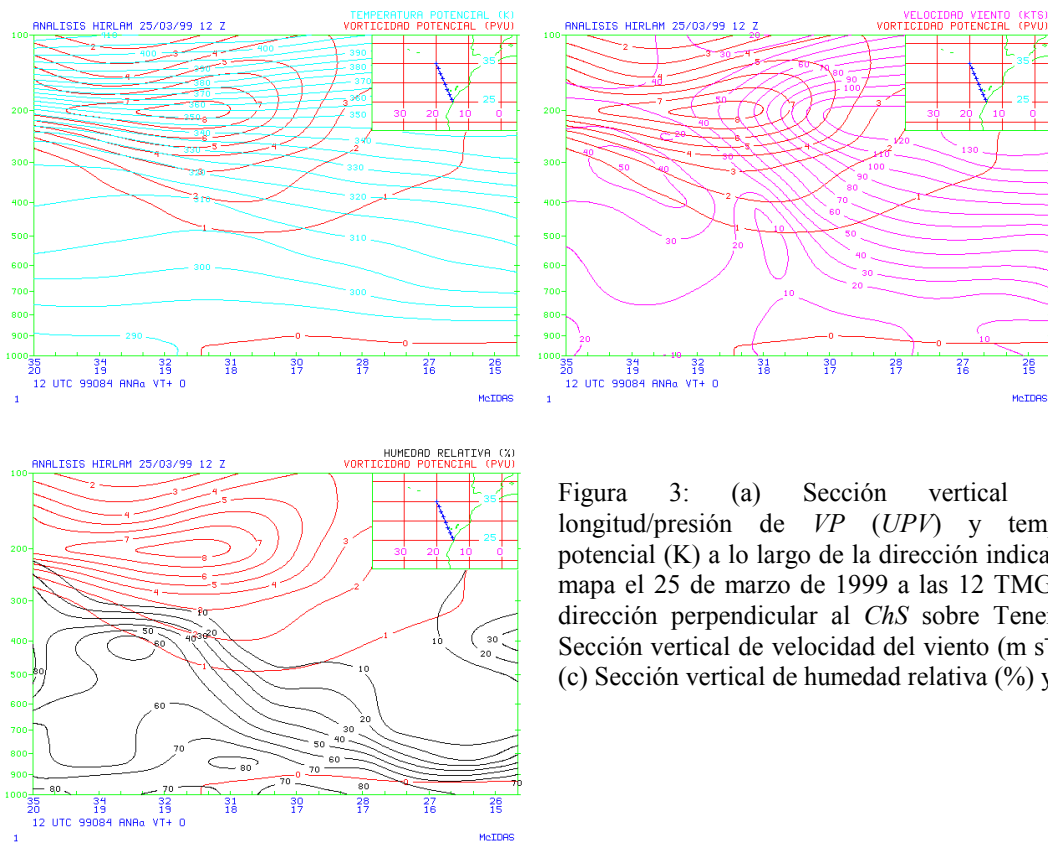


Figura 3: (a) Sección vertical Latitud-longitud/presión de *VP* (*UPV*) y temperatura potencial (K) a lo largo de la dirección indicada en el mapa el 25 de marzo de 1999 a las 12 TMG en una dirección perpendicular al *ChS* sobre Tenerife. (b) Sección vertical de velocidad del viento ( $m s^{-1}$ ) y *VP*. (c) Sección vertical de humedad relativa (%) y *VP*.

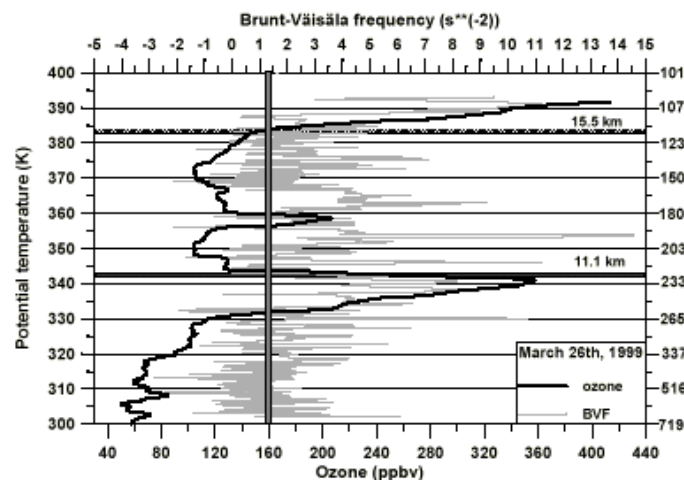


Figura 4: Perfil vertical de ozono (ppbv) y Frecuencia *Brünt-Väisälä* ( $s^{-2}$ ) entre 300 K (3,2 Km) y 400 K (16,5 Km) el día 26 de marzo de 1999.

### 3.2 Procesos de Intercambio estratosfera-troposfera asociados a la posición del ChS

La tropopausa se localiza durante toda la campaña entre 12 Km y 13 Km. Se encuentra un acuerdo excelente entre el ozono y la posición geográfica del *ChS*. A medida que el *ChS* se mueve hacia el norte y se sitúa en posiciones cercanas a Canarias, se van registrando valores de ozono en la baja estratosfera (por encima de 13 Km). Por el contrario, capas ricas en ozono con valores superiores a 160 ppbv, se observan en la alta troposfera, entre 9km y 12 Km. Este hecho confirma el papel jugado por el *ChS* en el transporte de aire troposférico subtropical en la estratosfera de latitudes medias. Estos resultados están de acuerdo con Timmis y otros (1999) quienes encontraron una estructura en capas de la *VP* entre 360 K y 380 K, por encima y al norte del máximo de velocidad del *ChS* (350 K), entre 30°N y 40°N.

Cuando el *ChS* se encuentra situado sobre Canarias capas con valores altos de ozono son registradas justo debajo de la tropopausa, entre 11 Km y 12 Km, lo que indica intrusiones estratosféricas en la alta troposfera subtropical.

En la Figura 5 se muestra la evolución del ozono total y de dos componentes atmosféricos, el  $N_2O$  de origen claramente troposférico, y del HF, de carácter marcadamente estratosférico medidos con el *FTIR* durante la campaña intensiva de ozonosondeos. Como se puede ver el  $N_2O$ , el cual correlaciona muy bien a su vez con el  $CH_4$  (otro gas de origen troposférico), muestra una correlación negativa con el ozono. Por el contrario el ozono correlaciona bien con el HF y con HCl (no mostrado aquí), gases de origen estratosférico como el primero, confirmando el hecho de que la posición del *ChS* modula las concentraciones de gases marcadamente troposféricos y estratosféricos, en la baja estratosfera y la alta troposfera, respectivamente.

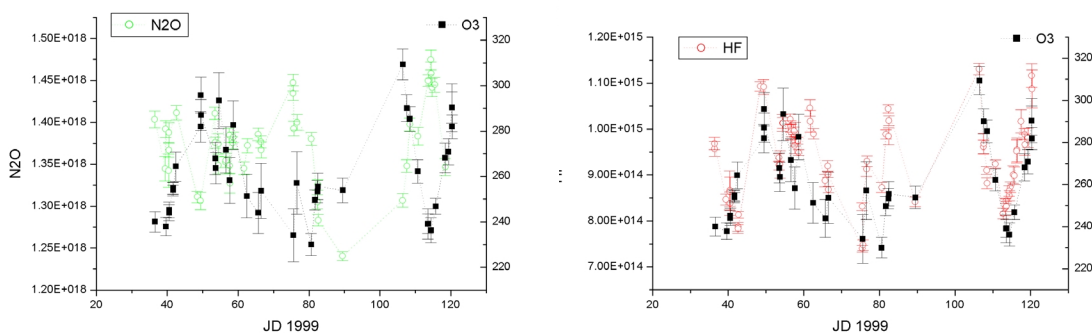


Figura 5: Evolución del ozono total y de  $N_2O$  (izquierda), y evolución del ozono y del HF (derecha), durante la campaña intensiva de ozonosondeos de 1999.

## 4. Conclusiones

Se observa una excelente correlación entre la concentración de ozono y la posición geográfica del *ChS*. A medida que el *ChS* se mueve hacia el norte y se sitúa cerca de Canarias, se registran valores más bajos de ozono en la baja estratosfera, por encima de 13 Km. Por el contrario se observan capas ricas en ozono (con valores superiores a 160 ppbv) en la alta troposfera, entre 9 Km y 12 Km. Estos resultados son corroborados por las medidas de otros componentes obtenidos con el *FTIR*. Este hecho confirma el papel jugado por el *ChS* en el transporte de aire de la troposfera subtropical hacia la estratosfera de latitudes medias.

El análisis estadístico de los ozonosondeos muestra la entrada de masas pobres en ozono procedentes de la alta troposfera subtropical en la baja estratosfera de latitudes medias. Estos procesos de intercambio estratosfera-troposfera se observan especialmente bien cuando el *ChS* se sitúa al sur, cerca de Canarias, o cuando se encuentra justo en la vertical de las islas. Por otro lado se observan inyecciones de aire rico en ozono en la troposfera subtropical (justo debajo de la tropopausa) cuando el *ChS* se encuentra situado al norte de Canarias.

Se puede afirmar, por tanto, que el *ChS* perturba significativamente la baja estratosfera y la alta troposfera (entre 9 Km y 16 Km) sin que el mismo se encuentre necesariamente perturbado por una *DANA* o una vaguada en altura.

### **Agradecimientos**

El Proyecto europeo *TRACAS* (*Transport of Chemical species Across Subtropical tropopause*, ENV4-CT97-0546) financió la campaña intensiva de ozonosondeos que tuvo lugar entre 1 de febrero y el 23 de abril de 1999. Los autores de este trabajo quieren agradecer a Sergio Afonso, Virgilio Carreño y Carlos Torres, del Observatorio Atmosférico de Izaña, su magnífica labor en la realización de los ozonosondeos.

### **Referencias**

Baray, J.-L., V. Daniel, G. Ancellet, and B. Legras, 2000: Planetary-scale tropopause folds in the southern subtropics, *Geophys. Res. Lett.*, Vol 27, 353-356.

Cuevas, E., 1996: Estudio del Comportamiento del Ozono Troposférico en el Observatorio de Izaña (Tenerife) y su Relación con la Dinámica Atmosférica, Memoria de Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, disponible en CD bajo pedido, ISBAN 84-669-0399-2, enero 1996.

Dessler, A.E., E.J. Hints, E.M. Weinstock, J.G. Anderson, and K.R. Chan, 1995: Mechanisms controlling water vapor in the lower stratosphere: "A tale of two stratospheres", *J. Geophys. Res.*, 100, 23,167-23,172.

Folkens, I., and C. Appenzeller, 1996: Ozone and potential vorticity at the subtropical tropopause break, *J. Geophys. Res.*, 101, 787-792.

Holton, J.R., 1979: *An Introduction to Dynamic Meteorology*, 2nd Edition, pp 391.

Kentarchos, A., G.J. Roelofs, J. Lelieveld, and E. Cuevas, 2000: On the origin of elevated surface ozone concentrations at Izaña Observatory during the last days of March 1996: a model study, Accepted in *Geophys. Res. Lett.*

Kowol-Santen, J., G. Ancellet, E. Cuevas, 1999: Analysis of Transport Across the Subtropical Tropopause, Proceedings Fifth European Symposium on Stratospheric Ozone, St Jean de Luz (France), 27th of September to 1st of October 1999.

Kowol-Santen, J., G. Ancellet, E. Cuevas, 2000: Transport across the Subtropical Tropopause: Observations and Model Guided Analysis, Quadrennial Ozone Symposium - Sapporo 2000 -, Sapporo, Hokkaido, Japan, 3 - 8 July 2000.

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, and B.J. Johnson, 1996: Summer and Spring Ozone Profiles Over the North Atlantic from Ozononesonde Measurements, *J. Geophys. Res.*, 101, D22, 29179-29200.

Prospero, J.M., R. Schmitt, E. Cuevas, D. Savoie, W. Graustein, K. Turekian, A. Volz-Thomas, A. Diaz, S. Oltmans, and H. Levy-II, 1995: Temporal Variability of Summer-time Ozone and Aerosols in the Free Troposphere over the Eastern North Atlantic, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 21, 2925-2928.

Schneider, M., T. Blumenstock, F. Hase, H. Fischer, M. Höpfner, P. Thomas, E. Cuevas, J. Sancho, A. Redondas, M. Yela, O. Puentedura, 1999: Ground-based FTIR measurements at Izaña Observatory on Tenerife in 1999, Proceedings Fifth European Symposium on Stratospheric Ozone, St Jean de Luz (France), 27th of September to 1st of October.

Timmis, C., G. Vaughan, E. Cuevas, Z. Xiangdong, 1999: Evidence of Exchange between the Troposphere and Stratosphere in the Region of the Subtropical Jet Stream, IUGG, The 22nd Union General Assembly, Birmingham (United Kingdom), July.