

CLIMATOLOGÍA DE TROPOPAUSAS TÉRMICAS SIMPLES Y DOBLES EN EL SUR DE SUDAMÉRICA E IMPLICANCIAS PARA EL INTERCAMBIO ESTRATÓSFERA-TROPOSFERA DE LA REGIÓN

Adrián E. Yuchechen ^(1,2), Susana A. Bischoff ⁽³⁾, Pablo O. Canziani ^(1,2)

- (1) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina
- (2) Equipo Interdisciplinario para el Estudio de Procesos Atmosféricos en el Cambio Global (PEPACG), Pontificia Universidad Católica Argentina (UCA), Buenos Aires, Argentina
- (3) Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Argentina
ae@uca.edu.ar

RESUMEN

La tropopausa juega un papel fundamental en el intercambio troposfera-estratósfera (stratosphere-troposphere exchange, STE) ya que, por definición, marca el límite entre ambas capas de la atmósfera. Sin embargo, al existir distintas definiciones para la tropopausa el STE resultaría en principio dependiente de la definición de tropopausa adoptada. Dos de las definiciones de tropopausa más comúnmente utilizadas en la literatura son la dinámica y la térmica. En cuanto al STE, existen trabajos que efectúan comparaciones utilizando ambas definiciones de tropopausa analizando semejanzas y diferencias, pero mayormente focalizados sobre situaciones atmosféricas particulares, usualmente eventos extremos.

El sistema de coordenadas óptimo para describir a la tropopausa dinámica (térmica) es el isentrópico (cartesiano), en el cual la temperatura potencial (altura geométrica) se usa como coordenada vertical. La descripción de un proceso físico puede depender del sistema de coordenadas utilizado, pero no así los resultados obtenidos. Al menos para las grandes escalas de la atmósfera, las cuales pueden ser representadas de manera adecuada por una climatología de valores medios y de variabilidades, las regiones más activas de STE deben ser coincidentes sin importar la definición de tropopausa utilizada.

El propósito de este trabajo es analizar el STE para la región sur de Sudamérica desde el punto de vista de la tropopausa térmica a través de campos espaciales de valores medios y de variabilidad de distintos parámetros de tropopausas simples y dobles en las cuatro estaciones del año. Las tropopausas se obtienen de datos de radiosondeo sobre diversas estaciones aerológicas ubicadas sobre Argentina, Chile, Bolivia, sur de Brasil, e Islas Malvinas.

Los resultados encontrados indican que la trayectoria que siguen las parcelas de aire estratosférico hacia la alta troposfera se inicia en la baja estratósfera de latitudes medias, es mayormente cuasi-horizontal y en dirección a menores latitudes, y de carácter eminentemente turbulento debido a la presencia de corrientes en chorro de altura que dan lugar a números de Richardson pequeños. Todos estos aspectos se encuentran en concordancia con los modelos establecidos para los procesos de STE de la tropopausa dinámica, y así ambas definiciones de tropopausa pueden conciliarse desde el punto de vista del STE.

ABSTRACT

The tropopause plays a key role in the stratosphere-troposphere exchange (STE) since by definition it delimits these two layers of the atmosphere. As several definitions of tropopause exist,

STE processes seemingly depend on the chosen tropopause framework. Two definitions are most commonly used in the literature, namely the dynamic and the thermal tropopauses. Most research efforts regarding STE point out similarities and differences using both definitions, albeit mainly focused on particular atmospheric situations, usually extreme events.

The optimal coordinate system used to describe the dynamic (thermal) tropopause is the isentropic (Cartesian) one, in which potential temperature (geometrical height) is the vertical coordinate. The description of any physical process may depend on the chosen coordinate system yet results not. At least concerning the greater atmospheric scales, which can be adequately represented with a climatology of mean values and variabilities, most active STE regions should be coincident irrespective of the tropopause definition.

The purpose of the present work is to analyze the essential features of STE processes within southern South America from a thermal tropopause standpoint with the aid of seasonal spatial fields of mean values and variability for several single and double tropopause parameters. Tropopauses are obtained from radiosonde data taken at several sounding stations in Argentina, Chile, Bolivia, southern Brazil, and Falkland Islands.

Results show that stratospheric air parcels reaching the upper troposphere travel from the mid-latitude lower stratosphere quasi-horizontally towards lower latitudes in a turbulent-natured process owing to the presence of upper level jets that leads to low Richardson numbers. These results are in compliance with widely known features of STE processes within the dynamic tropopause framework, and hence from an STE point of view both tropopause definitions can be conciliated.

1. INTRODUCCIÓN

Las corrientes en chorro (tradicionalmente denominadas *jets*) de la alta troposfera/baja estratósfera (upper troposphere/lower stratosphere, UT/LS) son una manifestación de viento térmico. Particularmente los jets semipermanentes como el jet subtropical (subtropical jet, STJ) usualmente fluyen hacia el este y adoptan trayectorias en forma de meandro por causas diversas, orografía por ejemplo. Estas trayectorias curvas generan inestabilidades (Charney, 1947) que son máximas dentro de un rango de longitudes de onda λ_{\max} . A través de modelos cuasi-geostróficos se ha encontrado que $\lambda_{\max} \approx 2000 - 4000$ km (e.g., Staley y Gall, 1977) y que λ_{\max} aumenta con la altura. Es importante destacar que los valores encontrados se ubican dentro de la escala sinóptica. De acuerdo a Staley y Gall (1977) $\lambda_{\max} \approx 4000$ km para la región de la UT/LS. Se define al número de Richardson como un número sin dimensión que establece la relación entre la frecuencia de Brunt-Väisälä, una medida de la estabilidad estática, y la cortante vertical del viento horizontal, en la forma $Ri = g \partial \ln \theta / \partial z | \partial \mathbf{v}_H / \partial z |^{-2}$. Cuando este número adopta valores menores a 0,25 (Peixoto y Oort, 1992, p. 225) la atmósfera pasa de régimen estratificado a turbulento, y se torna inestable. Así, las regiones cercanas a los jets son zonas dinámicamente inestables en las cuales las amplitudes de las ondas crecen con el tiempo. Bush y Peltier (1994) encontraron que durante la evolución no lineal de las ondas inestables con $\lambda_{\max} \approx 4000$ km existe ingreso de aire estratosférico hacia la troposfera, el cual se produce luego de que el jet se ha intensificado debido a circulaciones ageostróficas, rompiendo la tropopausa, y pasándose de tropopausa simple a tropopausa doble (o múltiples eventualmente). En el caso de tropopausas dobles, el jet se posiciona entre ambas tropopausas y como el proceso tiene lugar en cercanías de regiones turbulentas el intercambio también es de carácter turbulento y puede ser visualizado a través de campos de variabilidad, en donde los máximos valores dan cuenta de la intensidad del proceso. El propósito de este trabajo es

la caracterización de tropopausas simples y dobles en el sur de Sudamérica a través de campos de valores medios y de variabilidad obtenidos para cada una de las cuatro estaciones del año, poniendo énfasis en el intercambio estratósfera-troposfera de grandes escalas en la región.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

Se utilizaron datos de radiosondeo obtenidos de la base de datos de la Universidad de Wyoming sobre 22 estaciones aerológicas cubriendo el período enero 1973-diciembre 2007 para la mayoría de las estaciones. Los símbolos \blacklozenge en los distintos paneles de la Figura 1 indican la ubicación de las mismas. Para cada uno de los sondeos disponibles se calcularon las tropopausas térmicas en base a la definición de la Organización Meteorológica Mundial (e.g. World Meteorological Organization, 1992) por medio de un programa en lenguaje FORTRAN con la capacidad de detectar hasta cinco tropopausas distintas por sondeo, aunque en este trabajo solamente se estudian tropopausas simples y dobles. Las variables retenidas para cada tropopausa detectada son presión, altura, temperatura, temperatura potencial e intensidad de viento. A todas estas variables se les aplicó un proceso de selección para descartar valores potencialmente erróneos. Este criterio de selección fue aplicado a cada variable y para cada hora de observación en forma separada. En palabras, cuando el dato se aparta en valor absoluto en más de dos unidades de su desvío estándar mensual para una hora establecida, ese nivel de tropopausa es descartado. Las tropopausas que superaron el proceso de selección fueron utilizadas en los cálculos de valores medios y desvíos estándar estacionales de cada una de sus variables para verano (DEF), otoño (MAM), invierno (JJA) y primavera (SON), sin hacer distinción entre las horas a las que fueron efectuadas las observaciones, eliminando de esta manera cualquier sesgo que algunos de los datos pudiera incluir y, por ejemplo, el efecto que introduciría la radiación solar en la temperatura (Luers y Eskridge, 1998) si sólo se incluyeran sondeos diurnos se ve minimizado con la metodología utilizada.

3. RESULTADOS

La falta de espacio físico reduce la posibilidad de mostrar todos los resultados encontrados, de manera que se limitará el análisis a ciertas variables. La Figura 1 muestra los campos medios de presión de tropopausa simple para las cuatro estaciones del año. En virtud de que la presión y la altura se encuentran vinculadas por medio de la ecuación hidrostática $\partial p / \partial z = -\rho g$, ambas variables se relacionan de manera inversa y mayores (menores) presiones se corresponden con tropopausas más bajas (altas).

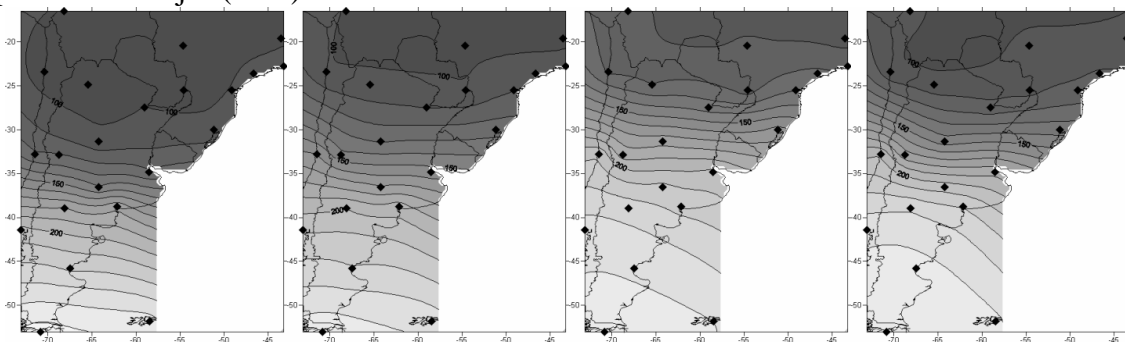


Figura 1 – Campos medios estacionales de presión de tropopausa simple. De izquierda a derecha: verano, otoño, invierno y primavera. Las isobaras se encuentran trazadas cada 10 hPa y los colores más claros corresponden a mayores presiones (tropopausas más bajas).

Puede observarse que las mayores presiones (menores alturas) se ubican hacia el sur en todos los casos. A mayor cercanía de la tropopausa con la superficie terrestre mayor posibilidad de tiempo severo (Yucheche, 2009), de manera que los resultados aquí mostrados son consistentes con aquellos que establecen que el flanco polar del STJ es más ciclogénico (e.g. Hoskins y Hodges, 2005). Utilizando las posiciones del STJ mostradas en Hordij y Bordón (1987) puede verse un claro apretamiento de las isobaras en la región de dominancia del mismo, rasgo que a la vez permite distinguir una marcada diferencia de alturas de la tropopausa a ambos lados del jet. Asimismo, puede notarse cómo la posición del STJ sigue la migración del Sol, alcanzando su posición más austral (boreal) en verano (invierno) (ver también Hordij y Bordón, 1987).

Cuando el jet se intensifica la tropopausa simple desciende hasta romperse, dando lugar a tropopausas dobles. La presencia simultánea de tropopausas simples y dobles en la vertical es imposible. Climatológicamente, sin embargo, la posición de la tropopausa simple se encuentra por encima (debajo) de la tropopausa inferior (superior) (Bischoff et al., 2007; Yucheche, 2009). Una manera de analizar el comportamiento de la tropopausa doble es presentando la diferencia de alturas entre la superior y la inferior (Figura 2). Los espesores de tropopausa doble adoptan una posición aproximadamente zonal, aumentando con la latitud. Definiendo la región de intercambio entre la estratósfera y la troposfera como la capa situada entre las tropopausas inferior y superior, puede verse que tal intercambio es más activo en latitudes extratropicales, en concordancia con resultados conocidos para el Hemisferio Norte (e.g. Danielsen, 1968) y con aquellos que establecen que la tropopausa extratropical responde a perturbaciones baroclínicas (Haynes et al., 2001).

La variabilidad estacional de la presión para tropopausas simples se muestra en la Figura 3, mientras que para tropopausas dobles la Figura 4 (5) corresponde a tropopausa inferior (superior).

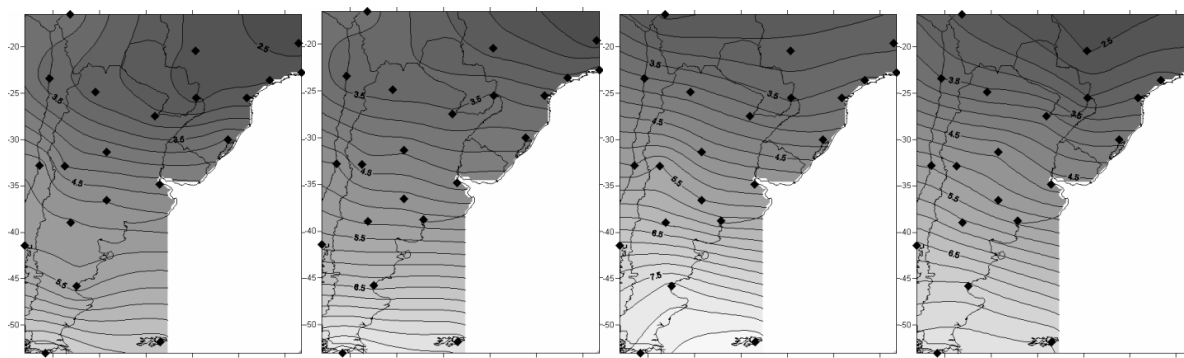


Figura 2 – Ídem a Figura 1 para espesores de tropopausa doble. Las isólinas se encuentran trazadas cada 250 m y los colores más claros corresponden a mayores espesores.

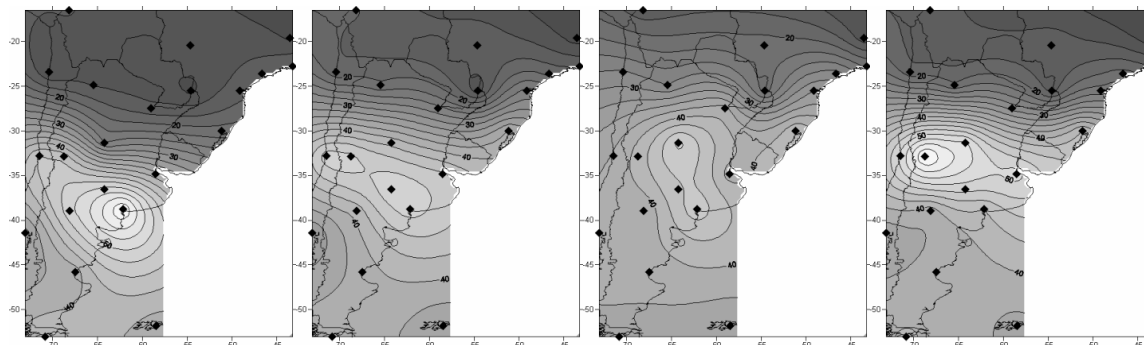


Figura 3 – Variabilidad estacional (representada por el desvío estándar) de la presión para tropopausa simple. De izquierda a derecha: verano, otoño, invierno y primavera. Los colores más claros corresponden a mayor variabilidad.

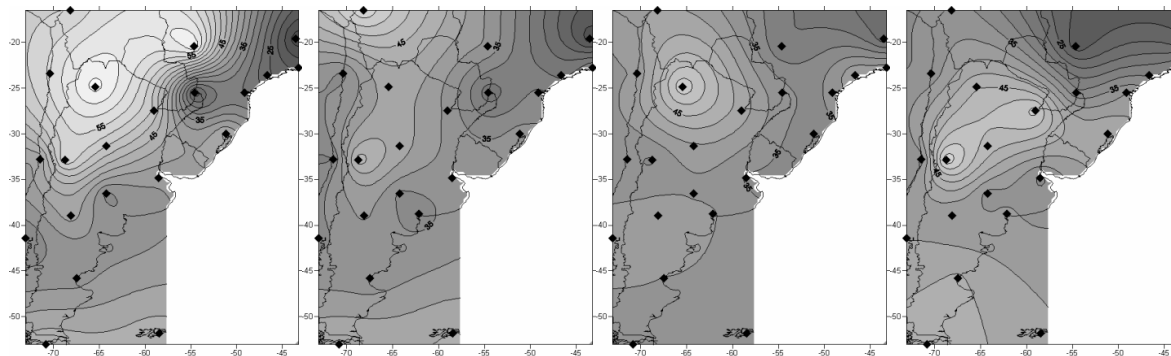


Figura 4 – Ídem Fig. 3 para tropopausa inferior.

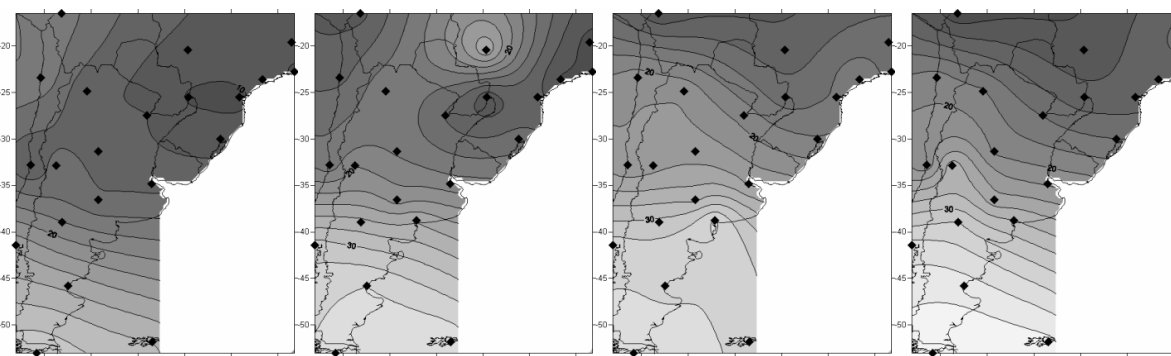


Figura 5 – Ídem Fig. 3 para tropopausa superior.

Según se mencionó, la mayor variabilidad en cada nivel de las distintas tropopausas es un indicador de intercambio turbulento, de manera que los campos mostrados describen climatológicamente la trayectoria seguida por el aire estratosférico hacia la baja troposfera. Puede verse que a lo largo del año tal trayectoria es cuasi-horizontal, con un descenso hacia menores latitudes. Estos resultados están de acuerdo con los obtenidos para tropopausa dinámica (e.g. Shapiro et al., 1987).

4. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que, climatológicamente, las definiciones de tropopausa térmica y dinámica pueden reconciliarse, puesto que la descripción de un proceso físico no puede depender del sistema de coordenadas utilizado para describirlo. El ingreso de aire estratosférico hacia la troposfera en la región analizada se inicia en la baja estratósfera de latitudes medias y se dirige cuasi-horizontalmente hacia menores latitudes. Si se considera que la vorticidad potencial es constante durante el proceso, puede mostrarse (Yucheche, 2009) que la presencia de aire estratosférico en la troposfera aumenta considerablemente la vorticidad ciclónica, con la consecuente posibilidad de tiempo severo. Nuevamente, estos resultados están de acuerdo con aquellos que indican la existencia de una región altamente ciclogénica asociada con el STJ (Hoskins y Hodges, 2005), si bien es importante mencionar que cualquier jet puede iniciar el proceso de intercambio.

5. AGRADECIMIENTOS

Este estudio forma parte de la Tesis Doctoral del primer autor, llevada a cabo a lo largo de 5 años con una beca otorgada por el CONICET y con lugar de trabajo dentro de la 1a ed. - Buenos Aires: Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, 2009
ISBN 978-987-25291-1-6. Ciencias de la Tierra. I.
Pag. 110, 115, 2009

Pontificia Universidad Católica Argentina. Expresamos nuestra gratitud al Dr. Héctor Ciappesoni por hacernos notar la existencia de la referencia de Hordij y Bordón (1987). También queremos expresar nuestra gratitud hacia la Universidad de Wyoming por poner a disposición del público su base de datos global de radiosondeos. El presente trabajo fue financiado con los subsidios CONICET PIP2004 5276 y BID 1728/OC-AR PICT 2004-26094.

6. REFERENCIAS

- Bischoff, S. A., P. O. Canziani, y A. E. Yuchechen, 2007: The tropopause at southern extratropical latitudes: Argentine operational rawinsonde climatology, *Int. J. Climatol.*, **27**, 189-209, doi:10.1002/joc.1385
- Bush, A. B.G., y W. R. Peltier, 1994: Tropopause Folds and Synoptic-Scale Baroclinic Wave Life Cycles, *J. Atmos. Sci.*, **51** (12), 1581-1604
- Charney, J. G., 1947: The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current, *J. Meteor.*, **4** (5), 135-162
- Danielsen, E. F., 1968: Stratospheric-Tropospheric Exchange Based on Radioactivity, Ozone and Potential Vorticity, *J. Atmos. Sci.*, **25**, 502-518
- Haynes, P., J. Scinocca, y M. Greenslade, 2001: Formation and maintenance of the extratropical tropopause by baroclinic eddies, *Geophys. Res. Lett.*, **28** (22), 4179-4182
- Hordij, J. H., y S. Bordón, 1987: Localización de las corrientes en chorro en relación con los frentes en superficie en América del Sur, *Anales del II Congreso Interamericano de Meteorología/V Congreso Argentino de Meteorología*, Buenos Aires, Argentina, 30 noviembre-4 diciembre
- Hoskins, B. J., y K. I. Hodges, 2005: A New Perspective on Southern Hemisphere Storm Tracks, *J. Climate*, **18**, 4108-4129
- Luers, J. K., y R. E. Eskridge, 1998: Use of Radiosonde Temperature Data in Climate Studies, *J. Climate*, **11**, 1002-1019
- Peixoto, J. P., y A. H. Oort, 1992: *The Physics of Climate*, Springer-Verlag, NY, xxxix + 520 pp.
- Shapiro, M. A., T. Hampel, y A. J. Krueger, 1987: The Arctic Tropopause Fold, *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 444-454
- Staley, D. O., y R. L. Gall, 1977: On the Wavelength of Maximum Baroclinic Stability, *J. Atmos. Sci.*, **34** (11), 1679-1688
- World Meteorological Organization, 1992: *International Meteorological Vocabulary – No. 182*, Second edition, Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 784 pp.
- Yuchechen, A. E., 2009: *La Tropopausa Térmica en el Sur de Sudamérica: Climatología, Variabilidad, y Relaciones con la Troposfera Media y la Baja Estratósfera*, Tesis de Doctorado, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina, 311 pp.