

# EVENTOS DE CIRRUS Y MÚLTIPLES TROPOPAUSAS SOBRE BUENOS AIRES

Mario B. Lavorato<sup>(1,2)</sup>, Susan G. Lakkis<sup>(3,4)</sup>, Pablo O. Canziani<sup>(4,5)</sup>, Héctor Lacomi<sup>(1,2)</sup>

1. División Radar Láser, Dto. Láser, CITEDEF, Juan B. La Salle 4397, B1603ALO, Villa Martelli, Buenos Aires, Argentina.
2. Grupo TAMA, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Haedo, París 680, Haedo, Buenos Aires, Argentina.
3. Facultad de Ciencias Agrarias, Pontificia Universidad Católica Argentina, Cap. Gral. Ramón Freire 183, C1426AVC, Buenos Aires, Argentina.
4. PEPACG (Pontificia Universidad Católica Argentina - CONICET), Cap. Gral. Ramón Freire 183, C1426AVC, Buenos Aires, Argentina.
5. Consejo Superior de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.  
*e-mail:* [mlavorato@citedef.gob.ar](mailto:mlavorato@citedef.gob.ar)

Recibido 28/02/11; aprobado 05/08/11

El trabajo que se desarrolla a continuación corresponde a observaciones con Lidar de Retrodifusión de Cirrus en las latitudes medias sobre Buenos Aires entre el 2002 y el 2003 con eventos de Múltiples Tropopausas (MT). Estos son comparados con el perfil de temperatura del Radiosondeo de la estación de Ezeiza. En el presente trabajo se discute la variabilidad temporal de las propiedades de la MT. Los resultados muestran un ciclo anual con una frecuencia mínima durante el mes de marzo. Cuando el tope del cirrus se encuentra por encima de la primera tropopausa, en el 25 % de los casos la base del cirrus no se encuentra necesariamente encima de esta; resultando entonces que el cirrus se encuentra cruzando la región entre tropopausas. Comparando los resultados de los cirrus con sus distribuciones generales, respecto a los que se encuentran cruzando la tropopausa, ambos muestran similares características ópticas (espesor óptico).

This study presents a comparison of lidar observations of midlatitude cirrus clouds over Buenos Aires between 2002 and 2003 with multiple tropopauses (MT) retrieved from rawinsonde temperature retrievals. The temporal variability of MT properties is discussed. Results show an annual cycle, with MT frequency reaching its lowest point in March. Comparison with lidar observations show that cirrus clouds show a preference for being located close below the first tropopause. When the cloud top is above the first tropopause, in 25% of cases, the cloud base is not necessary above it, resulting in a cirrus cloud crossing the inter-tropopause region. Compared with the general distribution of cirrus, cross-tropopause cirrus clouds show a similar geometrical thickness than intertropopause cirrus clouds.

## I. INTRODUCCIÓN

El "Intergovernmental Panel on Climate Change"<sup>[1]</sup> (IPCC) (2001) ha identificado a las nubes denominadas Cirrus como área prioritaria de estudio e investigación<sup>[2]</sup> debido a su influencia dinámica en el balance radiativo y su efecto sobre el clima en la tierra. Los Cirrus se encuentran a gran altura donde los mecanismos de formación y evolución resultan sensibles a las condiciones atmosféricas en la troposfera superior y en la estratosfera inferior (UTLS - Upper Troposphere and Lower Stratosphere). Por lo tanto, estudiar las condiciones de la UTLS podrían darnos importantes pistas sobre lo que impulsa la formación de los Cirrus y cómo predecir mejor sus propiedades ópticas y radiativas. La inversión térmica que provoca la Tropopausa<sup>[3]</sup>, ejerce una presión que comprime al Cirrus y provoca un efecto tal que limita la evolución en altura de la nube<sup>[4],[5]</sup>. Varios estudios se han centrado en estudiar las propiedades de los Cirrus cerca de la Tropopausa, sobre todo en las latitudes tropicales. De ahí surge que la variabilidad en la estructura termodinámica de la Tropopausa puede afectar las propiedades de los Cirrus cerca de la transición UTLS y viceversa<sup>[6],[7],[8],[9],[10]</sup>.

Las Tropopausas múltiples (MT) son los síntomas de los fenómenos físicos reales que pueden ayudar a detectar y analizar las condiciones atmosféricas específicas de la formación de este tipo de nubes. El

presente trabajo, se centra en el estudio de la relación entre la/las Tropopausa/s y los Cirrus. Por lo tanto las nubes que se ubican a más de 7 Km, serán consideradas como Cirrus<sup>[3],[11]</sup>.

El objetivo del presente trabajo es estudiar la posible relación entre las MT en las latitudes medias y los Cirrus o nubes de hielo como se los conoce también, teniendo en cuenta observaciones in situ por teledetección (Sensado Remoto de la Atmósfera con Láser) realizados entre 2002 y 2003. Los niveles o alturas de la/las Tropopausa/s se calculan a partir de los perfiles de temperaturas obtenidos a través de los datos adquiridos de los Radiosondeos diarios (lanzados a las 00:00 hs y 12:00 hs UTC) realizados en la Argentina – Estación Ezeiza por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

Los sondeos atmosféricos por teledetección son realizadas con el LIDAR de retrodifusión ubicado en Villa Martelli en los suburbios de Buenos Aires. El LIDAR está compuesto por un Láser de Nd:YAG que actúa como fuente emisora de radiación Láser que puede entregar una energía de hasta 300 mJ por pulso en 532 nm con una frecuencia máxima de repetición de 10 Hz, un diámetro de 'spot' a la salida de 5 mm con una divergencia del haz inferior a los 0,6 mrad y un ancho de pulso de 5 ns (lo que nos va a enviar un pulso de 60 MW pico)<sup>[12],[13],[14]</sup>.

La definición de Tropopausa como capa de transición se basa en el cambio de pendiente del perfil

de temperatura de la atmósfera. Esta definición técnica, que se va a utilizar en el resto del trabajo refleja en realidad las alteraciones dinámicas mediante el análisis del perfil de temperatura como resultado de múltiples inversiones de temperatura en el UTLS que pueden conducir a pliegues en la Tropopausa y mezcla de aire proveniente de la estratosfera y hacia la troposfera<sup>[15],[16]</sup>. El análisis de los perfiles de temperatura de los Radiosondeos sobre Buenos Aires (Ezeiza - SMN) muestran que las Tropopausas múltiples ocurren al menos en un 50% de los casos, con una tercera Tropopausa presente, cercano al 6% de los casos que en el presente trabajo no serán consideradas (éstas Tropopausas adicionales serán despreciadas).

Cirrus con topes por encima de la primera Tropopausa tienen una ocurrencia superior al 30% de las observaciones, de las cuales un considerable 50% ocurren en una situación con múltiples Tropopausas. Estas nubes que se encuentran relacionadas e interactúan entre sí, ocupan una región limitada entre la primera y segunda Tropopausa con su tope y base en la zona denominada Inter-Tropopausa. En nuestro trabajo casi no se detectaron Cirrus para alturas por encima de la segunda Tropopausa.

En consecuencia, es muy probable que los Cirrus que cruzan o atraviesan una Tropopausa inferior, encontrarían una zona con temperatura inestable donde no pueden coexistir con el medio; por lo tanto esto lleva a que una gran parte de dichas nubes tengan que subir o difundirse verticalmente hasta alcanzar la Tropopausa siguiente. De esta manera los Cirrus actúan como marcadores o trazadores de las bases y los topes de las Tropopausas.

## II. OBSERVACIONES E INSTRUMENTAL

Para investigar la posible relación entre las Tropopausas Múltiples y los Cirrus, fue desarrollado 'in situ' un sistema de teledetección (LIDAR) para analizar las observaciones realizadas entre 2002 y 2003. Los niveles de la Tropopausa fueron recuperados de los perfiles de temperatura obtenidos a través de un conjunto de datos de Radiosondeos realizados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) a las 12 UTC (08:00 hora solar). El estudio simultáneo de nubes de hielo consistía en encontrar una fuente de datos adecuada para la detección y análisis de los Cirrus. Diversas técnicas se han desarrollado durante las últimas décadas, para detectar la incidencia de las nubes con sistemas pasivos de observación por teledetección con radiómetros especiales<sup>[17]</sup>, las observaciones satelitales y análisis a partir de datos de imágenes de nubes pasivas, tales como altura de las nubes superiores<sup>[18],[19]</sup> o las propiedades microfísicas<sup>[20]</sup>. Sin embargo, estas técnicas pueden incluir sesgos significativos debido a la naturaleza ubicua y semitransparente de esas nubes. Esto excluye el uso de datos por teledetección pasiva para estudiar las interacciones entre la estructura termodinámica cerca de la Troposfera Superior / Estratosfera Inferior (TS / EI) y las propiedades de los Cirrus.

El LIDAR de retrodifusión elástica utilizado para el presente trabajo se encuentra en Villa Martelli, en los suburbios de Buenos Aires y se basa en un Láser de Nd:YAG como emisor (Continuum - Surelite II), que emite hasta 300 mJ por pulso en 532 nm a 10 Hz con un ancho de pulso de 5 ns y con una divergencia del orden de los 0,6 mrad. Posee un receptor de dos telescopios que permite mejorar y controlar el rango dinámico de la señal. Uno de los telescopios es tipo Cassegrain de 8,2 cm de diámetro cubriendo el rango entre 50 m y los 6 km, mientras que el otro telescopio es newtoniano con un espejo de 50 cm de diámetro que abarca desde los 500 m hasta los 23 Km con mediciones diurnas y hasta los 28 Km con mediciones nocturnas. Los dos telescopios apuntan al cenit. Los telescopios se encuentran diafragmados con campo de visión inferior a 1,5 mrad. Esto permite evitar la posible inclusión, no deseada de los altocúmulos, es decir, de las nubes de agua, que limitarían la medición de los Cirrus donde la altura de la base de la nube es superior a los 6 Km.

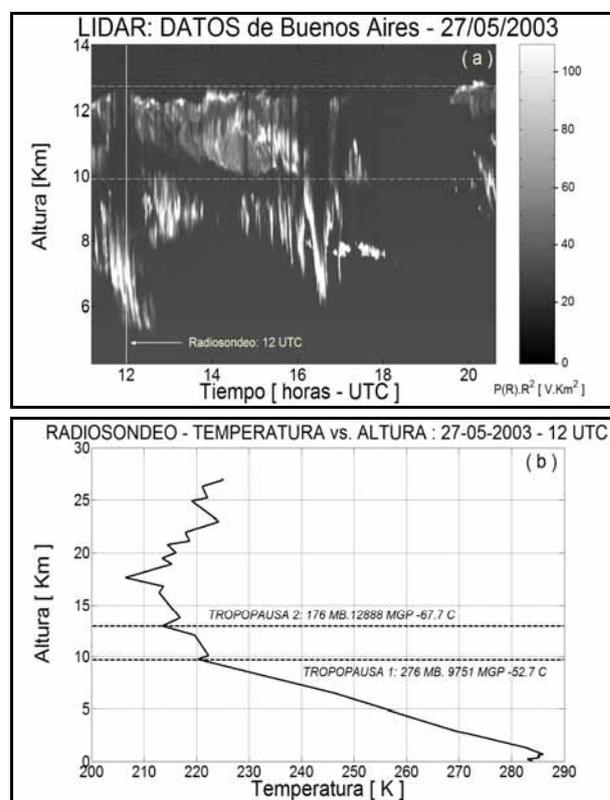


Figura 1. (a) – Evolución temporal de una señal LIDAR del 27 de mayo de 2003; (b) Perfil de temperatura dado por el radiosondeo del 27 de mayo de 2003.. Las dos Tropopausas presentes, están indicadas utilizando una línea continua.

Este es el criterio adoptado que coincide con la definición de los Cirrus propuesta por el Grupo de Coordinación Internacional de Estudios de la Atmósfera con Láser (ICLAS), donde quedan definidos los Cirrus a partir de mediciones LIDAR.

Los Cirrus son considerados como capas de cristales de hielo o partículas por encima de 6-7 Km situados en una masa de aire con una temperatura de  $-25^{\circ}\text{C}$  o menor. Otra de las características importantes de los Cirrus es que pueden mostrar una gran variabilidad espacial y temporal<sup>[21],[22]</sup>.

### III. RESULTADOS

En la Figura 1(a) se observa, un conjunto de datos procesados correspondientes a una Serie Temporal de la evolución de un Cirrus observada durante el 27 de Mayo del 2003. La primera y segunda Tropopausas están marcadas con líneas continuas, encontrándose entre los 9,9 y 12,8 km, respectivamente, y aparecen en coincidencia en el perfil de temperatura del Radiosondeo a las 12 UT (Figura 1-b). El análisis de 2000 perfiles de temperatura de los Radiosondeos de Buenos Aires en el período 2002-2003 muestra que las Múltiples Tropopausas ocurren cerca del 30% de los casos, con una tercera tropopausa en el 6% de los casos (no se muestra) y Tropopausas adicionales se consideran despreciables.

La Figura 2 muestra el ciclo anual de ocurrencias de las MT promediadas durante el período 2002-2003. El ciclo anual de ocurrencias de la MT comienza con altas ocurrencias cercano al 20 % en Enero, seguido por el primer mínimo en Marzo (13 %). El primer máximo se alcanza en Mayo con porcentajes cercanos al 29%, seguido de un segundo máximo en Agosto (23%).

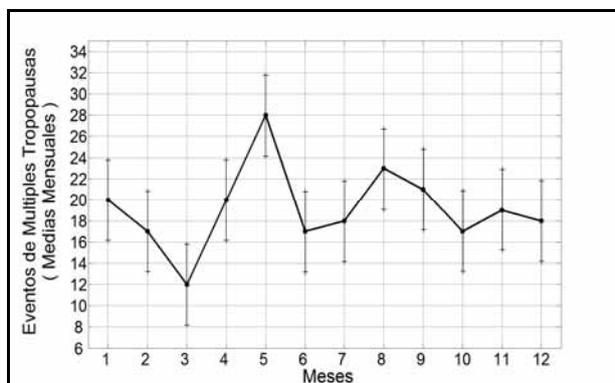


Figura 2. Frecuencia anual de presencia de múltiples tropopausas sobre Buenos Aires, valores promedio en el período 2002-2003.

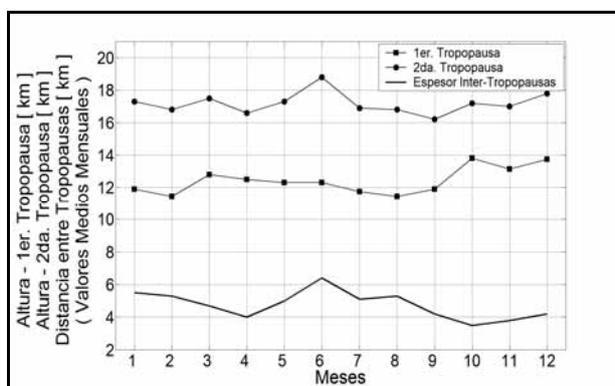


Figura 3. Evolución anual de los valores medios mensuales de las alturas de las tropopausas y del espesor de las Inter-Tropopausas durante el período 2002-2003.

Durante los períodos de Abril-Junio y Agosto-Septiembre, se detectan altos niveles de ocurrencias de MT en coincidencia con las ocurrencias más altas de los frentes o corrientes de chorros y también con las transiciones entre verano e invierno con patrones de circulación sobre el centro de Argentina. La Figura 3 muestra el ciclo anual de la altura de la Tropopausa y el espesor medio de la Inter-Tropopausa (IT). Se consideró sólo la primera y segunda Tropopausa del paquete de datos.

El ciclo anual de la IT muestra un mínimo en Octubre (3,2 km) y dos máximos entre Abril y Agosto. Estos máximos pueden ser correlacionados con el incremento en la frecuencia de las MT en el mismo período (Figura 2), debe observarse que la mayor cantidad de ocurrencias suceden entre marzo y octubre (mínimos observados), pero con su primer máximo centrado en Junio en vez de Mayo. El promedio del espesor de la IT se extiende de 3,2 km a 6,4 km.

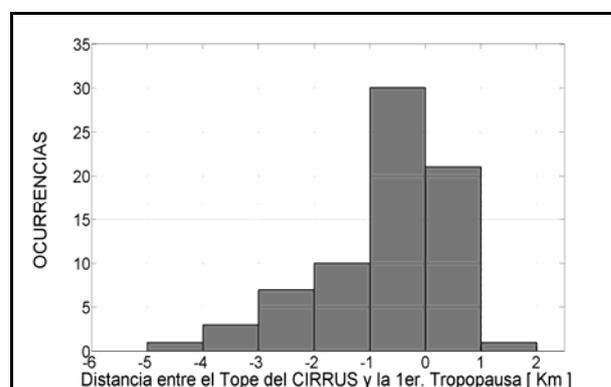


Figura 4. Distribución de las distancias entre la primera tropopausa y el tope del cirrus que atraviesa la tropopausa.

La distribución de distancias entre la altura del tope del cirrus y la altura correspondiente a la tropopausa inferior, se muestra en la figura 4 para todos los cirrus con alturas por encima de los 7 km. Los valores (positivos/negativos) indican la altura del tope del cirrus que se encuentra, en primer lugar, por encima o por debajo de la tropopausa. Claramente, las alturas más allá del cirrus se encuentran a continuación, pero muy cerca de la primera tropopausa, es decir, que es muy probable que los cirrus se encuentren pegados justo por debajo de la tropopausa y por lo tanto, estos cirrus de tropopausa pueden ser considerados como trazadores de la misma como fue reportado internacionalmente por los autores del presente trabajo<sup>[11]</sup>.

Las nubes con topes por encima de la primera Tropopausa tienen una ocurrencia del 25% de las observaciones (Figura 4), de las cuales al menos el 90% ocurren en los eventos de MT; por lo que para estos casos, una posible relación entre el tope y la segunda Tropopausa merece ser analizada.

Para evaluar esta correlación y cuánto de esta región está llena de Cirrus (Figura 5), utilizamos la relación de distancias entre el tope de la nube y la primera Tropopausa y la distancia entre la primera y segunda

Tropopausa (el criterio adoptado está basado en el trabajo de Noël & Haefflin – 2007) [23].

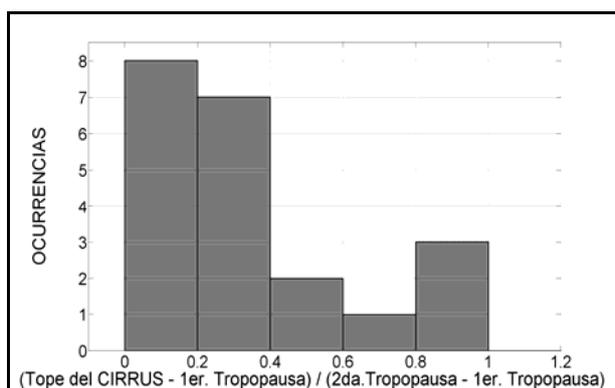


Figura 5. Distribución que relaciona las distancias entre el tope del cirrus y la distancia de la primera tropopausa respecto a las distancias entre la primera y segunda tropopausa.

La Figura 6 muestra la distribución de la altura de la base del cirrus cuyos topes se extienden por encima de la primera tropopausa. Como se muestra en el gráfico, la distribución parece sesgada negativamente y los cirrus que tienen estas características, tienen la altura de su base, más frecuentemente, entre 1 y 4 km por debajo de la primera tropopausa, con un máximo centrado en alrededor de los 2,5 km por debajo de la tropopausa inferior.

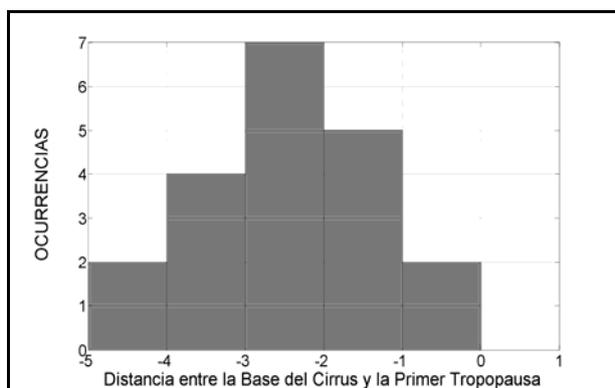


Figura 6. Distribución de la Distancia entre la base del Cirrus y la Primer Tropopausa.

Al considerar las figuras 4, 5 y 6, resulta importante señalar que todos los cirrus analizados se encuentran cerca de la primera tropopausa y debajo de la segunda tropopausa, es decir que los cirrus cruzan la zona Inter-Tropopausa, con la característica de que no hay nubes contenidas en dicha región. Durante todo el tiempo que dura el proceso de adquisición de datos (< 9 horas), las nubes se mantienen dentro de los límites definidos por las tropopausas (primera y segunda), por lo que la segunda tropopausa parece actuar a modo de techo para las nubes superiores.

Por último, se estudia el espesor geométrico para los cirrus cuyos topes se encuentran por encima de la primera tropopausa. La distribución de los espesores geométricos de los cirrus se presenta en la figura 7.

Los valores de la medición de los espesores geométricos, conforman una distribución sesgada

positivamente. Se pudo determinar que los cirrus se extienden sobre un rango de 1 a 5 km, con mayor incidencia (65%) confinada a un estrecho rango de 1 a 3 km. Sin embargo estos valores no son diferentes de los derivados de los cirrus troposféricos.

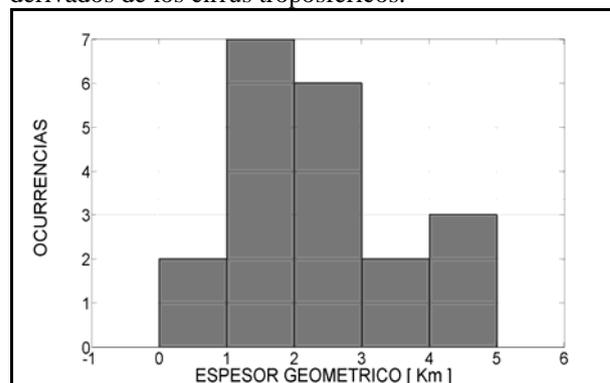


Figura 7. Distribución del Espesor Geométrico de las observaciones correspondientes al periodo 2002-2003 para los cirrus ubicados entre las dos tropopausas.

La figura 8 muestra una distribución de los espesores geométricos de todo el conjunto de datos bajo análisis. Por lo tanto, no es posible poner de relieve las propiedades específicas de los cirrus que cruzan la tropopausa en comparación con el resto de la población de cirrus y establecer una relación entre los espesores y eventos de múltiples tropopausas ya que no podrían justificarse. Sin embargo, los valores de los espesores geométricos confirman que los cirrus que atraviesan la troposfera son los denominados cirrus densos o gruesos, terminología estándar que se utiliza con las mediciones del LIDAR; conclusión que sigue vigente para el conjunto de datos extendidos de los cirrus [11].

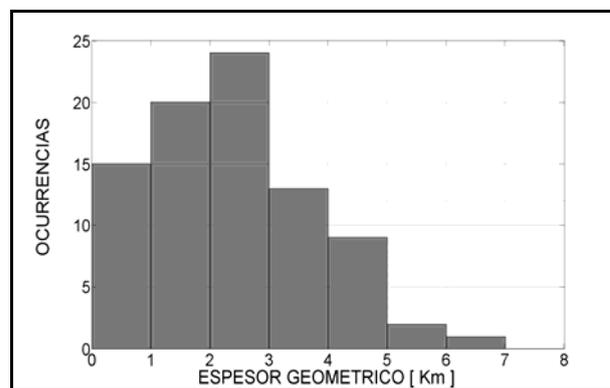


Figura 8. Distribución del Espesor Geométrico de los Cirrus, correspondientes a todas las observaciones adquiridas y procesadas durante el período 2002-2003.

## Conclusiones

Este estudio que relaciona el tope y la base del Cirrus respecto a la altura de la Tropopausa, revela que la mayoría de los Cirrus se encuentran contenidos por debajo de la primera Tropopausa; pero, una parte representativa de ellos cruza la zona de Inter-Tropopausas. No se detectaron Cirrus que estuvieran totalmente contenidos entre la primera y segunda Tropopausa. La frecuencia de ocurrencia de los Cirrus se incrementa con la disminución de la distancia entre el

tope del Cirrus y la primera Tropopausa, como se muestra en la Figura 4. Con la misma tendencia, las nubes son más frecuentes cuando la base del Cirrus se encuentra también más cerca de la Tropopausa, sin embargo, la incidencia máxima se encontró entre los 2 y 3 km por debajo de la Tropopausa.

### Agradecimientos.

Los autores agradecen al ‘Centro de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa’ (CITEDEFF) por el apoyo para el mantenimiento de la Estación LIDAR; a la ‘Pontificia Universidad Católica Argentina, Facultad de Ciencias Agrarias’, por la Beca doctoral otorgada en el marco del Programa de Incentivo para la Investigación, al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET) PIP 2004 – 5276 y a la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Haedo por el apoyo dado.

### Referencias.

- 1 - Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2001), *The Scientific Basis*, edited by: J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. A. Johnson, 881 pp., Cambridge Univ. Press, New York.
- 2 - Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Alley, R. B., Bertsen, T., Bindoff, N. L., Chen, Z., Chidthaisong, A., Gregory, J. M., Hegerl, G. C., Heimann, M., Hewitson, B., Hoskins, B. J., Joos, F., Jouzel, J., Kattsov, V., Lohmann, U., Matsuno, T., Molina, M., Nicholls, N., Overpeck, J., Raga, G., Ramaswamy, V., Ren, J., Rusticucci, M., Somerville, R., Stocker, T. F., Whetton, P., Wood, R. A., and Wratt, D.: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change - Technical Summary, in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, edited by S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. Averyt, M. Tignor, and H. L. Miller, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. 2560.
- 3 - WMO (1957), Definition of the tropopause, *WMO Bull.*, 6, 136.
- 4 - Sunilkumar, S. V., and K. Parameswaran (2005), Temperature dependence of tropical cirrus properties and radiative effects, *J. Geophys. Res.*, 110, D13205, doi:10.1029/2004JD005426.
- 5 - Cantrell, W., and A. Heymsfield (2005), Production of ice in tropospheric clouds: A review, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 62(7), 2352–2372.
- 6 - Heymsfield, A. J., and L. M. Miloshevich (2003), Parameterizations for the cross-sectional area and extinction of cirrus and stratiform ice cloud particles, *J. Atmos. Sci.*, 60, 936–956.
- 7 - Holton, J. R., P. H. Haynes, M. E. McIntyre, A. R. Douglass, R. B. Rood and L. Pfister, 1995: Stratosphere-troposphere exchange. *Reviews of Geophysics*, 33, 403–439.
- 8 - Shepherd T. G.: Issues in Stratospheric-tropospheric coupling, *J. of the Meteorol. Society of Japan*, 80, 769–792, 2002.
- 9 - Stohl et al.: Stratosphere-troposphere exchange: A review, and what we have learned from STACCATO, *J. Geophys. Res.*, 108(D12), 8516, doi:10.1029/2002JD002490, 2003.
- 10 - Seidel, D.J and Randel, J. W.: Variability and trends in the global tropopause estimated from radiosonde data, *J. Geophys. Res.*, 111, D21101, doi:10.1029/2006JD007363, 2006.
- 11 - Lakkis S.G.; Lavorato M.B.; Canziani P.O. (2009), Monitoring cirrus clouds with LIDAR in the Southern Hemisphere: a local study over Buenos Aires. 1. Tropopause heights. *Atmos. Res.*, doi:10.1016/j.atmosres.2008.08.003
- 12 - M. Lavorato, P. Cesarano, E. Quel and P. Flamant, “A dual receiver-backscatter lidar operated in Buenos Aires (34.6 S / 58.5 W) to ”. *Proceeding: 21th ILRC (International Radar Laser Conference)*, pp75-78, Quebec – Canada, (2002).
- 13 - M. Lavorato, M. Pagura, P. Cesarano y P. Flamant, “Monitoreo de la troposfera mediante un lidar de retrodifusión en Buenos Aires: recopilación anual de las series de datos adquiridos”, *Anales Asociación Física Argentina*, ISSN: 0327-358 X, vol 16, p.275-278, (2004).
- 14 - M. Lavorato, P. Flamant, J. Porteneuve, M. Pagura, P. Cesarano y P. Canziani, “Monitoring of the troposphere by backscatter lidar in Buenos Aires (34.6 S / 58.5 W): Overview of the multi year data set and implementation of new IR channels and depolarization capability”. *Proceeding: 22th ILRC (International Radar Laser Conference)*, pp156-159, Matera – Italy, (2004).
- 15 - McFarquhar, G. M., Heymsfield A. J., Spinhirne J., Hart B., (2000), Thin and subvisual tropopause tropical cirrus: Observations and radiative impacts, *J. Atmos. Sci.*, 57, 1841 – 1853.
- 16 - Garrett, T. J., et al. (2005), Evolution of a Florida cirrus anvil, *J. Atmos. Sci.*, 62, 2352–2372.
- 17 - Rossow, W. B., and L. C. Garder (1993), Cloud detection using satellite measurements of infrared and visible radiances for ISCCP, *J. Clim.*, 6, 2341– 2369.
- 18 - Naud, N., M. Haeffelin, P. Muller, Y. Morille, and A. Delaval (2004), Assessment of MISR and MODIS cloud top heights through comparison with a back-scattering lidar at SIRTa, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L04114, doi:10.1029/2003GL018976.
- 19 - Daloze, J.-F., and M. Haeffelin (2005), Validation of SAFNWC/MSG cloud top height using ground-based lidar and radar measurements, in *Visiting Scientist Report, CMS Lannion*.
- 20 - Chiriaco, M., H. Chepfer, V. Noël, A. Delaval, M. Haeffelin, P. Dubuisson, and P. Yang (2004), Improving retrievals of cirrus cloud particle size coupling lidar and three-channel radiometric techniques, *Mon. Weather Rev.*, 132, 1684– 1700.
- 21 - Sassen, K. (1991), The polarization lidar technique for cloud research: A review and current assessment, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 72, 1848– 1866.
- 22 - Wang, Z., and K. Sassen (2001), Cloud type and macrophysical property retrieval using multiple remote sensors, *J. Appl. Meteorol.*, 40, 1665– 1682.
- 23 - Noël, V., and M. Haeffelin (2007), Midlatitude cirrus clouds and multiple tropopauses from a 2002–2006 climatology over the SIRTa observatory, *J. Geophys. Res.*, 112, D13206, doi:10.1029/2006JD007753.