

Respuesta de la atmósfera media y alta a la precipitación de partículas energéticas durante tormentas geomagnéticas

Elda M. Zotto¹, Marta M. Zossi de Artigas^{2,3}, Patricia M. Fernández de Campra⁴ & Gustavo A. Mansilla^{2,3}

(1) *Departamento de Formación Básica, Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas, Universidad Nacional de Catamarca*
emzotto@tecno.unca.edu.ar

(2) *Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán*
mzossi@herrera.unt.edu.ar; gmansilla@herrera.unt.edu.ar

(3) *CONICET*

(4) *Departamento de Ciencias de la Computación, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán*
pfernandez@herrera.unt.edu.ar

RESUMEN: En este trabajo se estudian los efectos, sobre la atmósfera alta y media del hemisferio sur, de la precipitación de partículas con altas energías, durante el desarrollo de cuatro tormentas geomagnéticas ocurridas durante el ciclo solar 23. Las perturbaciones se encuentran asociadas a fulguraciones solares, a eyecciones de masa coronal y a eventos protónicos solares, y durante las mismas la inyección de electrones con energías mayores a los 300 keV se ve incrementada, lo que permitiría a los electrones alcanzar la atmósfera media y modificar la química de la misma. Por otro lado, los efectos en la ionosfera se buscan analizando la variación de la frecuencia crítica de la capa F2, foF2, en una estación ionosférica ubicada en el sector suramericano durante la ocurrencia de las perturbaciones elegidas. Las variaciones son significativas, presentando tanto aumento en el máximo diario como disminución en el mínimo. El comportamiento observado en el contenido total de ozono (CTO) en Marambio, muy cercana a la estación ionosférica indicada, presenta variaciones significativas sólo para dos de las tormentas estudiadas, hecho que podría estar vinculado con la intensidad de las perturbaciones geomagnéticas

1 INTRODUCCIÓN

Los eventos protónicos solares (solar proton events, SPEs) son una consecuencia de las eyecciones de masa coronal (coronal mass ejections, CME), durante los cuales se emiten, muchas veces hacia la Tierra, una gran cantidad de protones e iones pesados. Los máximos de intensidad de los SPEs, durante el ciclo solar 23, tuvieron lugar en los años 1998, 2000, 2001 y 2003 (Zotto y otros, 2008). Los protones solares entran a la magnetosfera de la Tierra y guiados por el campo geomagnético, precipitan dentro de los casquetes polares (Sepällä et al., 2004). Como los protones pueden tener energías muy altas, hasta cientos de MeVs, depositan su energía en la mesosfera y en la estratosfera, proveyendo así una

conexión directa entre el Sol y la atmósfera alta y media.

La precipitación de partículas energéticas (energetic particle precipitation, EPP) causaría, vía cascada de procesos de disociación, ionización y recombinación, un incremento de NO_x (NO + NO₂), en la termosfera y en la mesosfera. Durante la noche polar en la termosfera y mesosfera los tiempos de vida son lo suficientemente largos para permitir al NO_x descender a la estratosfera donde puede participar en procesos catalíticos controlando el ozono, O₃ (Thorne, 1980; Rusch et al., 1981).

El aspecto químico del acoplamiento magnetosfera-atmósfera ha sido estudiado usando datos observados y modelos numéricos de gran escala (Crutzen et al., 1975; Rusch et al., 1981; Solomon et al., 1982; Callis et al., 1991, 1998, 2002). En la última década, se observó a partir de

mediciones de satélites y predicho por modelos atmosféricos, una disminución significativa en el porcentaje de ozono posiblemente asociado a cambios en el orden de magnitud de la concentración del NO_x durante grandes SPEs (Seppälä et al., 2004; Lopez-Puertas et al., 2005; Sepälä et al., 2006; Turunen et al., 2009).

Randall et al. (2007) indicaron que los cambios en el ozono estratosférico, producidos por un efecto indirecto de la precipitación de partículas energéticas, serían de igual magnitud a las variaciones causadas por las variaciones del flujo solar UV.

Por otro lado, Kazimirovsky et al. (1999) estudiaron la respuesta significativa sobre el contenido total de ozono (CTO) durante una perturbación geomagnética y su dependencia con la longitud geográfica y el nivel de actividad solar.

El efecto de las tormentas geomagnéticas en el ozono total, en latitudes medias altas en el hemisferio norte, fueron mostradas en una serie de artículos por Laštovička (1996); Laštovička and Križan (2005); Laštovička and Križan (2009), entre otros. Los resultados son: efectos estadísticamente significativos, se producen en el ozono total en latitudes medias altas del hemisferio norte, dependiente de la longitud, solo para tormentas magnéticas muy intensas ($A_p > 60$), en invierno y bajo condiciones de alta actividad solar.

Resultados anteriores indican que, como consecuencia de tormentas geomagnéticas intensas ocurridas durante otoño y primavera del ciclo solar 23, la precipitación de partículas energéticas produciría cambios en la circulación de la atmósfera media, lo que generaría una redistribución del CTO (Zossi de Artigas y otros, 2007; 2009; Zotto y otros, 2008). Por otro lado, las variaciones observadas no muestran un patrón fijo como indican Laštovička and Križan (2009) (Zotto y otros, 2011).

El ingreso de intensa energía desde la magnetosfera a la alta atmósfera, durante una tormenta geomagnética, puede producir brillantes auroras que se extienden hacia latitudes medias, y también afectar los sistemas tecnológicos (Tsurutani et al, 1997). Por otro lado, Mansilla & Zossi (2013) estudiaron la respuesta ionosférica global durante la ocurrencia de una tormenta geomagnética, encontrando variaciones significativas en la frecuencia crítica de la capa F2, foF2. Por consiguiente, es de suma importancia entender la respuesta ionosférica al ingreso de las partículas portadoras de alta energía.

El efecto sobre la atmósfera alta y media del hemisferio sur, de la precipitación de partículas

con altas energías, durante el desarrollo de cuatro tormentas geomagnéticas (TGs) ocurridas durante el ciclo solar 23, se estudia en este trabajo.

2 ANÁLISIS DE DATOS

Las tormentas geomagnéticas (TGs) consideradas en este trabajo se identificaron a partir de los valores horarios del índice geomagnético Dst en nT (Final Dst index, Geomagnetic Equatorial Dst index Home Page, Geomagnetic Data Service, World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/index.html, 05/07/2013).

Se seleccionaron un total de cuatro períodos de ocurrencia de TGs. En la Tabla 1, se listan los períodos estudiados, la fecha de máximo desarrollo de la TG y el valor mínimo de Dst para cada una.

Tabla 1. Tormentas geomagnéticas (TGs) seleccionadas para este trabajo.

TGs	Período	Máximo decrecimiento	Dst mín. (nT)
1	29/03-04/04/2001	31/03/2001. 08 TU	-387
2	18/11-25/11/2003	20/11/2003. 21-22TU	-422
3	11/05-19/05/2005	15/05/2005. 09TU	-247
4	21/08-30/08/2005	24/08/2005. 12TU	-184

La TG 1 ocurrió durante el máximo de actividad del ciclo solar 23; mientras que las TGs 2, 3 y 4, lo hicieron durante la fase de declinación del mismo ciclo solar. En la Figura 1 se indica el promedio mensual del número de manchas solares desde octubre de 1996 a diciembre de 2012, indicándose en la misma la localización, dentro del ciclo solar, de las cuatro perturbaciones geomagnéticas estudiadas en este trabajo.

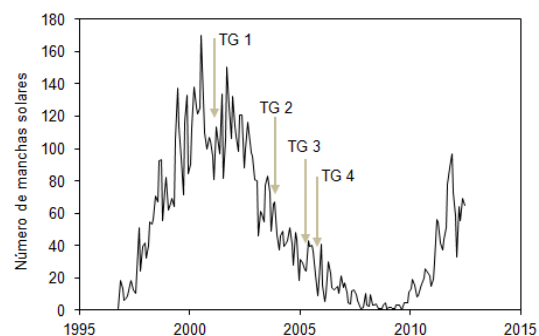


Figura 1. Promedio mensual de número de manchas solares para ciclo solar 23 y 24 (octubre 1996 a diciembre 2012). Se indican las tormentas geomagnéticas estudiadas en este trabajo.

Por otro lado, las TGs elegidas para el estudio, se encuentran asociadas a fulguraciones solares, a eyecciones de masa coronal y a eventos protónicos solares. Las características del flujo de partículas cargadas que precipitan en el medio ambiente espacial cercano a la Tierra es medido por el instrumento SSJ/4 a bordo de satélites del Defense Meteorological Satellite Program (DMSP). En la Tabla 2 se especifican algunas de estas características obtenidas desde el sitio web Solar Proton Events Affecting the Earth Environment, Space Weather Alerts, Space Weather Prediction Center (SWPC), National Oceanic and Atmospheric Administration, (NOAA), United States Department of Commerce, <http://www.swpc.noaa.gov/ftpdir/indices/SPE.txt>, (05/07/2013).

Tabla 2. Características de las fulguraciones y de las eyecciones de masa coronal (CME) ocurridas durante las TGs estudiadas

TGs	Max. Fulguración (Día / TU)	CME asociado	Región activa #
1	29 MAR 2001/10:15	Halo /29 1026	9393
2	20 NOV 2003/ 23:53	SW/21 0026	501
3	13 MAY 2005/16:57	Halo/13 1722	759
4	22 AGO 2005/ 17:27	Halo/22 1730	798

La actividad en la zona auroral durante el desarrollo de las TGs estudiadas, es registrada por el índice geomagnético auroral, AE. Los valores horarios de este índice se obtuvieron de: Plot and data output of ASY/SYM and AE indices, Geomagnetic Auroral Electrojet (AE) index Home Page, World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/index.html>, (05/07/2013).

Con el fin de conocer la intensidad de las partículas que penetran en la atmósfera, se usan datos de electrones con energías mayores a 300 keV en unidades de partículas/cm²/s/ster (mep90e3), monitoreados por el Medium Energy Proton and Electron Detector (MEPED), ubicado en el Space Environment Monitor (SEM) mejorado, el SEM-2, a bordo del satélite ambiental de órbita polar, POES NOAA-15, del Centro Nacional de Datos Geofísicos (NGDC) perteneciente a la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de E.E.U.U., obtenidos de la página web <http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/poes/data/avg/txt/> (05/07/2013).

The Space Physics Interactive Data Resource (SPIDR), también del Centro Nacional de Datos Geofísicos (NGDC - NOAA), U. S. Department of Commerce, provee a través de la World Wide Web el valor horario de la frecuencia crítica en

MHz de la capa F2, foF2, para diferentes estaciones ionosféricas

[http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/query.do?group=Iono&, 06/07/2013](http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/query.do?group=Iono&_date=06/07/2013)). Como referencia, se consideraron los valores horarios de foF2 para los días tranquilos de los meses en que tuvieron lugar las TGs estudiadas. Los días tranquilos se identificaron a partir de los datos provistos por el Geomagnetic Data Service, World Data Center for Geomagnetism, Kyoto en The international 5 and 10 quietest and 5 most disturbed days (desde 1932 a la fecha),

<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/qddays/>, 06/07/2013.

Para el análisis de los efectos de la inyección de partículas en la atmósfera media se usó como índice la desviación relativa diaria del CTO respecto de su comportamiento en días tranquilos: CTOR. Donde,

$$CTOR = \frac{CTO - CTOQ}{CTOQ}$$

CTOQ es el promedio diario del CTO en días tranquilos del mes de la TG.

El promedio diario del CTO, en unidades Dobson (DU), se obtuvieron de las estaciones incluidas en la red TOMSEPOVP (Total Ozone mapping spectrometer) / Earth Probe Ground Station Overpass) del Centro de Servicios Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) ubicadas en latitudes medias-altas del hemisferio sur (Mirador Data Access Made Simple, Goddard Space Flight Center, <http://mirador.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/mirador/collectionlist.pl?keyword=TOMSEP OVP>, (07/06/2013).

Se eligieron para el estudio las estaciones: Port Stanley (Latitud y Longitud Geográficas: -51,75 N; -59,00 E; Latitud y Longitud Geomagnéticas: -41,80 N; 10,99 E) para el análisis ionosférico; y Marambio (Latitud y Longitud Geográficas: -64,23 N, -56,72 E; Latitud y Longitud Geomagnéticas: -54,23 N, 11,15 E) para el CTO. Ambas estaciones están ubicadas en la región sudamericana y son cercanas entre sí.

En la Figura 2 se representan para la TG1, los valores horarios de los índices geomagnéticos Dst y AE en unidades de nT (a); el promedio horario del flujo de electrones con energías mayores a 300keV, en part/cm²/s/ster y el índice Dst en nT (b); el valor horario de la frecuencia crítica de la capa F2, foF2 en MHz, medida en Port Stanley, junto al promedio horario correspondiente a los días tranquilos del mes de TG1 (c); y en (d) se representa para Marambio CTOR. Las gráficas correspondientes a las TG2, TG3 y TG4 se representan en las figuras 3, 4 y 5, respectivamente.

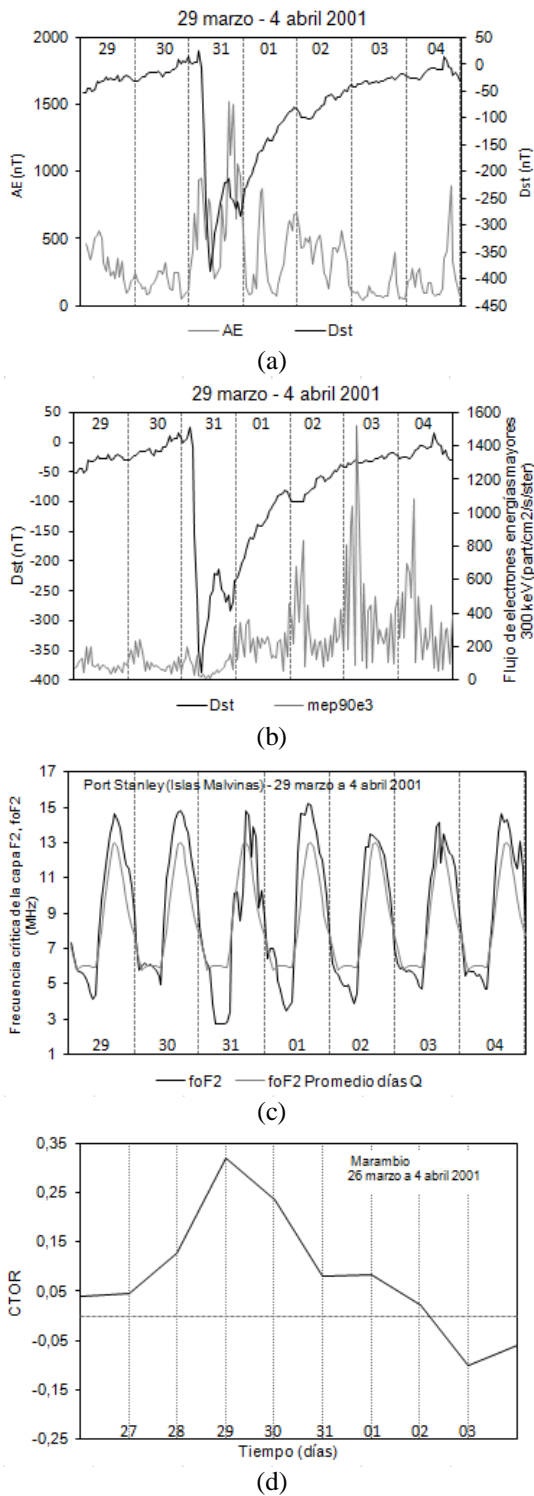


Figura 2. Representación para la TG1 de: a) valores horarios de los índices geomagnéticos Dst y AE en unidades de nT; b) valores horarios del índice Dst, en nT y flujo de electrones con energías mayores a 300 keV en part/cm²/s/ster; c) valores horarios de la frecuencia crítica de la capa F2, foF2, en MHz, medida en Port Stanley; y d) CTOR diario en Marambio para el período 26 de marzo al 4 de abril de 2001.

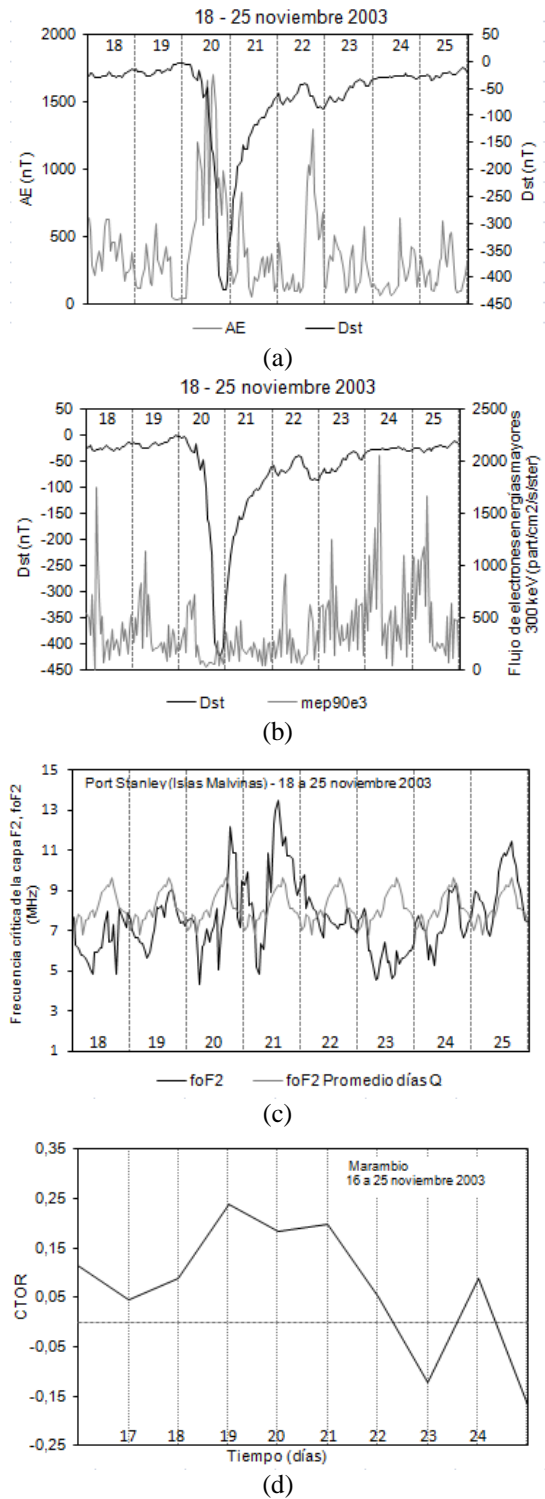
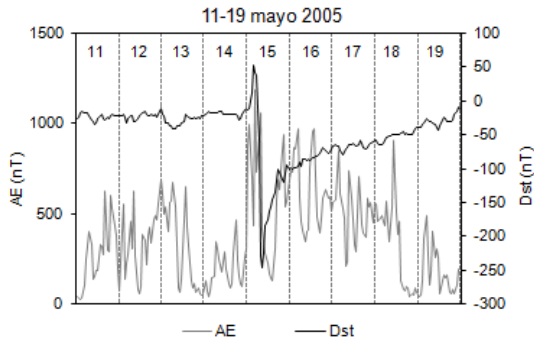
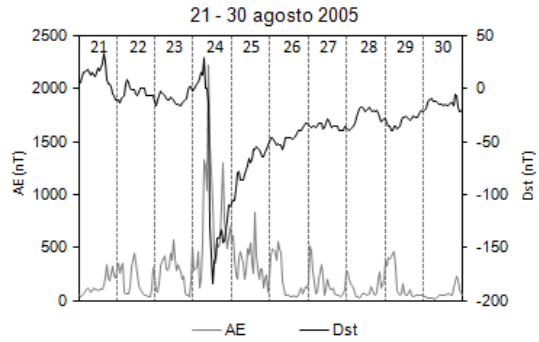


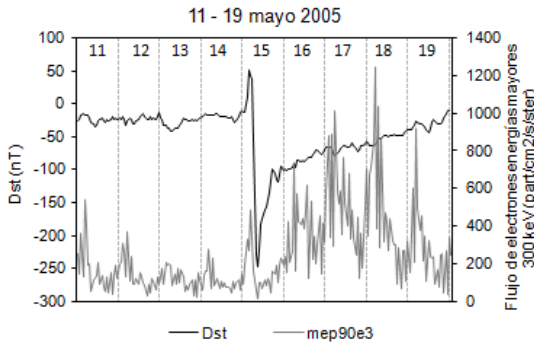
Figura 3. Ídem Figura 2 para la TG2 y en (d) el período es 16 a 25 de noviembre de 2003.



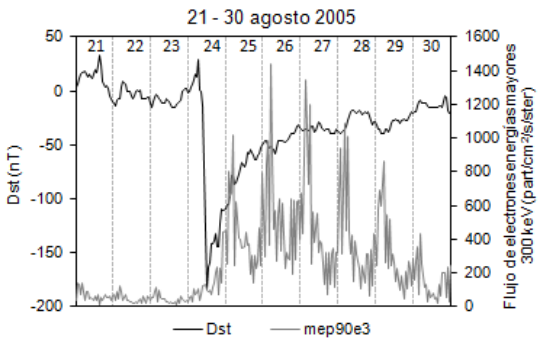
(a)



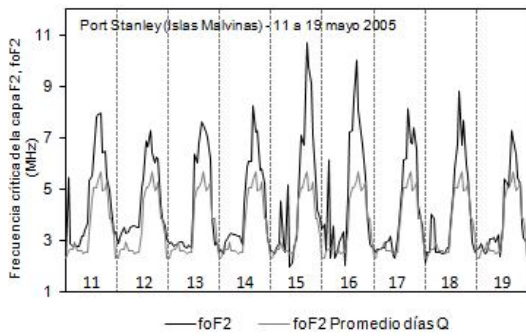
(a)



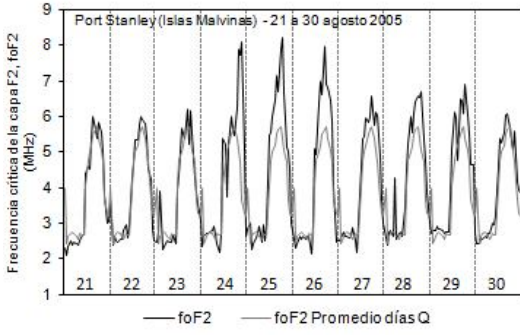
(b)



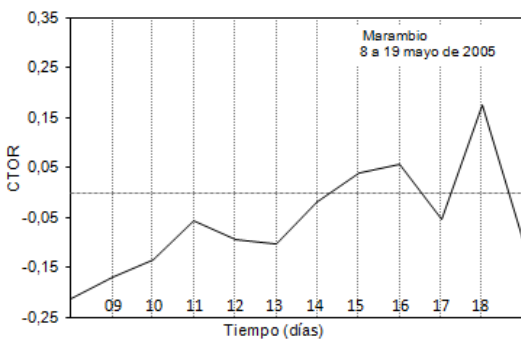
(b)



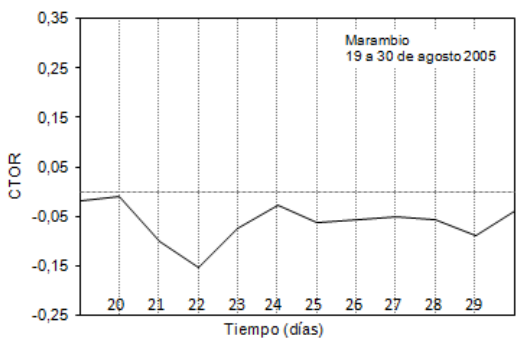
(c)



(c)



(d)



(d)

Figura 4. Ídem Figura 2 para la TG3 y en (d) el período es 8 a 19 de mayo de 2005.

Figura 5. Ídem Figura 2 para la TG4 y en (d) el período es 19 a 30 de agosto de 2005.

3 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En las gráficas de las figuras 2a, 3a, 4a y 5a se observa que la actividad auroral es muy intensa, acompañando el desarrollo de las TGs. El índice AE alcanza valores muy altos en la fase principal y el inicio de la fase de recuperación de las cuatro TGs analizadas. Por otro lado, durante las perturbaciones geomagnéticas estudiadas, se produce un incremento en el registro de electrones de alta energía (mayores a 300 keV), figuras 2b, 3b, 4b y 5b, valores de energía que permitiría a los electrones alcanzar la atmósfera media (mesosfera y estratosfera) y modificar la química de las mismas (Hargreaves, 1979).

El comportamiento de la frecuencia crítica de la capa F2, foF2, durante el desarrollo de las distintas tormentas estudiadas, presenta variaciones en relación al comportamiento durante días tranquilos. El efecto en la ionosfera es conocido como tormenta ionosférica, fenómeno que continua siendo estudiado desde su descubrimiento, en los años '30 del siglo pasado (Hargreaves, 1979). En las figuras 2c, 3c, 4c y 5c se observa un aumento significativo en el máximo diario (efecto de fase positiva) durante la fase de recuperación de las cuatro tormentas y una disminución significativa en el mínimo diario (efecto de fase negativa) en las TG1 y TG2 también en su recuperación. En las TG1 y TG3 se observan incrementos en los máximos diarios previos al desarrollo de las tormentas, hecho observado por otros autores, y cuyo origen está aún en discusión. Estos efectos pueden ser causados por la circulación durante el tiempo de tormenta, que transporta los cambios en la composición de neutros. Las perturbaciones positivas observadas durante la fase de recuperación pueden atribuirse a aumentos en la densidad de O relativos a N₂ a O₂ en la parte superior de la ionosfera, llevado hacia el ecuador por la circulación meridional (Mansilla & Zossi, 2013).

De las cuatro TG estudiadas en este trabajo, TG1 y TG2 tienen valores mínimos del índice Dst < -350 nT, mientras que el mínimo del índice Dst es mayor a -250 nT en las dos restantes. Esto se evidencia en lo observado en el comportamiento del CTO durante los períodos estudiados, ya que las variaciones son significativas sólo en los casos de TG1 y TG2 (Figuras 2d y 3d).

En estudios anteriores en estaciones de latitudes medias-altas de América del Sur se observaron acentuadas disminuciones (hasta un 20 %) en el CTO varios días posteriores al día de ocurrencia de la tormenta geomagnética y a la inyección de partículas. Esto podría estar relacionado con el incremento en la deposición de partículas en la

región auroral nocturna vinculada con la perturbación geomagnética producida (Zotto y otros, 2011), esto se observa en TG1 y TG2 en este trabajo, donde las variaciones en el CTO son significativas al 2σ .

4 CONCLUSIONES

Durante los cuatro períodos estudiados en este trabajo, el índice geomagnético Ap supera los 200 nT, valor que excede ampliamente los 60 nT, indicados por Laštovička and Križan (2009), como una condición para obtener un efecto estadísticamente significativo de tormentas geomagnéticas en el ozono total, en latitudes medias altas del hemisferio norte. Por otro lado, sólo la TG1 tiene lugar durante el máximo solar, ya que las otras tres TGs estudiadas ocurren en la fase de declinación del ciclo solar 23. Además, tanto la TG1 como la TG2 ocurren en otoño y primavera en el hemisferio sur; mientras las 2 restantes suceden en otoño e invierno en el mismo hemisferio.

El comportamiento observado en el contenido total de ozono (CTO) presenta variaciones significativas sólo para las TG1 y TG2 en latitudes medias - altas de América del Sur, hecho que podría estar vinculado con la intensidad de las perturbaciones geomagnéticas, ya que la inyección de partículas con alta energía alcanza valores muy altos durante los cuatro períodos estudiados.

Por otro lado, los efectos en la ionosfera mostrados en la frecuencia crítica de la capa F2, foF2, indica que, durante las cuatro TGs, las variaciones son significativas en la estación ionosférica analizada.

Es de interés incrementar la estadística de los efectos producidos por perturbaciones geomagnéticas e inyecciones de partículas con alta energía, en otros sectores de latitud media-alta del hemisferio sur, y considerando para el análisis, además del CTO, otros trazadores y componentes químicos de la atmósfera media. Esto permitirá ampliar el conocimiento de la atmósfera del hemisferio sur en condiciones magnéticamente perturbadas.

5 REFERENCIAS

- Callis, L.; D. Baker, J. Blake, J. Lambeth, R. Boughner, M. Natarajan, W. Klebesadel & P. Gorney, Precipitating relativistic electrons: Their long-term effect on stratospheric odd nitrogen levels, *Journal of Geophysical Research*, 96, 2939, 1991.
- Callis, L. & J. Lambeth, NO_y formed by precipitating electron events in 1991 and 1992:

- Descent into the stratosphere as observed by ISAMS, *Geophysical Research Letters*, 25 (11), 1875-1878, 1998.
- Callis, L.; M. Natarajan & J. Lambeth, Observed and calculated mesospheric NO, 1992-1997, *Geophysical Research Letters*, 29, 2, 10,1029/2001GL013995, 2002.
- Crutzen, P. J.; I. S. A. Isaksen, & G. C. Reid, Solar proton events: Stratospheric sources of nitric oxide, *Science*, 189, 457-458, 1975.
- Hargreaves, J. K. The upper Atmosphere and Solar-Terrestrial Relations, An Introduction and the aerospace environment, *Van Nostrand Reinhold Company*, 1979.
- Kazimirovsky, E. S.; A. Yu Belinskaya, G. K. Matafonov, G. A. Zherebtsov & A. M. Pirog, The possible response of the total ozone content on the solar and geomagnetic activity, *Adv. Space Res.*, 24, 661-664, 1999
- Laštovička, J., Effects of geomagnetic storms in the lower ionosphere, middle atmosphere and troposphere, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 58, 831, 1996.
- Laštovička J. & P. Križan, Geomagnetic Storms, Forbush decreases of cosmic rays and total ozone at northern higher middle latitudes, *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, 67, 119-124, 2005.
- Laštovička J. & P. Križan, Impact of strong geomagnetic storms on total ozone at southern higher middle latitudes, *Studia et Geophysica Geodætica*, 53, 151-156, 2009.
- Lopez-Puertas, M., B. Funke, S. Gil-Lopez, T. von Clarmann, G.P., Stiller, M. Hopfner, S. Kellmann, H. Fischer & C. H. Jackmann, Observation of NO_x enhancement and ozone depletion in the Northern and Southern Hemispheres after the October-November 2003 solar proton events, *J. Geophys. Res.*, 10 (A9): Art. No. A09S43, 2005.
- Mansilla, G. A. & Zossi de Artigas, M., Ionospheric response to the 3 August 2010 geomagnetic storm at mid and mid- high latitudes, *Advances In Space Research*, 51, 50-60, 2013.
- Randall, C. E.; V. L. Harvey, C. S. Singleton, S. M. Bailey, P. F. Bernath, M. Codrescu, H. Nakajima & J. M. Russell, Energetic particle precipitation effects on the Southern Hemisphere stratosphere in 1992-2005, *Journal of Geophysical Research*, 112, D08308, doi:10.1029/2006JD007696, 2007.
- Rusch, D; W., J. C. Gérard, S. Solomon, P. J. Crutzen & G. C. Reid, The effect of particle precipitation events on the neutral and ion chemistry of the middle atmosphere – I. Odd nitrogen, *Planetary and Space Science*, 29, 767-774, 1981.
- Sepällä, A.; P. T. Verronen, E. Kyrola, S. Hassinen, L. Backman, A. Hauchecorne, J. L. Bertaux & Fussen, Solar Proton Events of October-November 2003: Ozone depletion in the Northern hemisphere polar winter as seen by GOMOS/Envisat, *Geophysical Research Letters*, 31(19), L19107, doi:10.1029/2004GL021042, 2004.
- Sepällä, A.; P. T. Verronen, V. F. Sofieva, J. Tamminen, E. Kyrola, C. J. Rodger & M. A. Clilverd, Destruction of the Tertiary Ozone Maximum During a Solar Proton Event, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L078/04, doi:10.1029/2005GL025571, 2006.
- Solomon, S.; P. J. Crutzen & R. G. Roble, Photochemical coupling between the thermosphere and the lower atmosphere: 1. Odd nitrogen from 50 to 120km, *Journal of Geophysical Research*, 87, 7206-7220, 1982.
- Thorne, R. M., The importance of energetic particle precipitation on the chemical composition of the middle atmosphere, *Pure and Applied Geophysics (PAGEOPH)*, 118, 128-151, 1980.
- Tsurutani, B. T.; W. D. Gonzalez, Y. Kamide & J. K. Arballo, Magnetic Storms, *Geophysical Monograph*, 98, 1997.
- Turunen, E.; P. T. Verronen, A. Sepällä, C. J. Rodger, M. A. Clilverd, J. Tamminen, C-F Enell & T. Ulich, Impact of different energies of precipitating particles on NO_x generation in the middle and upper atmosphere during geomagnetic storms, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 7, 1176-1189, 2009.
- Zossi de Artigas, M., E. Zotto & P. Fernández, Tormentas geomagnéticas intensas: efectos en la atmósfera media, *Investigaciones en Facultades de Ingeniería del NOA*, Ed. N. Ortiz de Adler, A. G. Elías y T. Heredia, III, 112-116, 2007.
- Zossi de Artigas, M., E. Zotto, G. Mansilla & P. Fernández, Impacto de la precipitación de partículas energéticas en la atmósfera media durante tormentas geomagnéticas, *Investigaciones en Facultades de Ingeniería del NOA*, Ed. de la Universidad Nacional de Salta (EUNSa), III, 60-66, 2009.
- Zotto E., M. Zossi de Artigas & P. Fernández de Campra, Efecto de partículas energéticas solares en la atmósfera media durante períodos perturbados del ciclo solar 23, *Investigaciones en Facultades de Ingeniería del NOA*, III 76-80, 2008.
- Zotto E.; M. Zossi de Artigas, P. Fernández de Campra & G. A. Mansilla, Comportamiento del contenido total de ozono posterior a una tormenta geomagnética intensa ocurrida en el

ciclo solar 22 en latitudes geomagnéticas medias-bajas, *Investigaciones en Facultades de Ingeniería del NOA*, Secretaria de Investigación

y Posgrado, Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas, Universidad Nacional de Catamarca, p. 515-522. 2011.