

PERTURBACIONES IONOSFÉRICAS DURANTE TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS EN ALTAS LATITUDES

IONOSPHERIC DISTURBANCES AT HIGH LATITUDES DURING GEOMAGNETIC STORMS

Gustavo A. Mansilla^{1,2,*} y Marta M. Zossi^{1,2}

¹Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Av. Independencia 1800, 4000 San Miguel de Tucumán, Argentina

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina

*E-mail: gmansilla@herrera.unt.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo se analiza el comportamiento de la ionosfera sobre una estación de alta latitud durante algunas tormentas geomagnéticas intensas ocurridas en 2000 y 2001. Para ello, se utilizan datos de la frecuencia crítica de la región F2, foF2, y de la altura virtual de la capa F, h'F, medidos en la estación Base Gral. San Martín (68°08'S; 67°06'W) durante las tormentas del 6 de abril de 2000, 23 de mayo de 2000, 31 de marzo de 2001 y 11 de abril de 2001 (período de alta actividad solar). Con el objeto de obtener una medida de las perturbaciones ionosféricas, se comparan las mediciones foF2 con los valores proporcionados por el modelo IRI-2001 en condiciones magnéticamente tranquilas. Los resultados muestran en general efectos negativos (descensos de foF2 respecto a condiciones tranquilas), durante la fase principal y de recuperación de las tormentas, independientemente del tiempo local de inicio de las tormentas. Las mediciones de h'F presentan incrementos en asociación con las fases negativas. Se analiza también el rol de algunos mecanismos físicos que pueden estar actuando durante estos eventos.

Palabras clave: tormentas geomagnéticas, ionosfera, altas latitudes.

ABSTRACT

In this paper, the ionospheric response of a high latitude station to some geomagnetic storms occurred in 2000 and 2001 is analyzed. For that, data of the critical frequency of the F2-layer foF2 and the virtual height h'F measured at Base Gral. San Martín (68°08'S; 67°06'W) during the storms of April 6, 2000; May 23, 2000; March 31, 2001 and April 11, 2001 (high solar activity) are considered. In order to obtain the features of the disturbances, a comparison of the foF2 data with the outputs of the IRI-2001 model during quiet conditions is made. The results show in general negative storm effects (decreases of foF2 respect to quiet conditions) following the storm commencement irrespective of the local time. The h'F data show increases in association with the negative storm effects. The role of some physical mechanisms acting during the storm periods is considered.

Keywords: geomagnetic storms, ionosphere, high latitudes.

INTRODUCCIÓN

Las llamadas tormentas ionosféricas, perturbaciones de la ionosfera terrestre durante las tormentas geomagnéticas, se estudian desde hace más 80 años (ver, por ejemplo, Prölss et al., 1991). Los efectos ionosféricos de las tormentas geomagnéticas se han estudiado principalmente en latitudes medias y bajas. Básicamente, durante condiciones perturbadas la densidad de electrones de la ionosfera puede aumentar o

disminuir con relación a los valores de condiciones magnéticamente tranquilas. Estos cambios se denominan fase "positiva" o "negativa" de la tormenta, respectivamente.

Varios mecanismos físicos se han sugerido para intentar explicar el comportamiento de la ionosfera durante estos eventos. Estos incluyen, entre otros, campos eléctricos, vientos termosféricos meridionales, cambios de composición de neutros (véase, por ejemplo Fuller-Rowell et al., 1994; Pröls, 1995; Buonsanto, 1999; Danilov, 2001, 2013 y sus referencias).

En cambio, los efectos ionosféricos de las tormentas geomagnéticas en altas latitudes han sido poco analizados. Algunos estudios han encontrado que las fases negativas se observan mayormente en horas de la noche (Kane, 2005). Una característica importante de una fase negativa es su desplazamiento de altas latitudes hacia latitudes medias y bajas en el hemisferio de verano, durante la evolución de una tormenta geomagnética (Danilov, 2013).

Con el objeto de proporcionar una contribución al conocimiento de la morfología y a la comprensión de los procesos que actúan en la ionosfera de altas latitudes, en este trabajo se analiza el comportamiento de la ionosfera en una estación antártica de alta latitud en respuesta a algunas tormentas geomagnéticas intensas ocurridas en los años 2000 y 2001 y también se discuten posibles mecanismos físicos intervinientes.

Para ello, se utilizan los datos de la frecuencia crítica de la capa F2, foF2, y la altura virtual de la capa h'F, medidos en la estación antártica Base Gral. San Martín (68°08'S; 67°06'W) durante las tormentas magnéticas ocurridas el 6 de abril de 2000; 23 de mayo 2000; 31 de marzo 2001 y 11 de abril 2001. Estos datos fueron proporcionados por el Instituto Antártico Argentino. Se destaca que los datos medidos en esta estación durante condiciones perturbadas no han sido prácticamente estudiados y/o analizados, lo que nos permite obtener información de una región desconocida en lo que hace a comportamiento ionosférico durante períodos magnéticamente perturbados.

Para obtener una medida de las perturbaciones, se determina la desviación relativa DfoF2, en porcentaje, entre las mediciones de foF2 y los valores que proporciona el modelo IRI-2001 (International Reference Ionosphere) en condiciones magnéticamente tranquilas (con la opción CCIR). Se utiliza el modelo IRI-2001 en lugar de valores medios de días magnéticamente tranquilos de los meses que ocurrieron las tormentas porque hay pocas mediciones en los días que se caracterizan por esa condición. Por otro lado, cabe aclarar que la versión IRI-2001 o la más reciente IRI-2012 utilizan la misma opción de entrada y por lo tanto ambas versiones no difieren en la determinación de foF2 en condiciones tranquilas.

Actualmente, un método llamado de redes neuronales es utilizado como alternativo para una predicción pero hacia delante (hasta 24 horas), de distintos parámetros ionosféricos (foF2, entre ellos). Algunos resultados indican que la predicción a corto plazo de foF2 con éste método es mejor que con el modelo IRI (con CCIR), en promedio, por un margen del orden de 15 a 16% (Oyeyemi y Poole, 2005).

Se utiliza el índice geomagnético Dst para especificar las diferentes fases de las tormentas geomagnéticas (inicial, principal y de recuperación). Los valores horarios de Dst y del índice auroral AE se obtuvieron del World Data Center, Kyoto, Japón (<http://swdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir>).

RESULTADOS

En las Figuras 1-4 se presenta el comportamiento de la ionosfera sobre la estación antártica Base Gral. San Martín durante cuatro tormentas magnéticas intensas, que se produjeron en 2000 y 2001. La parte superior de las figuras muestra la evolución temporal de los índices Dst y AE para los períodos de tormenta considerados. El comienzo súbito o repentino para cada tormenta (CS) está representado por una flecha. Los paneles medio e inferior de las figuras muestran la variación relativa de foF2 respecto a días calmos (IRI-2001) y los valores de h'F, respectivamente, para los mismos períodos que los índices geomagnéticos. Las líneas punteadas verticales en estos dos paneles también indican el CS.

La Figura 1 muestra el período de tormenta desde el 4 al 7 de abril de 2000. La tormenta tuvo un inicio repentino (CS) el 6 de abril a las 1639 TU. El índice Dst comienza a descender aproximadamente a las 17 TU de ese día, alcanzando un mínimo de -288 nT a las 01 TU del 7 de abril, seguido posteriormente por una recuperación regular. Casi simultáneamente con el CS, el índice AE aumenta drásticamente de 200 a 1600 nT, disminuyendo durante la fase de recuperación de la tormenta. Se observa una fase negativa en DfoF2 desde antes del CS, que se mantiene durante las fases principal y de recuperación. El decrecimiento de DfoF2 observado antes del CS podría estar relacionado con el aumento de los valores de AE observados durante el 6 de abril. Aunque faltan datos de h'F durante la fase principal y la primera parte de la recuperación, la tendencia de los datos disponibles indica que hubo un aumento en h'F el 7 de abril, durante la fase de recuperación, en comparación con días previos al comienzo de la tormenta.

La Figura 2 presenta las variaciones de Dst, AE, DfoF2 y h'F para el período 23 - 25 de mayo de 2000. El CS de la tormenta se produjo a las 1425 TU del 23 de mayo. La fase principal se mantuvo hasta las 09 TU del día siguiente, cuando Dst alcanzó un mínimo de -147 nT. El índice AE comienza a aumentar desde el SC, alcanzando valores máximos (~ 1440 nT) durante la fase principal de la tormenta, después de lo cual se inicia una disminución irregular con picos de intensidad más bajos que el primero. No hay mediciones de foF2 entre las 00 TU y las 12

TU del 24 de mayo (durante la última parte de la fase principal) y entre las 22 TU del día 24 y las 8 TU del 25 de mayo; sin embargo, es evidente una fase negativa durante la primera parte de la recuperación, seguida por una fase positiva. Un aumento pronunciado de la altura virtual $h'F$ puede verse en asociación con la fase negativa.

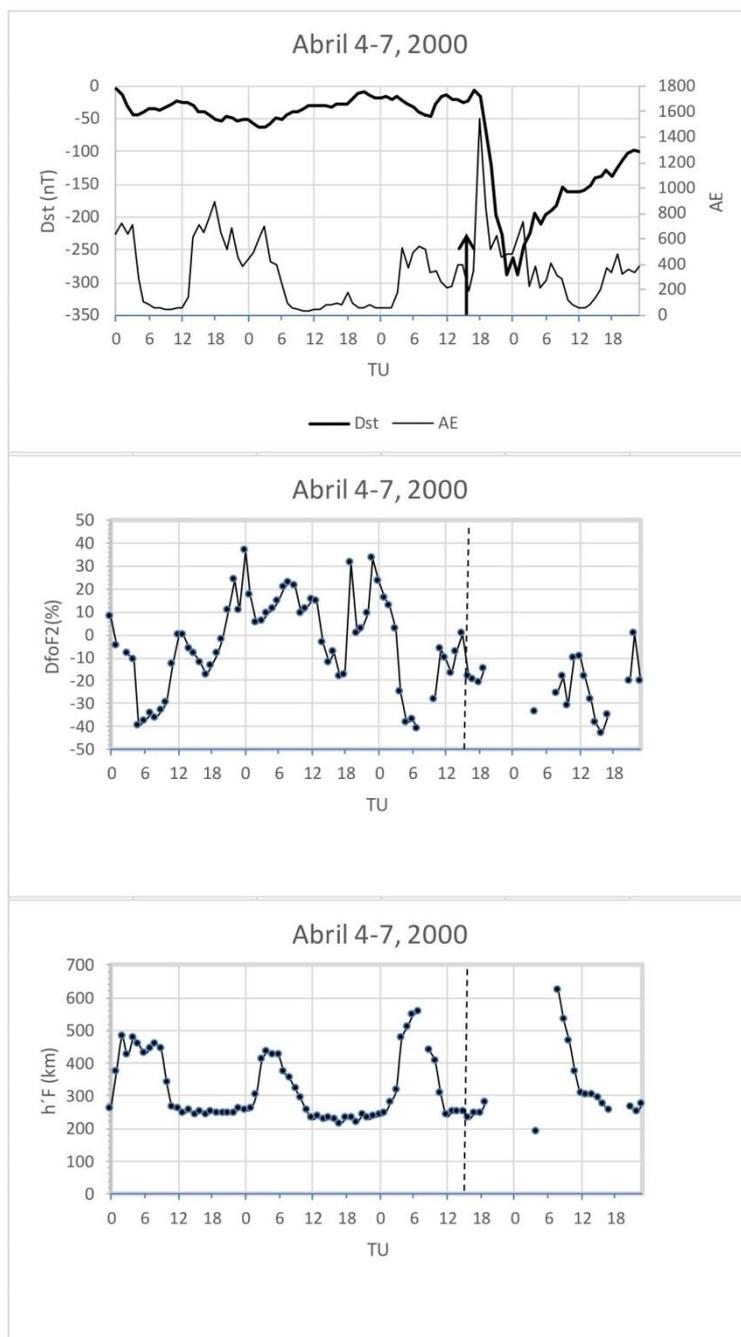


Figura 1. Variación temporal de los índices Dst y AE (panel superior), desviaciones relativas de mediciones foF2 con respecto a los valores del modelo IRI-2001 (panel medio), y valores medidos de $h'F$ (panel inferior) para el período de tormenta 4 – 7 de abril de 2000. El comienzo súbito o repentino (CS) de las tormentas se indica por una línea vertical discontinua en los paneles medio e inferior.

Figure 1. Temporal variation of the Dst and AE indices (top panel), the relative deviations of measurements foF2 with respect to the IRI-2001 model values (middle panel), and the measured $h'F$ values (lower panel) for the 4-7 April 2000 storm period. The sudden commencement (CS) is indicated by a dotted line in the middle and bottom panels.

La Figura 3 presenta el comportamiento de los índices Dst y AE y los parámetros ionosféricos DfoF2 y $h'F$ desde el 31 de marzo al 3 de abril de 2001. La tormenta tuvo un CS el 31 de marzo a las 0052 TU. La máxima desviación de Dst fue de - 387 nT a las 09 TU del 31 de marzo (final de la fase principal). Después de esto, se inicia una fase

de recuperación relativamente regular. El índice AE aumenta en respuesta al comienzo de la tormenta alcanzando los mayores valores (~ 1500 nT) durante la primera parte de la fase de recuperación; posteriormente presenta un comportamiento irregular. Los valores de DfoF2 indican una fase negativa durante la fase principal y primera etapa de la recuperación (31 de marzo y primeras horas del 1 de abril). Luego, puede verse un comportamiento irregular, con valores positivos y negativos, durante la última parte de la recuperación de la tormenta. También se observa de los datos disponibles de $h'F$, que éstos están acrecentados durante los días 31 de marzo y 1 de abril (en asociación con la fase negativa de DfoF2), en comparación con los datos del 3 de abril.

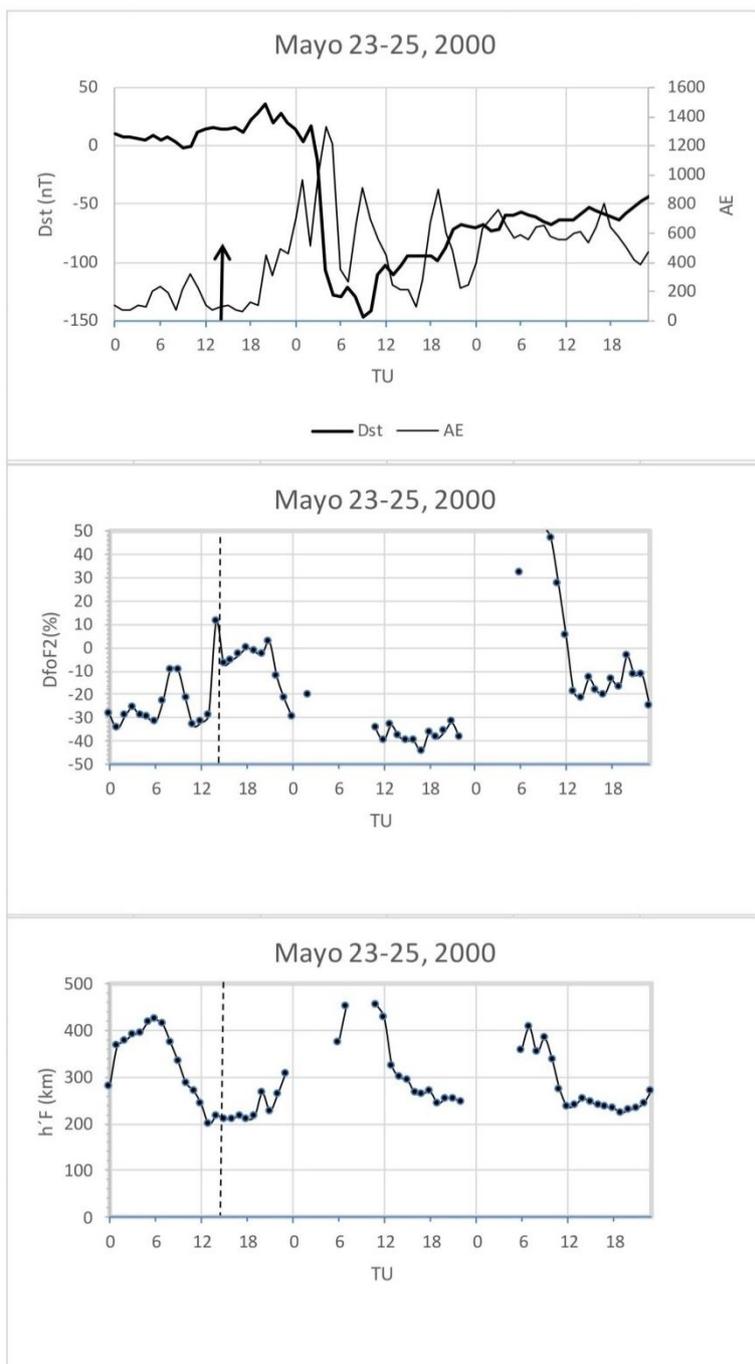


Figura 2. Ídem a la Fig. 1, pero para el período de tormenta 23 – 25 de mayo de 2000.
Figure 2. The same as Figure Fig 1, but for the 23-25 May 2000 storm period.

La Figura 4 muestra las variaciones de Dst, AE, DfoF2 y $h'F$ para el período de tormenta 10-13 de abril de 2001. El CS de la tormenta ocurrió el 11 de abril a las 1519 TU. La fase principal permanece hasta las 00 TU del 12 de abril, cuando Dst alcanza un valor mínimo de -271 nT. Posteriormente, se inicia una recuperación sostenida. El índice AE incrementa rápidamente (hasta ~ 1700 nT) desde las 13 TU del día 11 hasta aproximadamente las 12

TU del día 12, cuando se produce un decrecimiento importante, aumentando nuevamente durante el 13 de abril. En respuesta a la tormenta comienza una fase negativa, que se mantiene durante la fase principal y de recuperación de la tormenta. La falta de datos h'F impiden determinar con precisión su comportamiento durante la tormenta.

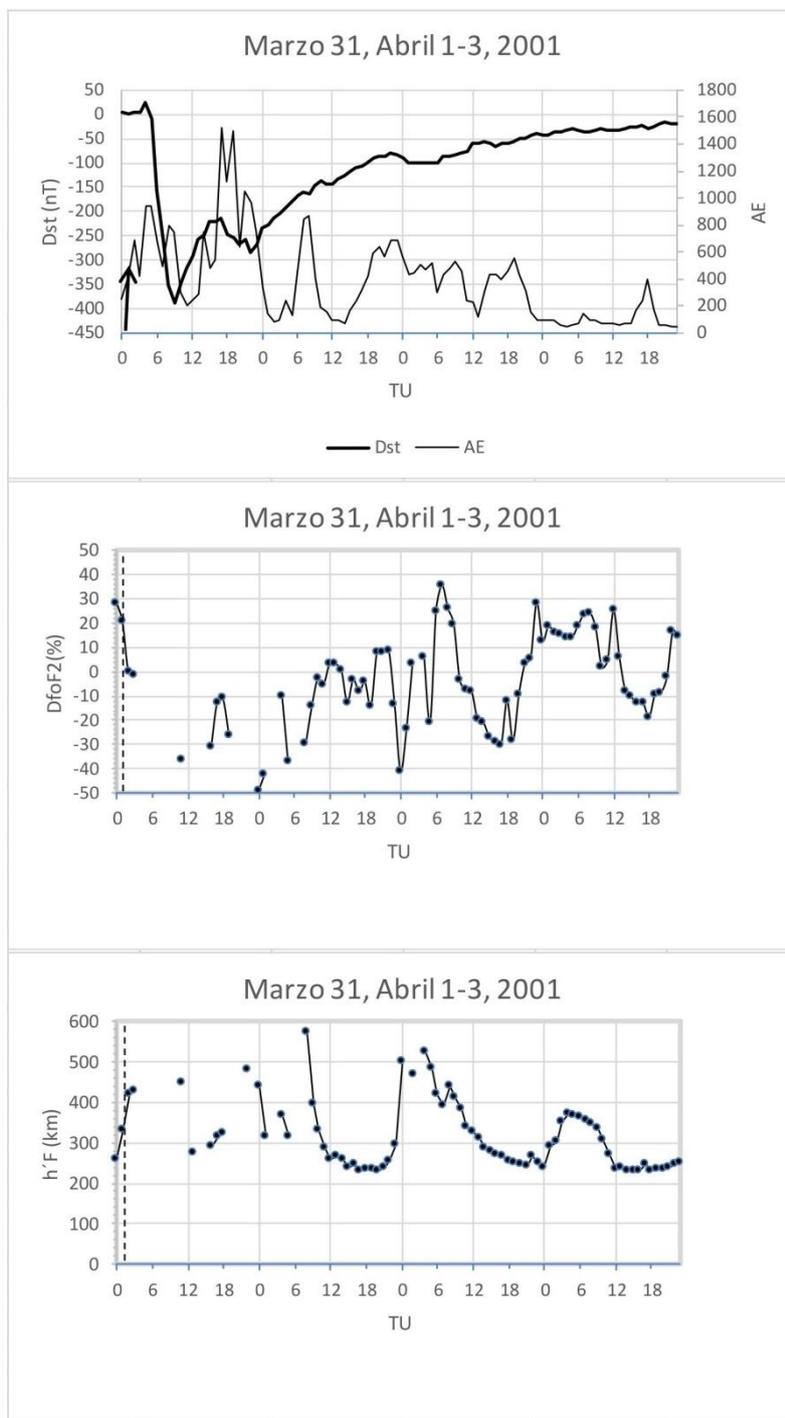


Figure 3. Ídem a la Fig. 1, pero para el período de tormenta 31 de marzo – 3 de abril de 2001.
Figure 3. The same as Figure Fig 1, but for the 31 March – 3 April 2001 storm period.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Todas las tormentas consideradas comenzaron en horas de la mañana o del mediodía local. En contraste con latitudes medias, donde la morfología de la región F es bastante complicada, la respuesta de la ionosfera de alta latitud a las tormentas geomagnéticas fueron predominantemente fases negativas de larga duración, que

permanecieron durante la fase principal y de recuperación de las tormentas. Los resultados aquí obtenidos corroboran estudios anteriores, ya que la disminución de foF2 en altas latitudes durante condiciones perturbadas ha sido previamente observada (por ejemplo, Kane, 2005; Kurkin et al, 2008).

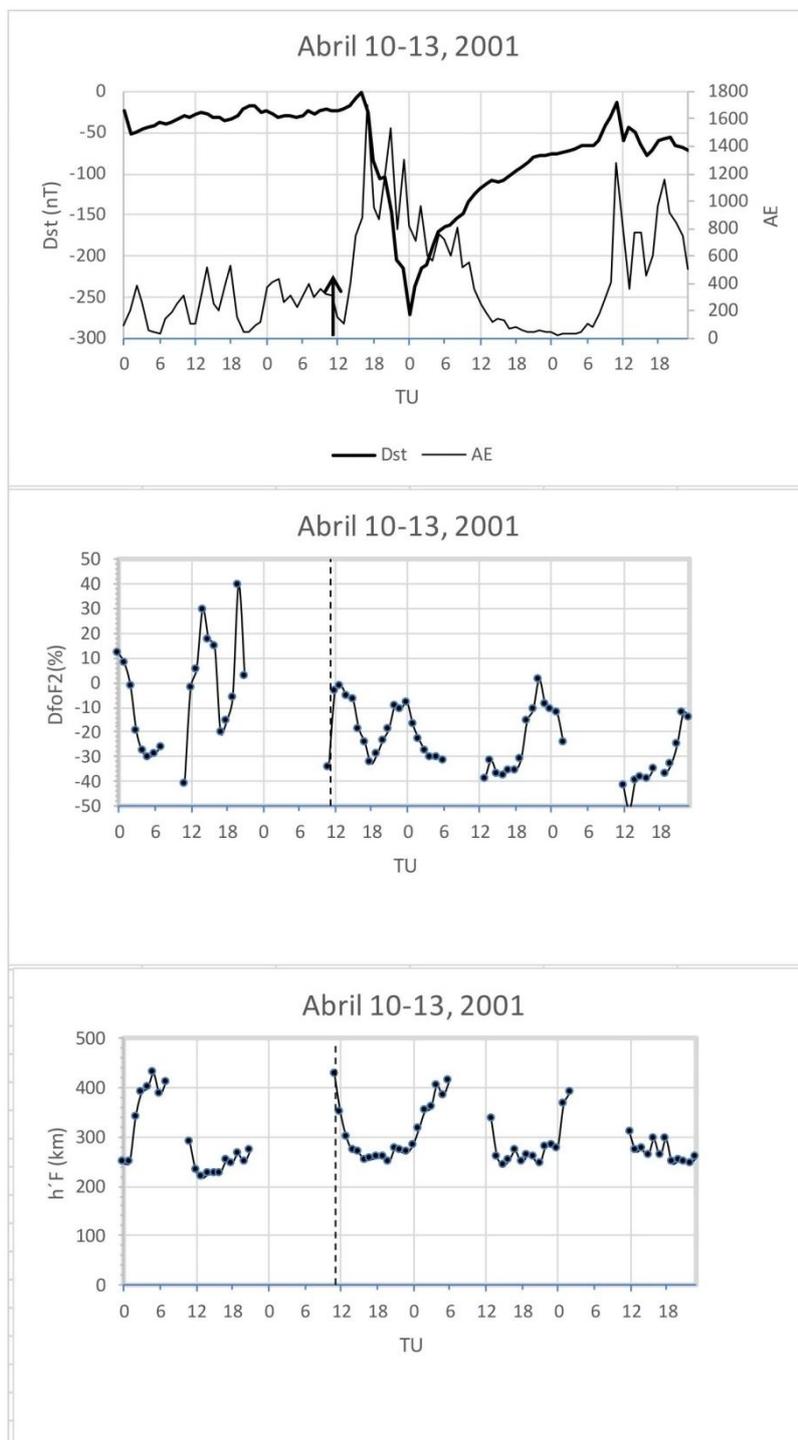


Figura 4. Ídem a la Fig. 1, pero para el período de tormenta 10 – 13 de abril de 2001.

Figure 4. The same as Figure Fig 1, but for 10 – 13 April 2001 storm period.

La intensidad de la perturbación magnética (determinada por el mínimo valor que alcanza Dst) parece no estar correlacionada con los valores de DfoF2. Como ejemplos, en la tormenta de mayo de 2000, el Dst mínimo fue de -147 nT y la disminución relativa de foF2 fue ~ 44% durante la fase de recuperación, mientras que en abril de 2001 fueron -271 nT y ~ 35%, respectivamente. Es interesante observar que las fases negativas comenzaron casi simultáneamente con la caída de Dst (comienzo de la fase principal).

La causa principal de una fase negativa en latitudes altas es un cambio en la composición de neutros. La característica prominente de estas perturbaciones es un aumento de las densidades de nitrógeno y de oxígeno molecular y una disminución simultánea de la densidad de oxígeno atómico.

El calentamiento Joule en la atmósfera superior polar induce una expansión de los gases moleculares pesados (O_2 y N_2) y también induce su propia circulación (y puede oponerse a la circulación "background" o de fondo), que en alturas de la región ionosférica F2 tiende a llevar el aire hacia latitudes ecuatoriales. Esto lleva a una deriva de la fase negativa hacia menores latitudes (véase, por ejemplo Richmond y Lu, 2000; Danilov, 2001 para más detalles).

En apoyo de esta explicación podemos ver el levantamiento de la capa F (a través de h'F) debido al viento neutro, que se produce por la inyección de energía mencionada en la atmósfera polar durante períodos de perturbaciones geomagnéticas. La falta de datos ionosféricos en algunas horas impide determinar si la elevación de la capa F se produce antes o es casi simultánea con el inicio de las fases negativas.

Se piensa que tanto el aumento de los gases moleculares como la disminución en la densidad de oxígeno atómico contribuyen al decrecimiento de la densidad de electrones (por ejemplo, Prölss, 1995). Sin embargo, mediciones de satélite muestran que las fases negativas son producidas principalmente por un aumento en la concentración de nitrógeno molecular sin prácticamente cambios en la concentración de oxígeno atómico (por ejemplo, Kil et al., 2011; Mansilla y Zossi, 2012).

Un elemento que complica el mecanismo mencionado anteriormente involucra campos eléctricos de origen magnetosférico, que pueden penetrar en alturas de la región F durante las tormentas geomagnéticas.

Debido a la geometría del campo magnético en latitudes polares y altas, esos campos no producen derivas verticales como en bajas latitudes, pero son capaces de influir en el comportamiento de la región F2 a través del coeficiente de recombinación. Por lo tanto, un aumento del campo eléctrico conduce a una disminución de la densidad de electrones (Buonsanto, 1999).

Por lo tanto, se sugiere que las fases negativas que comienzan poco después del CS (por ejemplo, tormenta de abril de 2001) son iniciadas por estos campos eléctricos. Durante el desarrollo de tormentas, los cambios de composición de neutros posiblemente promueven y/o sustituyen el efecto inicial de un campo eléctrico.

En conclusión, en este trabajo se presenta la respuesta ionosférica de una estación antártica a algunas tormentas geomagnéticas intensas ocurridas en 2000 y 2001. Los resultados muestran en general fases negativas (disminución de valores foF2 respecto a valores de condiciones magnéticamente tranquilas) de larga duración, durante la fase principal y de recuperación de tormentas geomagnéticas que comenzaron en horas de la mañana y el mediodía local. Las máximas desviaciones que alcanzan las fases negativas no muestran correlación con la intensidad de las tormentas.

Este estudio sugiere que las causas más probables para las fases negativas son la penetración en la ionosfera de campos eléctricos de origen magnetosférico, seguido de perturbaciones en la composición de neutros.

Evidentemente, se deben realizar más estudios para tener una mejor caracterización del comportamiento de la ionosfera de altas latitudes durante tormentas geomagnéticas de variada intensidad, y también para corroborar los distintos mecanismos físicos involucrados y/o proponer nuevos mecanismos. El presente trabajo de investigación es una contribución en este sentido.

Agradecimientos: los autores agradecen al Instituto Antártico Argentino por proporcionar los datos ionosféricos y a Oscar Abarca por la interpretación de los ionogramas.

BIBLIOGRAFÍA

- Buonsanto, M.J., (1999). Ionospheric storms - A review, *Space Sci. Rev.*, 88, 563-601.
- Danilov, A.D., (2001). F2-region response to geomagnetic disturbances, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 63, 441-449.
- Danilov, A.D., (2013). Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances, *Advances in Space Research*, 52, 343-366.
- Fuller-Rowell, T.J., M.V. Codrescu, R.J. Moffett and S. Quegan, (1994). Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms, *Journal of Geophysical Research*, 99, 3893-3914.
- Kane, R.P., (2005). Ionospheric foF2 anomalies during some intense geomagnetic storms, *Annales Geophysicae*, 23, 2487-2499.
- Kil, H., Y.S. Kwak, L.J. Paxton, R.R. Meier and Y. Zhang, (2011). O and N_2 disturbances in the F region during the 20 November 2003 storm seen from TIMED/GUVI, *Journal of Geophysical Research*, 116, A02314. doi: 10.1029/2010JA016227.
- Kurkin, V.I., O.M. Pirog, N.M. Polekh, A.V. Mikhalev, I.N. Poddelsky and A.E. Stepanov,(2008). Ionospheric response to geomagnetic disturbances in the north-eastern region of Asia during the minimum of 23rd cycle of solar activity, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 70, 2346-2357.
- Mansilla, G.A. and M.M. Zossi, (2012). Thermosphere-ionosphere response to a severe magnetic storm: A case study, *Advances in Space Research*, 49 (11), 1581-1586.

- Oyeyemi E.O. and A.W.V. Poole, (2005). On the global model for foF2 using neural networks, *Radio Science*, 40, RS6011.
- Prölss, G.W., L.H. Brace, H.G. Mayr,, G.R. Carignan, T.L. Killeen and J.A. Klobuchar, (1991). Ionospheric storm effects at subauroral latitudes: A case study, *Journal of Geophysical Research*, 96, 1275-1288.
- Prölss, G.W., (1995). Ionospheric F-region storms, in *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*, Vol. 2, ed. Volland, CRC Press/Boca Raton, 195-248.
- Richmond, A.D. and G. Lu, (2000). Upper-atmospheric effects of magnetic storms: a brief tutorial, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 62, 1115-1127.

Recibido: 06-11-2014

Aceptado: 19-10-2015