

EFFECTOS DE LA PRECIPITACIÓN DE PARTÍCULAS ENERGÉTICAS DE ORIGEN SOLAR EN LA ATMOSFERA DE LA TIERRA

Marta M. Zossi^{1,2}, Gustavo A. Mansilla^{1,2} y Elda M. Zotto³

¹ *Laboratorio de Ionosfera, Atmosfera Neutra y Magnetosfera, INFNOA (CONICET-UNT), Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, San Miguel de Tucumán, Argentina*

² *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina*

³ *Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas, Universidad Nacional de Catamarca, San Fernando del Valle de Catamarca, Argentina.*

mzossi@herrera.unt.edu.ar

RESUMEN

La Tierra es continuamente "bombardeada" por partículas energéticas cargadas procedentes del espacio exterior que penetran en la atmósfera y pueden influir en una variedad de procesos atmosféricos.

El Sol emite ondas de radio, rayos X y partículas energéticas, además de la luz visible. El transporte de energía desde el Sol hacia la Tierra se produce de dos formas: (1) radiación electromagnética, que emite alrededor de 4×10^{33} erg/s irradiando la Tierra con $1,37 \times 10^3$ W m⁻² y (2) radiación corpuscular (el viento solar con el campo magnético interplanetario "congelado" en él y cualquier partícula solar energética que puede estar presente).

El ingreso de partículas energéticas solares a la magnetosfera de la Tierra produce efectos sobre las especies químicas de la atmósfera alta y media cuando precipitan en las zonas aurorales de ambos hemisferios guiadas por el campo geomagnético.

La ionosfera, como parte del entorno meteorológico espacial, juega un papel crucial a través de la modulación del circuito electrodinámico global, su acoplamiento a la magnetosfera y como medio clave para la comunicación, el sondeo y la navegación. Por tanto, una comprensión profunda de su variabilidad en todas las escalas de tiempo es un importante aporte al estudio de la meteorología espacial.

Como consecuencia de la intensificación de la precipitación de partículas durante periodos de tormenta geomagnética, se produce un aumento de la ionización, la creación de nitrógeno impar (NO_x) y de hidrógeno impar (HO_x) en la atmósfera superior, afectando la química del ozono estratosférico. Por otro lado, los campos eléctricos de origen magnetosférico, las perturbaciones atmosféricas viajeras, la circulación termosférica, y los cambios de composición química, explican las características ionosféricas de la densidad electrónica durante las distintas fases de tormentas geomagnéticas y en diferentes latitudes.

Palabras clave: precipitación de partículas energéticas, tormenta geomagnética, densidad electrónica, foF2, NO_x, ozono

ABSTRACT

The Earth is continuously "bombardeated" by energetic charged particles from outer space that penetrate the atmosphere and can influence a variety of atmospheric processes.

The Sun emits radio waves, X-rays and energetic particles in addition to visible light. The energy transport from the Sun to the Earth occurs in two forms: (1) electromagnetic radiation, which emits

about 4×10^{33} erg/s irradiating the Earth with 1.37×10^3 W m⁻² and (2) corpuscular radiation (the solar wind with the interplanetary magnetic field "frozen" into it and any energetic solar particles that may be present).

The inflow of solar energetic particles into the Earth's magnetosphere produces effects on chemical species in the high and middle atmosphere as they precipitate into the auroral zones of the two hemispheres guided by the geomagnetic field.

The ionosphere, as part of the space weather environment, plays a crucial role through modulation of the global electrodynamic circuitry, its coupling to the magnetosphere, and as a key medium for communication, sounding, and navigation. Therefore, a deep understanding of its variability on all time scales is an important contribution to the study of space weather.

As a consequence of intensified particle precipitation during periods of geomagnetic storms, there is an increase in ionization, the creation of odd nitrogen (NO_x) and odd hydrogen (HO_x) in the upper atmosphere, affecting the chemistry of stratospheric ozone. Also, electric fields of magnetospheric origin, circulating atmospheric disturbances, thermospheric circulation, and chemical composition changes explain the ionospheric characteristics of the electron density during different phases of geomagnetic storms and at different latitudes.

Key words: energetic particle precipitation, geomagnetic storm, electron density, foF2, NO_x, ozone

INTRODUCCION

La potencia del viento solar modifica el campo geomagnético intrínseco de la Tierra en el espacio cercano a la Tierra, creando una cavidad llamada magnetosfera, que está llena de plasma tanto del viento solar como de origen ionosférico (Akasofu,1998). El acoplamiento dinámico del viento solar con la magnetosfera de la Tierra da como resultado la aceleración de las partículas cargadas, en su mayoría electrones, que son acelerados y atrapados en la magnetosfera de la Tierra. Estas partículas se precipitan en la atmósfera desde varias regiones de la magnetosfera, tanto impulsadas por las condiciones del viento solar como por los procesos magnetosféricos intrínsecos. La multitud de procesos y su variabilidad dinámica conduce a grandes variaciones en las distribuciones espacial, temporal, de flujo y de energía de las partículas precipitantes. En la cúspide polar y el cono de pérdida de la región del casquete polar las partículas precipitan directamente en las líneas abiertas del campo magnético, mientras que en los óvalos aurales y latitudes subaurales la precipitación en las líneas del campo cerrado ocurre cuando las partículas atrapadas son empujadas hacia el cono de pérdida, lo que puede ocurrir incluso en latitudes medias para la precipitación de electrones relativistas desde los cinturones de radiación.

Un papel importante en los procesos atmosféricos lo desempeña la precipitación de partículas energéticas en zonas polares, a latitudes $> 60^\circ$, pueden ser electrones: aurales y del cinturón de radiación (electrones relativistas), protones: solares (partículas energéticas solares) y galácticos (rayos cósmicos galácticos), según se resume en Seppälä (2007) y Mironova et al. (2015). Los electrones aurales son partículas con energías de hasta unas pocas decenas de keV y su precipitación se conoce como precipitación auroral porque precipitan en la región del óvalo auroral, proceden de la lámina de plasma de la cola de la magnetosfera y son los más fuertemente acelerados antes de precipitar en la atmósfera. Los electrones relativistas son partículas procedentes del anillo de radiación exterior (principalmente electrones con energías de hasta 10 MeV, llamados electrones relativistas) que forman una aurora difusa en una parte del óvalo auroral hacia el ecuador.

Hay varias regiones en la magnetosfera, donde existe un proceso de intercambio de energía. La reconexión magnética puede ocurrir en latitudes bajas en el lado diurno, así como en latitudes altas y en la cola magnética distante, que es la región de la física de las subtormentas aurorales.

En los sistemas de corrientes magnetosféricas, las corrientes alineadas en el campo se relacionan con la precipitación vista como el óvalo auroral, mientras que la precipitación en las líneas de campo abierto se produce a partir de la vaina magnética o directamente del viento solar. En la magnetosfera interior, se puede tener precipitación de partículas del cinturón de radiación, por ejemplo, en interacciones onda-partícula, o una precipitación más débil por la dispersión de la corriente de anillo. Las energías de las partículas precipitantes a menudo exceden los disponibles de las partículas del viento solar, por lo que varios mecanismos de aceleración deben estar presentes en la magnetosfera.

Cuando tiene lugar un evento protónico solar, asociado con eyecciones de masa coronal o fulguraciones solares, partículas energéticas, principalmente protones con energías de hasta cientos de MeV, de origen solar precipitan a altas latitudes geomagnéticas donde tienen acceso a la atmósfera (Kivelson y Russell, 1995); estos sucesos se conocen como Eventos Protónicos Solares y son un elemento importante en la Meteorología Espacial. La energía de una partícula al llegar a la atmósfera determina la profundidad a la que la partícula puede penetrar a ella: un protón que posee 10 MeV de energía cinética es capaz de ionizar la atmósfera a 65 km (Hargreaves, 1992).

El mecanismo de precipitación de partículas mencionado que permite el acoplamiento de la atmósfera superior e inferior, es llamado de efecto indirecto. Fue estudiado hace casi cuatro décadas por Solomon et al. (1982), usando un modelo de dos dimensiones y también observado frecuentemente a través de mediciones (Callis et al, 1996, 1998a, 1998b; Jackman et al, 1980, 1995, 2001.; Randall et al, 1998, 2001.; Rinsland et al., 1996; Russell et al., 1984; Siskind et al., 1997, 2000). En los lugares de la estratosfera en donde se produce in situ el componente nitrogenado NO_x (= NO + NO₂, el efecto se conoce como efecto directo de la precipitación de partículas (Jackman et al., 2005; Rohen et al, 2005). El efecto directo de la precipitación de partículas requiere partículas de muy alta energía y por lo tanto ocurre con menos frecuencia.

Puesto que el nitrógeno y el oxígeno son los componentes predominantes en la atmósfera neutra, son los más afectados por la ionización. Actualmente, los efectos por ionización secundaria de la precipitación de partículas energéticas que afectan el ambiente se resumen como sigue: producción de los gases NO_x = N + NO + NO₂, y HO_x = H + OH + HO₂; influencia en la temperatura y la dinámica atmosféricas durante eventos protónicos solares intensos (Jackman et al., 2007); incrementos de NO_x y una subsecuente pérdida de ozono durante la precipitación de electrones energéticos con cambios significativos en las temperaturas polares y alturas geopotenciales, cambios se llevarían a cabo como resultado de la disminución del ozono o a través de calentamiento Joule (Rozanov et al., 2005; 2012); y aumentos de HO_x y liberación de cloro desde el reservorio de cloro atmosférico HCl. Los incrementos en las especies de la familia de cloro impar ClONO₂ también han sido observados en la estratosfera media después de eventos protónicos solares (López-Puertas et al., 2005).

En este trabajo se presentan los efectos producidos por la precipitación de partículas con altas energías en la atmósfera de la Tierra del Hemisferio Sur durante y luego de la ocurrencia de tormentas geomagnéticas intensas sobre: a) Ionosfera y b) Estratosfera.

a) Ionosfera

La respuesta de la capa F2 a una tormenta geomagnética se conoce como tormenta ionosférica. Las tormentas ionosféricas pueden ser "positivas" o "negativas", según aumente o disminuya la densidad de electrones máxima de la capa F2 (NmF2) en comparación con los valores medios de los días geomagnéticamente tranquilos (Rishbeth y Garriott, 1969). Los cambios significativos en la densidad de electrones y otros parámetros clave de la región F

ionosférica dan como resultado una reducción en la precisión de la posición y en el rendimiento del seguimiento de los satélites e incluso dan como resultado la pérdida de la comunicación por satélite, entre otros efectos.

La morfología de la tormenta ionosférica es bastante complicada porque la reacción de la ionosfera puede ser bastante diferente en distintas estaciones ionosféricas aún durante la misma tormenta geomagnética, dependiendo de la latitud de la estación y su ubicación en el hemisferio de invierno o en el hemisferio de verano, hora local de la ocurrencia de perturbaciones magnéticas, la intensidad y algunos otros parámetros (Danilov, 2001). Sin embargo, aunque muchos estudios han informado los efectos de las tormentas geomagnéticas en la ionosfera, todavía no es posible pronosticar con precisión la respuesta de la ionosfera a una tormenta geomagnética debido a la complejidad y el carácter único de cada tormenta geomagnética. Actualmente se conoce que la precipitación de partículas energéticas, los campos eléctricos de origen magnetosférico, las perturbaciones atmosféricas viajeras, la circulación termosférica, los cambios de composición de neutros, pueden explicar las características ionosféricas de la densidad electrónica durante las diferentes fases de las tormentas geomagnéticas en diferentes latitudes.

En Mansilla and Zossi (2019) se estudiaron las variaciones de parámetros ionosféricos y termosféricos en estaciones ecuatoriales y de baja latitud del sector sudamericano durante la tormenta geomagnética ocurrida entre el 19 al 22 de diciembre de 2015.

Se trabajó con datos de sondeos ionosféricos (frecuencia crítica de la capa F2 (foF2) y su altura máxima (hmF2)) que se obtuvieron (cada 1 h) de la base de datos de Ionogramas digitales, DID Base (<http://giro.uml.edu/didbase/scaled.php>). La figura 1 muestra un mapa con las ubicaciones geográficas de las estaciones utilizadas en el trabajo.

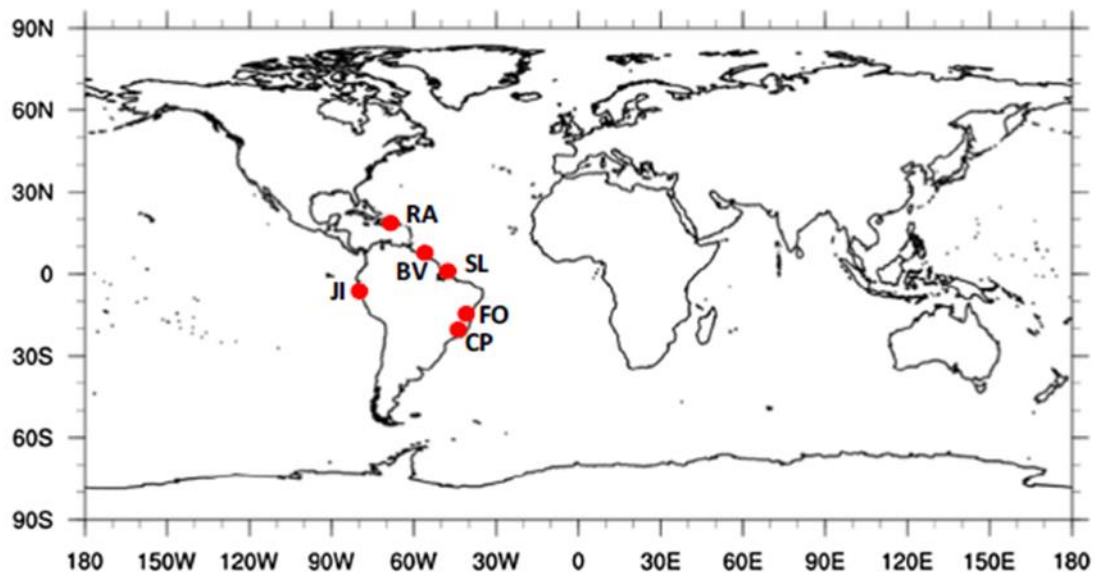


Fig. 1. Map with the geographical locations of the stations used in this study.

Figura 1. Mapa con las ubicaciones geográficas de las estaciones utilizadas en el trabajo (Mansilla and Zossi, 2019).

Los parámetros interplanetarios y geofísicos: componente Bz del campo magnético interplanetario (IMF), velocidad del viento solar (sw), densidad de protones, índices geomagnéticos AE y SYM-H se obtuvieron de la base de datos OMNI (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>). La relación [O] / [N₂] integrada en la columna del generador de imágenes ultravioleta global (GUVI) a bordo del satélite NASA's Thermosphere, Ionosphere, and Mesosphere, Energetics and Dynamics (TIMED) y la deriva del plasma a una altitud de 150 km del Jicamarca Unattended Long-term Investigations of the Ionosphere and Atmosphere (JULIA) radar

(<http://jro.igp.gob.pe/madrigal/>) para el período en estudio. Se utilizó el modelo de campo eléctrico de penetración rápida hacia el este del Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences (CIRES), que se basa en datos del satélite Advanced Composition Explorer (ACE), del radar JULIA y del magnetómetro del satélite CHAMP, el que se corrió a lo largo del sector longitudinal de las estaciones consideradas (<http://geomag.org/models/PPEFM/RealtimeEF.html>).

Con el fin de analizar los cambios producidos por la tormenta ionosférica se calcularon dos desviaciones relativas DfoF2 y Dhmf2:

$$\text{DfoF2} = (\text{foF2dist} - \text{foF2quiet}) / \text{foF2quiet} \times 100$$
$$\text{Dhmf2} = (\text{hmf2dist} - \text{hmf2quiet}) / \text{hmf2quiet} \times 100$$

donde foF2dist y hmf2dist son los valores horarios de la frecuencia crítica foF2 y la altura máxima de la capa F2 durante los días perturbados y foF2quiet y hmf2quiet son los valores correspondientes al día magnético tranquilo (18 de diciembre), que se utilizaron como valores de referencia.

La figura 2 muestra la respuesta ionosférica a la tormenta en términos de DfoF2 y Dhmf2 en las estaciones ecuatoriales y de baja latitud Jicamarca, Fortaleza, São Luís, Boa Vista, Cachoeira Paulista y Ramey durante el período 19-22 de diciembre de 2015. El rectángulo azul claro corresponde al período de la fase principal de la tormenta. El ssc (storm sudden commencement = comienzo súbito o repentino de la tormenta) ocurrió alrededor del mediodía local en este sector. Poco después del inicio de la tormenta a las 16:16 UT del 19 de marzo, se observaron aumentos de DfoF2 en São Luís, Fortaleza y Jicamarca y con menor amplitud en Ramey, Boa Vista y Cachoeira Paulista.

Estos efectos positivos irregulares de tormenta se mantuvieron en general hasta alrededor de las 00 UT del 20 de diciembre los que tuvieron asociadas disminuciones en la altura máxima de la capa F2, excepto en Fortaleza, donde se observó un aumento. Al inicio de la fase principal, sobre las estaciones de baja latitud Boa Vista, São Luís y Fortaleza y la cercana Jicamarca ecuatorial se iniciaron descensos en DfoF2, mientras que en Ramey se observó un aumento dos horas después y ningún efecto de la tormenta en Cachoeira Paulista. Los efectos negativos de la tormenta tuvieron diferente duración. En Boa Vista, el efecto de tormenta negativa se extendió hasta alrededor de las 17 UT, en São Luís y Fortaleza hasta ~ 10 UT y en Jicamarca hasta ~ 12 UT del 20 de diciembre. A excepción de Jicamarca, que tuvo incrementos en la altura del pico durante el efecto de tormenta negativa, las otras tres estaciones presentaron disminuciones de diferente amplitud en Dhmf2. Los efectos negativos de la tormenta cambiaron a efectos positivos irregulares con amplitud variable durante la fase principal. En Boa Vista el efecto positivo de tormenta se produjo desde alrededor de las 18 UT hasta las 06 UT del 21 de diciembre, mientras que en São Luís, Fortaleza y Jicamarca los efectos positivos se mantuvieron durante todo el 21 de diciembre. En general, estos efectos tuvieron asociadas reducciones en Dhmf2 durante la fase principal y luego incrementos irregulares durante la primera parte de la recuperación hasta alrededor de 06-07 UT. Durante el resto del 21 de diciembre, volvieron a producirse descensos de Dhmf2. Durante la fase principal, se presentaron fluctuaciones (inferiores al 20%) en ambos parámetros en Cachoeira Paulista y al inicio de la recuperación se observó un efecto positivo de corta duración hasta alrededor de las 08 UT del 21 de diciembre, al que siguió un efecto negativo que persistió el resto de ese día.

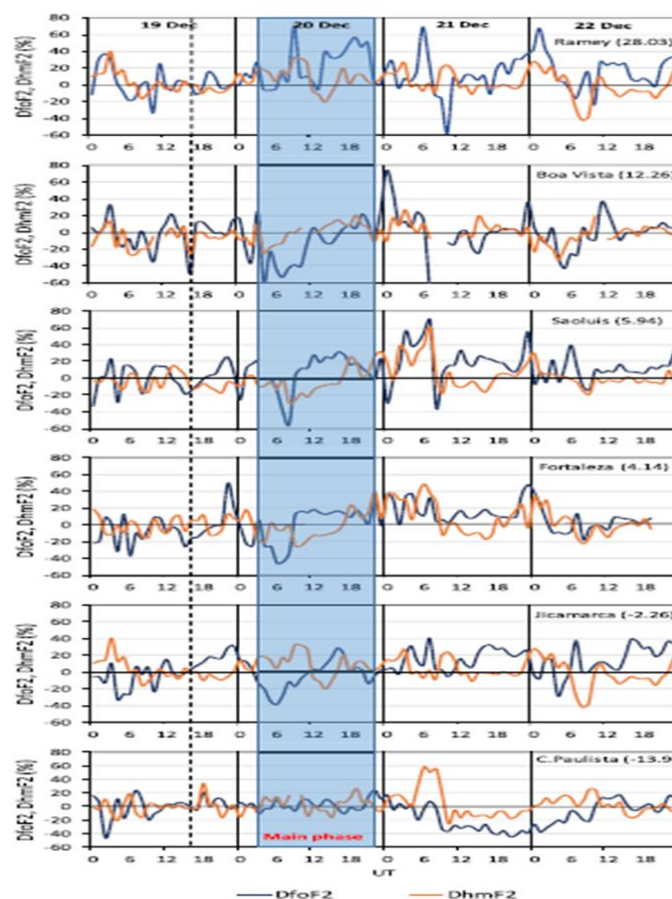


Figura 2. Variaciones horarias de DfoF2 y Dhmf2 del 19 al 22 de diciembre de 2015 en Ramey, Boa Vista, São Luís, Fortaleza, Jicamarca y Cachoeira Paulista. La línea punteada vertical indica el comienzo repentino de la tormenta. El rectángulo azul claro define el período de la fase principal de la tormenta. (Mansilla and Zossi, 2019).

El efecto positivo tuvo asociado un aumento abrupto de Dhmf2 a valores cercanos a cero, mientras que el efecto de tormenta negativo tuvo asociadas disminuciones en Dhmf2. En Ramey persistió un efecto de tormenta positivo de amplitud irregular a lo largo de la fase principal y la recuperación, salvo un efecto negativo de corta duración entre las 06 UT y las 11 UT del 20 de diciembre. En general, Dhmf2 se mantuvo por encima del nivel cero casi todo este tiempo, excepto por 3 períodos de corta duración alrededor de 12 UT - 16 UT el 20 de diciembre, y 03 UT - 06 UT y 12 UT - 22 UT el 21 de diciembre.

Los resultados muestran en general una caída en foF2 (efectos negativos de tormenta) después de la medianoche local en latitudes cercanas a la ecuatorial y bajas al comienzo de la fase principal. Esto posiblemente requiera un mecanismo rápido como uno electrodinámico. Un campo eléctrico hacia el oeste posiblemente produzca un movimiento descendente de la capa F2 donde la recombinación es fuerte, produciendo los efectos negativos de la tormenta (Mikhailov and Leschinskaya, 1991; Prölss, 1995; Astafyeva et al., 2018). Para confirmar esta suposición, se utilizó el modelo de campo eléctrico de penetración rápida (PPEF) de CIRES. Este modelo se corrió para una longitud de 300°E. La Figura 3 muestra un pico significativamente negativo (~ 1 mV / m) aproximadamente a las 04 UT del 20 de diciembre, lo que indica un campo eléctrico perturbado hacia el oeste que conduce a derivas de plasma descendentes durante la noche.

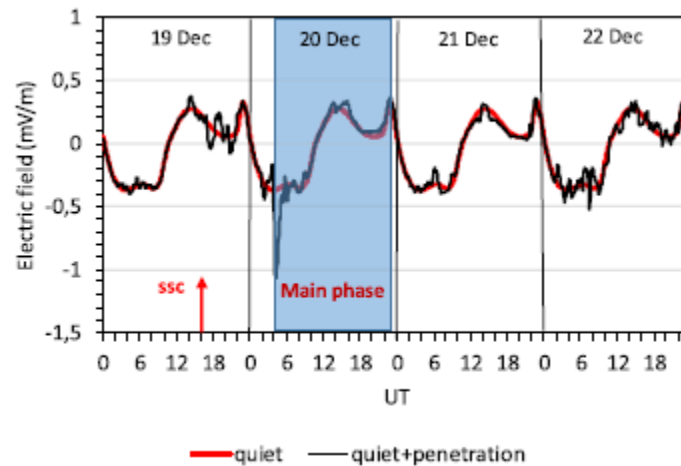


Figura 3. Campo eléctrico de penetración rápida en las longitudes de las estaciones utilizadas entre el 19 y el 22 de diciembre de 2015(Mansilla and Zossi, 2019).

Sugerimos que las perturbaciones ionosféricas observadas al comienzo de la fase principal de la tormenta estarían relacionadas con un campo eléctrico de penetración rápida. Sin embargo, este campo eléctrico parece no afectar la ionosfera sobre Cachoeira Paulista. Modelos estadísticos (Fejer and Scherliess, 1995, 1997) apoyan esta suposición, ya que las derivas iónicas verticales ecuatoriales están asociadas con campos eléctricos de penetración muy variables cuya fuerza y dirección dependen de la hora local. Cuando el IMF está orientado hacia el sur, la deriva iónica vertical es hacia arriba durante el día y hacia abajo durante la noche.

El comportamiento posterior del PPEF indica que éste no habría influido en las perturbaciones de la ionosfera observadas posteriormente. Esto se puede ver en la Figura 4, que muestra derivas de plasma verticales promediadas cada cinco minutos a 155 km de altura, medidas en Jicamarca del 19-22 de diciembre de 2015, con el instrumento JULIA. Los valores del 3 de diciembre de 2015 ($\Sigma k_p = 7-$; q_2) fueron tomados como referencia. Desafortunadamente, no existen mediciones de deriva vertical a la medianoche local, lo que permitiría verificar el efecto del campo eléctrico en la región F2. Mediciones entre 13 UT y 21 UT (10 LT - 16 LT) muestran incrementos significativos en la deriva vertical ascendente de los valores disponibles del 20 de diciembre y en menor medida del 19 de diciembre, lo que podría atribuirse a las pequeñas perturbaciones en PPEF observadas estas días. Los días 21 y 22 de diciembre de 2015 se observaron valores similares a los de referencia.

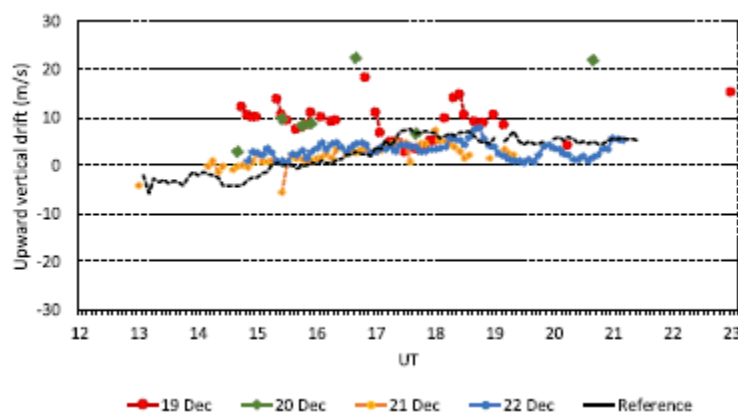


Figura 4. Derivas verticales promediadas a 155 km de altura medidos sobre Jicamarca con instrumento JULIA del 19 al 22 de diciembre de 2015. (Mansilla and Zossi, 2019).

Se conoce que los efectos negativos de las tormentas están bien correlacionados con los cambios en la composición del gas neutro (disminución de la relación O / N_2) en latitudes altas, medias y bajas, durante una tormenta geomagnética (Prölss, 1980, 1995; Danilov, 2013). Un cambio a gran escala en la circulación termosférica es causado por el calentamiento en la región de latitudes altas, lo que produce un descenso de las especies neutras a través de superficies de presión constante en latitudes medias y bajas de la región F, esto es, una zona de perturbación de la composición, aumentando así la densidad de O en relación con N_2 y O_2 (Fuller-Rowell et al., 1997; Buonsanto, 1999; Ngwira et al., 2012). Los efectos positivos de la tormenta que ocurrieron varias horas después del inicio de la tormenta también se han atribuido a aumentos en la relación O / N_2 , que se producen por aumentos en la densidad de oxígeno atómico y el consiguiente aumento en la relación O / N_2 (Prölss, 1995). La Figura 5 muestra las variaciones en la relación O / N_2 de la medición GUVI durante 19-22 de diciembre de 2015. En comparación con el 19 de diciembre, se puede ver el 20 de diciembre que hubo un incremento en la relación O / N_2 en latitudes ecuatoriales y bajas. Esto posiblemente contribuya, junto con la perturbación del campo eléctrico, a los efectos positivos que se observan durante la fase principal y primera parte de la recuperación. Los menores valores de la relación O / N_2 en latitudes cercanas a Cachoeira Paulista podrían ser una de las razones de la asimetría norte-sur del EIA durante la fase principal y de los efectos negativos sobre esta estación durante la fase de recuperación de la tormenta. Este efecto negativo de tormenta se debe posiblemente a que en verano coinciden las circulaciones de fondo y las inducidas por la tormenta (ambas hacia el ecuador), lo que favorece la llegada de gas neutro con la relación O / N_2 incrementada a latitudes bajas (Danilov, 2001; 2013). El 21 de diciembre, la relación O / N_2 se mantuvo alta en comparación con el 19 de diciembre, lo que explicaría los efectos positivos de la tormenta este día.

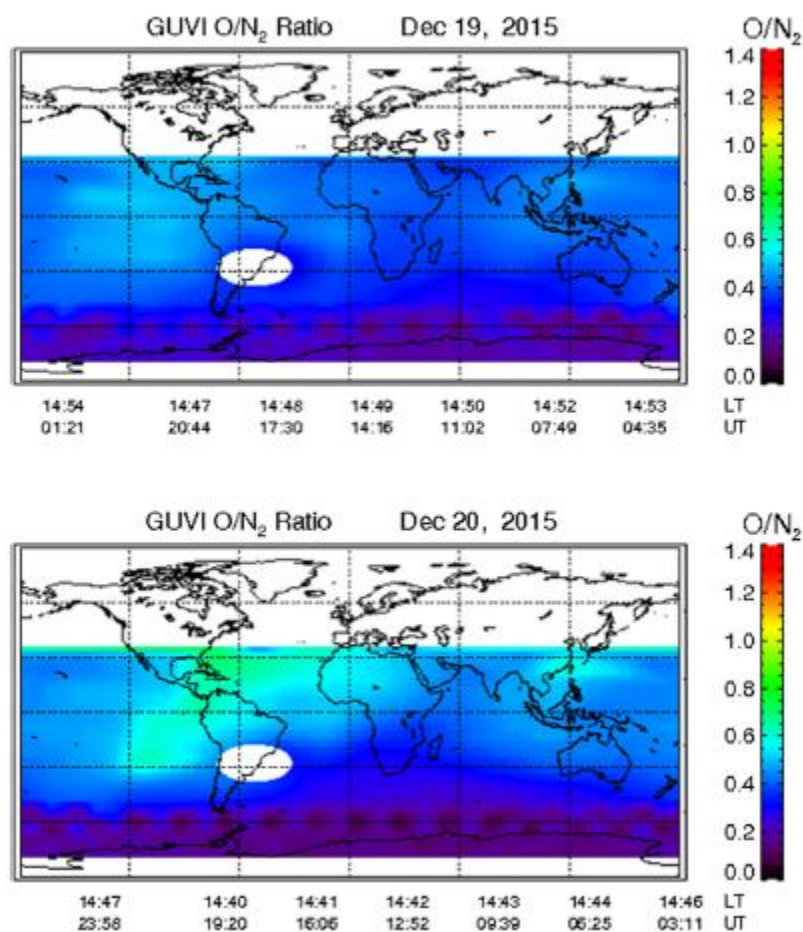


Figura 5. Mapas con la relación O / N2 termosférico derivado de TIMED / GUVI durante el 19-22 de diciembre de 2015. (Mansilla and Zossi, 2019).

Concluyendo, del análisis de los efectos ionosférico-termosférico sobre estaciones ecuatoriales y de baja latitud del sector sudamericano, se surge que una rápida penetración de campos eléctricos magnetosféricos de polaridad hacia el oeste durante la noche parece ser la causa más probable de que la altura de la capa F2 disminuya inicialmente durante la fase principal. Para la excursión negativa de la componente Bz del campo magnético interplanetario que se produjo alrededor de las 04 UT del 20 de diciembre, existe una fuerte evidencia de la penetración de un campo eléctrico hacia el oeste en latitudes bajas y ecuatoriales. El efecto de este campo eléctrico es disminuir la densidad máxima de electrones de la capa F2 en latitudes ecuatoriales y bajas. Al mismo tiempo, la altura del pico F2 desciende en latitudes bajas pero aumenta sobre latitudes ecuatoriales. La cresta sur de la anomalía de ionización ecuatorial no se vio afectada significativamente por el PPEF. Las variaciones de plasma verticales ascendentes significativas en latitudes ecuatoriales parecen ser la causa más probable de los efectos positivos de la tormenta que reemplazaron los efectos negativos iniciales de la tormenta durante el desarrollo de la fase principal. Los cambios en la relación O / N2 (aumentos o disminuciones) pueden ser los principales responsables de los efectos positivos y negativos observados durante la fase de recuperación de la tormenta.

b) Estratósfera

Crutzen et al. (1975) observaron que la inyección de grandes cantidades de protones en la atmósfera media durante los eventos de protones solares (SPE) conducía a una intensa producción de nitrógeno atómico. Brausser and Solomon (2005) indicaron que la presencia de $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$ y compuestos nitrogenados relacionados como el ácido nítrico (HNO_3) en la atmósfera media, resultan de la oxidación del óxido nitroso (N_2O) y de la ionización del nitrógeno molecular (N_2) por partículas solares de alta energía. Además, gran parte de la energía transportada por los protones solares podría afectar la atmósfera media dando lugar a interacciones atmosféricas que incrementarían la producción de constituyentes de NO_x , lo que puede provocar variaciones en el contenido de ozono (Solomon et al., 1982; Jackman, 1991; Jackman et al., 1995; 2014). Las partículas solares energéticas (protones, con energías entre 1 MeV y unos pocos cientos de MeV; y electrones, con energías entre decenas de keV y unos pocos MeV) son una fuente importante de ionización para la mesosfera y la estratosfera superior (Turunen et al., 2009; Rozanov et al, 2012; Sepällä et al, 2014). Durante las SPE, la precipitación de partículas en la atmósfera puede producir una disminución del ozono con un aumento de NO_2 en latitudes $\geq 45^\circ$ en la estratosfera superior (Sepällä, 2004, 2006; López-Puertas et al., 2005). Von Clarmann et al. (2013) observaron una respuesta inmediata de NO_x a las SPEs que ocurrieron durante los primeros meses de 2012. Luego de que ocurriera una SPE en marzo de 2012, se observó un aumento de NO_x entre los 47 km y 66 km de altura en el hemisferio sur en latitudes superiores a 60° y sin subsidencia del aire. Los aumentos de NO_x podrían atribuirse a la producción "in situ" por parte de la SPE. Zossi et al. (2016) detectaron aumentos en las anomalías de la columna total de ozono en estaciones ubicadas entre los 70° y 75° S después de la ocurrencia de dos tormentas geomagnéticas. Ese comportamiento podría explicarse a través de efectos dinámicos.

Laštovička y coautores analizaron los efectos de tormentas geomagnéticas sobre el ozono total en latitudes medias; encontrando solo efectos estadísticamente significativos en el círculo de latitud 50° N, para tormentas fuertes (índice $\text{Ap} > 60$), en invierno y durante la fase E de QBO. Los efectos observados podrían deberse a la redistribución del ozono causada por cambios en la dinámica atmosférica relacionados con las tormentas (Laštovička and Mich 1999; 2005; 2009).

El bajo campo magnético en la zona de la Anomalía Magnética del Atlántico Sur (SAA) facilita la entrada de partículas con alta energía desde la magnetosfera (Pinto and González, 1989a; Pinto et al., 1992; Selesnick et al., 2003; Hartmann and Pacca, 2009). La SAA ocupa una importante región de América del Sur y del Sur del Océano Atlántico. La dispersión del ángulo de inclinación y las perturbaciones magnéticas en tiempo de tormenta, entre otros mecanismos magnetosféricos, pueden provocar un aumento de la precipitación de partículas en la zona SAA (Abdu et al., 1981; Abel and Thorne, 1999). Además, la interacción onda-partícula puede conducir a un aumento del cono de pérdida de las partículas a la deriva y con otros procesos producir la pérdida de partículas del cinturón de radiación interno en la zona SAA (Abdu et al, 2005). Las partículas que se desplazan en órbitas cerradas alrededor de la Tierra, cuando alcanzan la zona SAA, pueden quedar casi atrapadas en lugar de quedar atrapadas de forma estable o precipitarse. Las partículas que están casi atrapadas tienen ángulos de inclinación fuera del SAA, no están en el cono de pérdida local, pero sus ángulos de inclinación son lo suficientemente pequeños como para precipitarse cuando entran en la región de SAA. Se dice que estas partículas están en el cono de pérdida de deriva, que es el cono de máxima pérdida local dentro de la región SAA. (Asikainen and Mursula, 2005). Asikainen and Mursula (2008) estudiaron el comportamiento de las partículas de los cinturones de radiación con energías entre 30 keV y 2,5 MeV, y en escalas de tiempo más largas dentro del SAA en diferentes horas locales.

Abel and Thorne (1999) modelaron la precipitación de electrones energéticos en la atmósfera de la Tierra desde el cinturón de radiación interno ($L \leq 2$). Descubrieron que estos flujos de precipitación están correlacionados con las variaciones del tamaño del cono de pérdida en el área de SAA; y podría ser una fuente importante de ionización mesosférica cerca de la zona mencionada.

En Zossi et al. (2021) se analizaron los posibles efectos de la precipitación de protones energéticos en la región SAA durante y después de la ocurrencia de dos intensas tormentas geomagnéticas ocurridas en noviembre de 2003 y noviembre de 2004. Consideramos un rectángulo ubicado entre 5 y 40 grados de latitud sur y entre -45 y -60 grados de longitud este, incluidos en la región SAA. Los dos períodos de intensas tormentas geomagnéticas analizados en Zossi et al. (2021), ocurrieron el 20 de noviembre de 2003 y el 8 de noviembre de 2004, durante la primavera en el Hemisferio Sur. Las características de las tormentas geomagnéticas: índice geomagnético, Dst; los parámetros del campo magnético interplanetario, IMF, y datos de viento solar, se usaron datos horarios de OMNI a 1AU (ftp://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low_res_omni/). Por su lado, los datos de protones fueron los medidos por instrumentos MEPED (detector de electrones de protones de energía media) a bordo de los satélites NOAA-15 y NOAA-16 en órbita polar, canal mep0p2: MEPED-0 protones de 80 keV a 240 keV, en recuentos/segundo (http://www.ngdc.noaa.gov/stp/sa_satellite/poes). Finalmente, con el fin de analizar los posibles efectos sobre la zona SAA, se hizo uso de: datos diarios de ozono, en unidades Dobson (DU), registrados por TOMS (<https://science.nasa.gov/missions/TOMS>), y SBUV Merged Ozone Data (<https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/anonftp/toms/sbuV/AGGREGATED/>).

Para el análisis de los efectos en la columna de ozono total durante las tormentas geomagnéticas, se utilizó el índice TCOR, que da la desviación relativa del ozono de la columna total diaria, TCO, de su comportamiento durante los días tranquilos, y se define como:

$$TCOR = \frac{TCO - TCOQ}{TCOQ}$$

donde TCOQ, es el promedio de la columna de ozono total de cinco días geomagnéticos tranquilos del mes de cada tormenta geomagnética (Zossi et al, 2016).

Se consideraron las siguientes tres estaciones ubicadas en la región SAA: Bauru, São Paulo y Cachoeira Paulista. Todas ellas están localizadas en el área del rectángulo elegida para el análisis. Sus coordenadas geográficas y geomagnéticas para el año 2005 (Servicio de Datos Geomagnéticos, Universidad de Kyoto, <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/gggm/index.html>) se listan en la Tabla I.

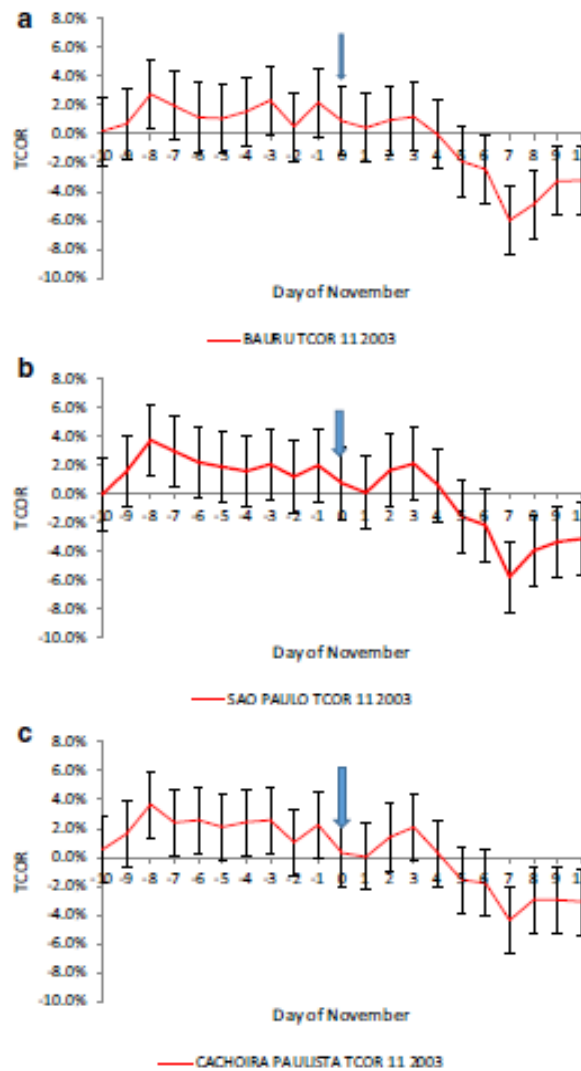
Tabla I. Coordenadas geográficas y geomagnéticas para 2005 de las estaciones ubicadas en la región SAA elegidas para el análisis. (Zossi et al, 2021).

Stations	Geog. lat.	Geog. long.	2005	
			Geom. lat.	Geom. long.
Bauru	-22.33	-49.05	12.37	21.61
Sao Paulo	-23.56	-46.74	13.57	24.37
Cachoeira Paulista	-22.68	-45	12.66	25.4

Se calcularon los TCOR, con datos registrados por TOMS, para cada estación desde diez días antes de la fase principal de la tormenta hasta diez días después de la ocurrencia del valor mínimo del índice Dst. El día del valor mínimo del índice Dst se indica en el eje de abscisas con 0; con -1 a -10, los diez días anteriores; y del 1 al 10 los diez días siguientes.

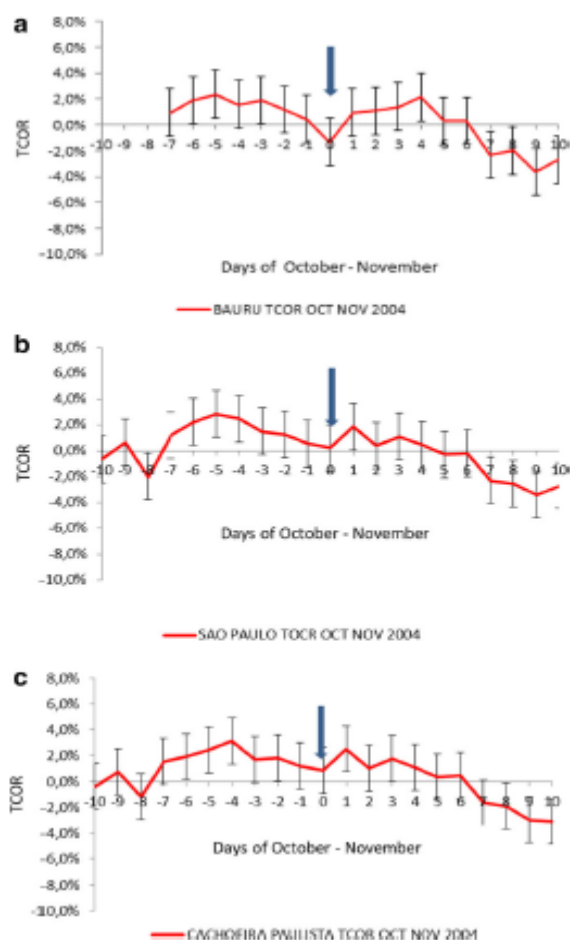
Las Figuras 6 a-c muestran los valores de TCOR del 10 al 30 de noviembre de 2003 para las estaciones de Bauru, São Paulo y Cachoeira Paulista, respectivamente. En cada figura se indican barras de error de un σ (desviación estándar).

Sobre Bauru se observan valores positivos no significativos de TCOR el día del valor mínimo del índice Dst y durante los 10 días anteriores; estos valores son del orden del 2,0%. São Paulo y Cachoeira Paulista, en general, muestran comportamientos similares a Bauru, excepto por incrementos significativos (alrededor del 4%) 8 días antes del valor mínimo de Dst (el 12 de noviembre). Estos aumentos no se pueden explicar por la perturbación estudiada. El 27 de noviembre (día + 4) TCOR comienza a tomar valores negativos, alcanzando valores estadísticamente significativos en las tres estaciones analizadas el día +7 (~ 4,4% a 6,0%).



Figuras 6 a-c. Valores TCOR entre el 10 y el 30 de noviembre de 2003, para las estaciones de Bauru, São Paulo y Cachoeira Paulista, respectivamente. Se indican las barras de error. (Zossi et al, 2021).

Las Figuras 7 a-c muestran los valores de TCOR del 29 de octubre al 18 de noviembre de 2004 para las estaciones de Bauru, São Paulo y Cachoeira Paulista, respectivamente. En cada figura se indican barras de error de un σ . Las figuras muestran, en general, una oscilación cuasiperiódica en los valores de TOCR. En las tres estaciones, TOCR tiene un aumento en los días -4 y -5 antes del valor mínimo del índice Dst, y un mínimo que se observa alrededor del día -8 solo en São Paulo y Cachoeira Paulista, ya que Bauru no tiene datos ese día. Siete días después del valor mínimo del índice Dst, el 15 de noviembre, se observan disminuciones estadísticamente significativas del orden de 4.0% en todas las estaciones analizadas. Estos valores se mantienen hasta el día 10.



Figuras 7 a-c. Valores TCOR entre el 29 de octubre y el 18 de noviembre de 2004, para las estaciones de Bauru, São Paulo y Cachoeira Paulista, respectivamente. Se indican las barras de error. (Zossi et al, 2021).

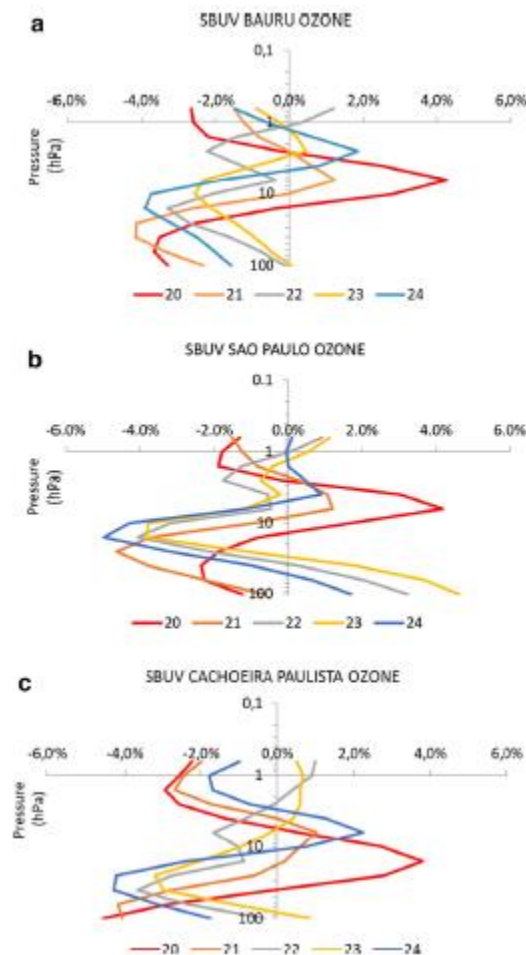
Para analizar los efectos sobre los perfiles de ozono medidos por SBUV, entre 0,639 hPa (~ 53,3 km) y 101,3 hPa (~ 15,8 km), se calculó para cada altura, la diferencia relativa con respecto a su comportamiento en el día geomagnéticamente tranquilo, elegido para cada tormenta (Tabla II)

Tabla II. Días geomagnéticamente tranquilos utilizados para el análisis de los efectos durante los períodos de las tormentas de 2003 y 2004. (Zossi et al, 2021).

	Q days used November 20, 2003 storm	Q days used November 08, 2004 storm
TOMS	05-08-07-19/Nov/2003	02-05-06-15-18/Nov/ 2004
SBUV	19/Nov/2003	23/Nov/2004
UARS-	19/Nov/2003	23/Nov/2004
HALOE		

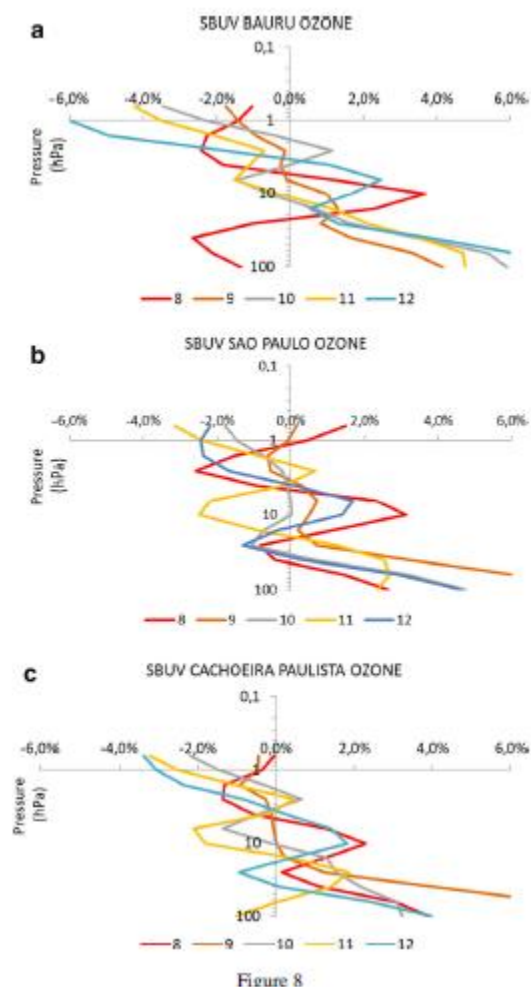
Las Figuras 8 a-c muestran los perfiles de la diferencia relativa de ozono entre 0,639 hPa y 101,3 hPa, para las estaciones Bauru, São Paulo y Cachoeira Paulista respectivamente del 20 al 24 de noviembre de 2003, (línea roja para el día 20, línea marrón para el día 21, línea gris para el día 22, línea naranja para el día 23 y línea azul claro para el día 24). Los perfiles de ozono muestran un comportamiento similar en la forma de su variación, pero se diferencian en las alturas en las que se presentan los máximos de los aumentos y disminuciones. Solo se observan incrementos significativos el 20 de noviembre, día del valor mínimo del índice Dst, a diferentes alturas de la

estratosfera media, en todas las estaciones analizadas: en Bauru y São Paulo a 6,4 hPa (36,3 km); y en Cachoeira Paulista a 10,1 hPa (32,9 km). También se observan aumentos en São Paulo los días 22, 23 y 24 de noviembre en la estratosfera inferior. Todos los días analizados se observan disminuciones en la diferencia relativa de ozono, en la estratosfera superior y en la parte baja y baja de la estratosfera media y disminuciones significativas en la estratosfera inferior. Por ejemplo, para Bauru, la disminución mínima, del 4,1%, se observa el día 21, a 40 hPa (22,7 km); mientras que para São Paulo, del 5,0%, el día 24 a 16,1hPa (29,4 km); Cachoeira Paulista muestra el valor mínimo del orden del 4.0% todos los días en la estratosfera inferior.



Figuras 8 a-c. Perfiles de diferencia relativa de ozono del 20 al 24 de noviembre de 2003, para alturas entre 0,639 y 101,3 hPa, para las estaciones de Bauru, São Paulo y Cachoeira Paulista, respectivamente. Línea roja para el día 20, línea marrón para el día 21, línea gris para el día 22, línea naranja para el día 23 y línea azul claro para el día 24 (Zossi et al, 2021).

Las figuras 9 a-c muestran los perfiles de la diferencia relativa de ozono entre 0,639 y 101,3 hPa, para las estaciones Bauru, São Paulo y Cachoeira Paulista respectivamente del 08 al 12 de noviembre de 2004 (línea roja para el día 8, línea marrón para el día 9, línea gris para el día 10, línea naranja para el día 11 y línea azul claro para el día 12). Las figuras no muestran incrementos significativos, en los días 8 y 12, a las mismas alturas de la estratosfera media; e incrementos significativos, con valores entre 3,0% y 6,0%, todos los días en la estratosfera inferior. Se observan disminuciones en los perfiles de los valores de ozono en la estratosfera superior todos los días y en las tres estaciones consideradas. Un descenso significativo, entre el 4,0% y el 6,0%, los días 11 y 12, muestra la estación de Bauru. Además, se observan disminuciones significativas, entre 4.0% y 6.0%, en Bauru los días 11 y 12 a ~ 1hPa.



Figuras 9 a-c. Perfiles de diferencia relativa de ozono del 08 al 12 de noviembre de 2004, para alturas entre 0,639 y 101,3 hPa, para las estaciones de Bauru, São Paulo y Cachoeira Paulista, respectivamente. Línea roja para el día 20, línea marrón para el día 21, línea gris para el día 22, línea naranja para el día 23 y línea azul claro para el día 24 (Zossi et al, 2021).

Resumiendo, los valores de TCOR muestran disminuciones estadísticamente significativas entre 7 y 10 días después de la ocurrencia de las intensas tormentas primaverales. Esto podría estar asociado con la precipitación de protones en la zona SAA desde el cinturón interno de radiación de Van Allen. Existe evidencia de que el anillo de radiación interna exhibe una disminución aguda durante los períodos de tormentas geomagnéticas que siguen con una recuperación prolongada (Zou et al., 2011); el día del Dst mínimo, la diferencia relativa de los perfiles de ozono, de los datos de SBUV, indica incrementos en la estratosfera media durante ambas tormentas. Se observan disminuciones significativas todos los días analizados en la estratosfera superior, pero en la estratosfera inferior los efectos son diferentes para cada tormenta.

Es necesario incrementar las estadísticas de períodos perturbados, analizar los posibles efectos sobre otros trazadores estratosféricos y estudiar cómo la dinámica tropical podría afectar los efectos observados.

REFERENCIAS

- Abdu, M. A., Batista, I. S., Piazza, L. R., Massabani, O., 1981. Magnetic storm associated enhanced particle precipitation in the South Atlantic anomaly: Evidence from VLF phase measurements, *J. Geophys. Res.* 86, 7533–7542.
- Abdu, M.A., Batista, I.S., Carrasco, A.J., Brum, C.G.M., 2005. South Atlantic magnetic anomaly ionization: A review and a new focus on electrodynamic effects in the equatorial ionosphere, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 67, 1643–1657.
- Abel, B., Thorne, R. M., 1999. Modeling energetic electron precipitation near the South Atlantic anomaly, *J. Geophys. Res.*, 104, 7037–7044.
- Asikainen, T., Mursula, K., 2005. Filling the South Atlantic anomaly by energetic electrons during a great magnetic storm, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L16102, doi:10.1029/2005GL023634.
- Asikainen, T., Mursula, K., 2008. Energetic electron count rates behaviour at low L-shells and its relation to the South Atlantic Anomaly, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 70 (2008) 532–538. doi:10.1016/j.jastp.2007.08.061
- Astafyeva, E., Zakharenkova, I., Hozumi, K., Alken, P., Coïsson, P., Hairston, M.R., Coley, W.R., 2018. Study of the equatorial and low latitude electrodynamic and ionospheric disturbances during the 22–23 June 2015 geomagnetic storm using ground-based and spaceborne techniques. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 123, 2424–2440. <https://doi.org/10.1002/2017JA024981>.
- Akasofu, S.I. (1998). *Aurora. From the Sun, Auroras, magnetic Storms, Solar Flares, Cosmic Rays.* Suess, S., Tsurutani, B. (Ed.). American Geophysical Union. 1, 11.
- Baker, D. N., Mason, G. M., and Mazur, J. E., 2012. A small spacecraft mission with large accomplishments. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 93(34):325-326.
- Barthia, P. K., McPeters, R. D., Mateer, C. L., Flynn, L. E., Wellemeyer, C., 1996. Algorithm of the estimation of vertical ozone profiles from backscattered ultraviolet technique, *J. Geophys. Res.*, 101, N- D13, 18793-18806.
- Buonsanto, M.J., 1999. Ionospheric storms—a review. *Space Sci. Rev.* 88, 563–601. <https://doi.org/10.1023/A:1005107532631>
- Brasseur, G. P., Solomon, S., 2005. *Aeronomy of the Middle Atmosphere: Chemistry and Physics of the Stratosphere and Mesosphere*, Springer, Third revised and enlarged edition, Netherlands.
- Callis, L. B., Boughner, R. E., Baker, D. N., Mewaldt, R. A., Bernard Blake, J., Selesnick, R. S., Cummings, J. R., Natarajan, M., Mason, G. M., and Mazur, J. E., 1996. Precipitating electrons: Evidence for effects on mesospheric odd nitrogen. *Geophysical research letters*, 23(15):1901-1904.
- Callis, L. B., Natarajan, M., Evans, D. S., and Lambeth, J. D., 1998a. Solar atmospheric coupling by electrons (SOLACE): 1. Effects of the May 12, 1997 solar event on the middle atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D21):28405-28419.
- Callis, L. B., Natarajan, M., Lambeth, J. D., and Baker, D. N., 1998b. Solar atmospheric coupling by electrons (SOLACE): 2. Calculated stratospheric effects of precipitating electrons, 1979-1988. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D21):28421-28438.
- Crutzen, P. J., Isaksen, I. S. A., Reid, G. C., 1975. Solar proton events: Stratospheric sources of nitric oxide, *Science*, 189, 457–458.

- Danilov, A.D., 2001. F2-region response to geomagnetic disturbances. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 63, 441–449. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(00\)00175-9](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00175-9).
- Danilov, A.D., 2013. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances. *Adv. Space Res.* 52, 343–366. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.04.019>.
- Fejer, B.G., Scherliess, L., 1995. Time dependent response of equatorial ionospheric electric fields to magnetospheric disturbances. *Geophys. Res. Lett.* 22 (7), 851–854. <https://doi.org/10.1029/95GL00390>.
- Fejer, B.G., Scherliess, L., 1997. Empirical models of storm time equatorial zonal electric fields 24,047–24,056. *J. Geophys. Res.* 102 (A11). <https://doi.org/10.1029/97JA02164>.
- Fuller-Rowell, T.J., Codrescu, M., Forbes, J.M., 1997. Neutral density specification using first principle models: semi-annual variations and storms. *Adv. Astronaut. Sci.* 97, 565–581.
- Hargreaves, J. K., 1992. *The solar-terrestrial environment: an introduction to geospace the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere, and magnetosphere.* Cambridge University Press.
- Hartmann, G. A., Pacca, I. G., 2009. Time evolution of the South Atlantic Magnetic Anomaly, *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, 81(2): 243-255.
- Jackman, C., Frederick, J., and Stolarski, R., 1980. Production of odd nitrogen in the stratosphere and mesosphere: An intercomparison of source strengths. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 85(C12):7495-7505.
- Jackman, Ch. H., 1991. Effects of Energetic Particles on Minor Constituents of the Middle Atmosphere, *J. Geomag. Geoelectr.*, 43, Suppl., 637-646.
- Jackman, C. H., Cerniglia, M. C., Nielsen, J. E., Allen, D. J., Zawodny, J. M., McPeters, R. D., Douglass, A. R., Rosenfield, J. E., and Rood, R. B., 1995. Two-dimensional and three-dimensional model simulations, measurements, and interpretation of the influence of the October 1989 solar proton events on the middle atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 100(D6):11641-11660.
- Jackman, C. H., McPeters, R. D., Labow, G. J., Fleming, E. L., Praderas, C. J., and Russell, J. M., 2001. Northern Hemisphere atmospheric effects due to the July 2000 solar proton event. *Geophysical Research Letters*, 28(15):2883-2886.
- Jackman, C. H., DeLand, M. T., Labow, G. J., Fleming, E. L., Weisenstein, D. K., Ko, M. K., Sinnhuber, M., and Russell, J. M., 2005. Neutral atmospheric influences of the solar proton events in October-November 2003. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 110(A9).
- Jackman, C. H., Roble, R. G., and Fleming, E. L., 2007. Mesospheric dynamical changes induced by the solar proton events in OctoberNovember 2003. *Geophysical Research Letters*, 34(4).
- Jackman, C.H., Randall, C.E., Harvey, V.L., Wang, S., Fleming, E.L., Lopez-Puertas, M., Funke, B., Bernath, P. F., 2014. Middle atmospheric changes caused by the January and March 2012 solar proton events, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 1025–1038. doi:10.5194/acp-14-1025-2014
- Lastovicka, J, & Mich, P., 1999. Is ozone affected by geomagnetic storms? *Adv. Space Res.*, 24 (5), 631-640.
- Lastovicka, J, & Krizan, P., 2005. 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.

- Lastovicka, J, & Krizan, P., 2009. Impact of strong geomagnetic storms on total ozone at southern higher middle latitudes *Stud, Geophys, Geod.*, 53, 151–156.
- Lopez-Puertas, M., Funke, B., Gil-Lopez, S., von Clarmann, T., Stiller, G. P., Hopfner, M., Kellmann, S., Fischer, H., Jackman, C. H., 2005. 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.*, 110, A09S43, doi:10.1029/2005JA011050.
- Kivelson, M. G. and Russell, C.T., 1995. *Introduction to space physics*. Cambridge University Press.
- Mansilla, G. A. and Zossi, M. M. , 2019. Effects on the equatorial and low latitude thermosphere and ionosphere during the 19–22 December 2015 geomagnetic storm period, *Advances in Space Research*, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.09.025>
- Mikhailov, A.V., Leschinskaya, T.Yu, 1991. On the mechanism of day time F2-layer negative disturbances at the geomagnetic equator. *Geomag. Aeron.* 31, 1027–1031.
- Mironova, I. A., Aplin, K. L., Arnold, F., Bazilevskaya, G. A., Harrison, R. G., Krivolutsky, A. A., Nicoll, K. A., Rozanov, E. V., Turunen, E., and Usoskin, I. G., 2015. Energetic particle influence on the Earth's atmosphere. *Space Science Reviews*, 194(1):1-96.
- Ngwira, C.M., Lee-Anne McKinnell, P.J., Cilliers, Coster, A.J., 2012. Ionospheric observations during the geomagnetic storm events on 24–27 July 2004: Long-duration positive storm effects. *J. Geophys. Res.* 117, A00L02. <https://doi.org/10.1029/2011JA016990>.
- Prölss, G.W., 1980. Magnetic storm associated perturbations of the upper atmosphere: recent results obtained by satellite-borne gas analyzers. *Rev. Geophys. Space Phys.* 18, 183–202. <https://doi.org/10.1029/RG018i001p00183>.
- Prölss, G.W., 1995. Ionospheric F-region storms. *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*, vol. 2. CRC Press, Boca Raton, pp. 195–248.
- Randall, C., Rusch, D., Bevilacqua, R., Hoppel, K., and Lumpe, J., 1998. Polar ozone and aerosol measurement (POAM) II stratospheric NO₂, 1993/1996. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D21):28361-28371.
- Randall, C., Siskind, D., and Bevilacqua, R., 2001. Stratospheric NO_x enhancements in the southern hemisphere vortex in winter/spring of 2000. *Geophysical Research Letters*, 28(12):2385-2388.
- Rawat, R., Echer, E., Gonzalez, W.D. , 2018. How different are the solar wind-interplanetary conditions and the consequent geomagnetic activity during the ascending and early descending phases of the solar cycles 23 and 24?. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 123, 6621–6638. <https://doi.org/10.1029/2018JA025683>.
- Rinsland, C., Gunson, M., Salawitch, R., Newchurch, M., Zander, R., Abbas, M., Abrams, M., Manney, G., Michelsen, H., Chang, A., 1996. ATMOS measurements of H₂O + 2CH₄ and total reactive nitrogen in the November 1994 Antarctic stratosphere: Dehydration and denitrification in the vortex. *Geophysical research letters*, 23(17):2397-2400.
- Rishbeth, H., Garriott, O.K., 1969. *Introduction to Ionospheric Physics*. Academic press, New York and London.
- Rohen, G., Von Savigny, C., Sinnhuber, M., Llewellyn, E., Kaiser, J., Jackman, C., Kallenrode, M.-B., Schröter, J., Eichmann, K.-U., Bovensmann, H., 2005. Ozone depletion during the solar proton events of October/November 2003 as seen by SCIAMACHY. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 110(A9).

- Rozanov, E., Callis, L., Schlesinger, M., Yang, F., Andronova, N., and Zubov, V., 2005). Atmospheric response to NO_y source due to energetic electron precipitation. *Geophysical Research Letters*, 32(14).
- Rozanov, E., Calisto, M., Egorova, T., Peter, T., and Schmutz, W., 2012. Influence of the precipitating energetic particles on atmospheric chemistry and climate. *Surveys in geophysics*, 33(3-4):483-501.
- Russell III, J. M., Solomon, S., Gordley, L. L., Remsberg, E. E., and Callis, L. B., 1984. The variability of stratospheric and mesospheric NO₂ in the polar winter night observed by LIMS. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 89(D5):7267-7275.
- Seppälä, A., 2007. Observations of production and transport of NO_x formed by energetic particle precipitation in the polar night atmosphere. PhD thesis, Faculty of Science of the University of Helsinki
- Seppälä, A., Matthes, K., Randall, C. E., Mironova, I. A., 2014. What is the solar influence on climate? Overview of activities during CAWSES-II. *Progress in Earth and Planetary Science Springer Open Journal*, 1:24.
- Siskind, D. E., 2000. On the coupling between middle and upper atmospheric odd nitrogen. *Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, 123:101-116.
- Siskind, D. E., Bacmeister, J., Summers, M., and Russell III, J., 1997. Two-dimensional model calculations of nitric oxide transport in the middle atmosphere and comparison with Halogen Occultation Experiment data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 02(D3):3527-3545.
- Solomon, S., Crutzen, P. J., and Roble, R. G., 1982. Photochemical coupling between the thermosphere and the lower atmosphere: I. Odd nitrogen from 50 to 120 km. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 87(C9):7206-7220.
- McPeters, R. D., P. K. Bhartia, Arlin J. Krueger, and Jay R. Herman. 1998. Earth Probe Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS), Data Products User's Guide, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, NASA Reference Publication.
- Pinto Jr O., Gonzalez W. D., 1989a. Energetic electron precipitation at the South Atlantic Magnetic Anomaly: a review. *J Atmos Solar-Terr Phys* 51(5):351–365.
- Pinto Jr O., Gonzalez W. D., Gonzalez, A.L.C.1989b. Time Variations of X ray fluxes at the South Atlantic Magnetic Anomaly in association with a strong geomagnetic storm. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 94, N. A12, pages 17,275-17,280.
- Pinto Jr O., Gonzalez, W. D., Pinto, I. R. C. A., Gonzalez, A. C., Mendes Jr, O., 1992. The South Atlantic Magnetic Anomaly: three decades of research. *J Atmos Solar-Terr Phys* 54:1129–1134.
- Rozanov, E, Calisto, M., Egorova, T., Peter, T., Schmutz, W., 2012. Influence of the precipitating energetic particles on atmospheric chemistry and climate. *Surv. Geophys.* 33, 483–501, doi:10.1007/s10712012-9192-0. DOI 10.1007/s10712-012-9192-0
- Selesnick, R.S., Blake, J.B., Mewaldt, R.A., 2003. Atmospheric losses of radiation belt electrons. *Journal of Geophysical Research* 108 (A12), 1468.
- Sepällä, A., Verronen, P. T., Kyrola, E., Hassinen, S., Backman, L., Hauchecorne, A., Bertaux, J. L., Fussen, D., 2004. Solar proton events of October-November 2003: Ozone depletion in the Northern Hemisphere polar winter as seen by GOMOS/Envisat, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L19107, doi:10.1029/2004GL021042.

- Sepälä, A., Verronen, P. T., Sofieva, V. F., Tamminen, J., Kyrola, E., Rodger, C. J., Clilverd, M. A., 2006. Destruction of the tertiary ozone maximum during a solar proton event, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L07804, doi:10.1029/2005GL025571.
- Seppälä, A., Matthes, K., Randall, C. E., Mironova, I. A., 2014. What is the solar influence on climate? Overview of activities during CAWSES-II. *Progress in Earth and Planetary Science Springer Open Journal*, 1:24.
- Solomon, S., Crutzen, P. J., Roble, R. G., 1982. Photochemical coupling between the thermosphere and the lower atmosphere 1. Odd nitrogen from 50 to 120 km, *J. Geophys. Res.*, 87, 7206–7220.
- Turunen, E., Verronen, P. T., Seppälä, A., Rodger, C. J., Clilverd, M. A., Tamminen, J., Enell C. F., Ulich, Th., 2009. Impact of different energies of precipitating particles on NO_x generation in the middle and upper atmosphere during geomagnetic storms, *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.*, 71, pp. 1176-1189, doi:10.1016/j.jastp.2008.07.005.
- Von Clarman, T., Funke, B., Lopez-Puertas, M., Kellmann, S., Linden, A., Stiller, G. P., Jackman, C. H., Harvey, V. L., 2013. The solar proton events in 2012 as observed by MIPAS, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 2339–2343, doi:10.1002/grl.50119.
- Zossi, M. M. and Fernandez, P. (2010), Trends in Total Ozone and the effect of the Equatorial Zonal Wind QBO, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 72, 565-569.
- Zossi de Artigas, M., Zotto, E.M., Mansilla, G.A. Fernandez de Campra, P., 2016: Effects of energetic particles precipitation on stratospheric ozone in the Southern Hemisphere. *Adv. Space Res.* 58, 2080-2089. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2016.02.019>
- Zou, H., Zong, Q. G., Parks, G. K., Pu, Z. Y., Chen, H. F., and Xie, L., 2011: Response of high-energy protons of the inner radiation belt to large magnetic storms, *J. Geophys. Res.*, 116, A10229, doi:10.1029/2011JA016733.
- Zossi, M.M., Zotto, E.M., and Mansilla, G.A, 2021: Can Geomagnetic Storms Affect Stratospheric O₃ and NO_x in the South Atlantic Anomaly Zone? *Pure and Applied Geophysics*, 178(1), pp. 141–154.