

# COMPORTAMIENTO DE LA CAPA F2 DE LA IONOSFERA COMO RESULTADO DE LAS INTERACCIONES DEL SISTEMA DINAMICO VIENTO SOLAR-MAGNETOSFERA-IONOSFERA

Alexander Calzadilla<sup>1</sup>, Sandro M. Radicella<sup>2</sup>, Bienvenido Lazo<sup>1</sup> y Katy Alazo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Geofísica y Astronomía, CITMA

<sup>2</sup>Aeronomy and Radiopropagation Laboratory, "Abdus Salam" International Centre for Theoretical Physics

## RESUMEN

Se estudia la incidencia sobre la ionosfera del sector americano de dos tormentas geomagnéticas de diferente grado de intensidad, analizándose algunos parámetros físicos del viento solar, la frecuencia crítica de la capa F2 (foF2) medidas en estaciones de sondeo ionosférico del sector, así como los perfiles de concentración electrónica obtenidos del sondeo del satélite Intercosmos-19 y la respuesta de la magnetosfera a la perturbación mediante el índice geomagnético Dst. Se analiza la entrega de energía del viento solar a la magnetosfera y algunos de los mecanismos físicos de acoplamiento entre estos medios. Además, se analiza el comportamiento de las ondas gravitacionales, tanto en condiciones tranquilas como perturbadas, así como la marcada dependencia latitudinal de la variación del parámetro  $\text{foF2}$  en estas condiciones geofísicas y se estima la velocidad de propagación de la perturbación en la ionosfera.

## ABSTRACT

We studied the ionospheric behaviour over the American Sector for two geomagnetic storms with different intensity, analysing, the behaviour of some physical parameters in the solar wind, the critical frequency of the F2 layer (foF2), that were measured in some ionospheric stations of the Sector. As well as F2 layer electronic concentration profiles obtained by Intercosmos-19 satellite, and the behaviour of the magnetosphere characterized by the geomagnetic index Dst. We make some physical analysis of the energy flux transferred from the solar wind to the magnetosphere, and some of the coupling mechanisms between these medias. Also, we studied the behaviour of the atmospheric gravitational waves under quiet conditions as well as disturbed, beside the parameter  $\text{foF2}$  showed a latitudinal dependence under these geophysical conditions, we calculated too the propagation speed of the perturbation in the ionosphere.

## INTRODUCCION

El viento solar, la magnetosfera y la ionosfera terrestre forman en su conjunto un sistema dinámico muy complejo, en el que cualquier cambio que se produzca en uno de estos medios, afecta en mayor o menor grado al otro. Esto se debe a que existe un continuo intercambio de energía y momentum mediante diversos mecanismos físicos. Estos van desde las interacciones a nivel de campo, hasta la reconexión magnética, donde los cambios en la topología de las líneas de campo magnético condicionan la transferencia energética entre el campo magnético interplanetario y la magnetopausa. Hasta aquellos fenómenos de carácter fundamentalmente termodinámico, como son los cambios de presión y temperatura, inducidos por las variaciones de la presión dinámica del viento solar y que se conocen como interacciones de tipo viscoso.

Bajo condiciones geomagnéticas tranquilas se pueden observar claras evidencias, fundamentalmente en la ionosfera de altas latitudes, de todos aquellos procesos físicos que tienen lugar en la

magnetosfera por su interacción con el viento solar. Así como a medida que se incrementa el nivel de actividad geomagnética, la magnitud y variabilidad de las perturbaciones inducidas crece en igual grado y consecuentemente tiende a extenderse latitudinalmente hacia las zonas ecuatoriales. En condiciones extremas de actividad geomagnética máxima, la ionosfera es fuertemente perturbada a escala global, ya sea de forma directa o progresivamente por la llegada sucesiva de ondas atmosféricas perturbadoras. Estos procesos físicos han sido descritos en detalle por [1], [2], [3] y [4] y sus respectivas referencias. El objetivo de este trabajo es dar un aporte más a la comprensión de la dinámica en este sistema viento solar-magnetosfera-ionosfera.

## RESULTADOS Y DISCUSION

### • Caso 1 (del 16 al 22 de Diciembre de 1980)

#### Morfología de la perturbación geomagnética

El primer caso es la tormenta del día 19 de diciembre de 1980 cuya fase inicial comienza

después de las 13:00 UT, al producirse una caída en el índice geomagnético Dst hasta un valor mínimo en el Dst = - 240 nT a las 19:00 UT (Figura 1a) según aparece reportado en el **WDC-C2 FOR GEOMAGNETISM, KYOTO UNIVERSITY**.

(<http://swdcd.db.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>)

Las condiciones del viento solar, según aparecen reportadas por **The Space Physics Interactive Data Resource (SPIDR)**

(<http://spidr.ngdc.noaa.gov/index.html>)

se muestran también en el primer bloque de figuras (Figura 1).

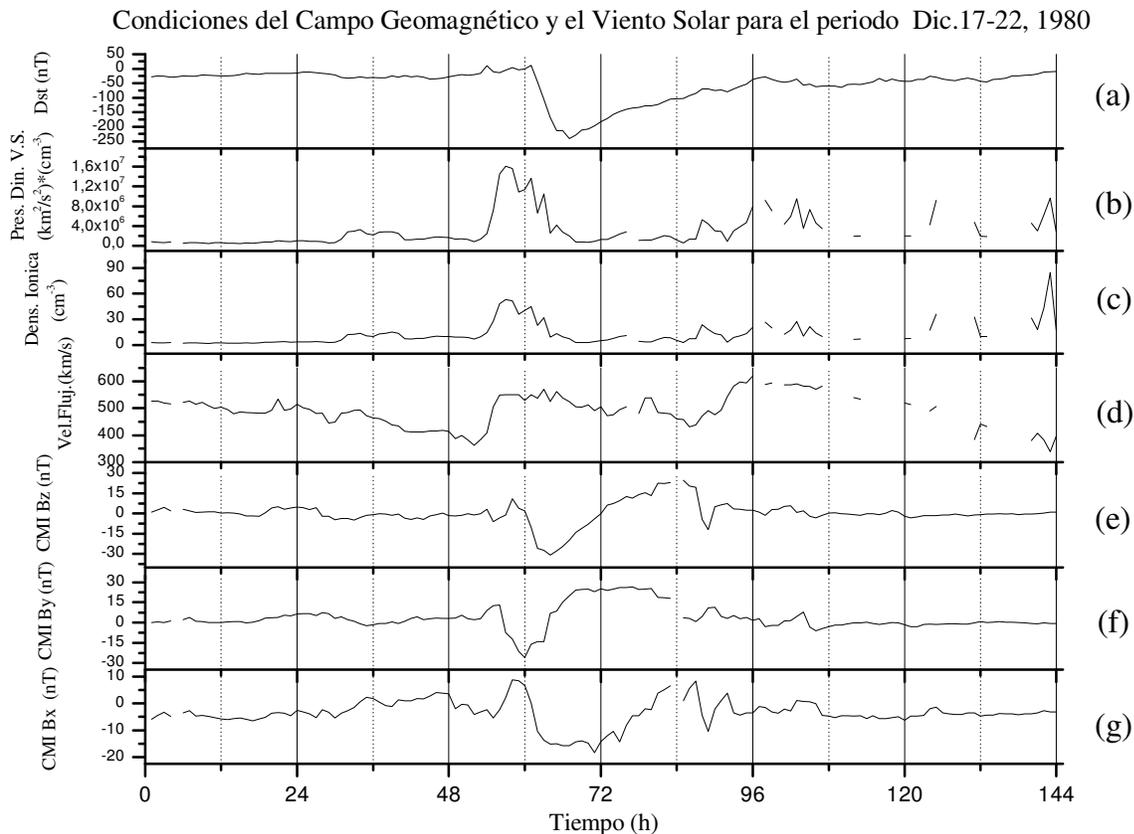
En las gráficas se muestra cómo aproximadamente 6 horas antes de la caída del índice geomagnético Dst, el campo magnético interplanetario tenía las componentes By y Bz con valores negativos que llegaron hasta By = - 25 nT y Bz = - 32 nT (Figuras 1f y 1e).

La velocidad del flujo del viento solar, experimenta una caída discreta desde un valor de 500 km/s hasta un poco menos de 450 km/s durante algo más de 24 horas. Posteriormente experimentó en muy corto tiempo (menos de 3 horas) un brusco incremento hasta aproximadamente algo más de 550 km/s. El flujo se mantuvo oscilando alrededor de este valor durante aproximadamente 3 días, según se muestra en la gráfica. (Figura 1d). Otro parámetro del viento

solar que tuvo una fuerte variación fue la densidad iónica, ya que alrededor de las 3:00 UT del día 19 de diciembre de 1980, experimentó un incremento hasta llegar a  $N = 54 \text{ cm}^{-3}$  según se muestra en la gráfica. (Figura .1c)

De esta forma la presión dinámica del viento solar, que puede ser caracterizada por el producto de la densidad iónica del viento solar y el cuadrado de la velocidad de flujo, indican una fuerte compresión de la magnetosfera, aproximadamente 3 horas antes de la caída del índice geomagnético Dst.

Las condiciones físicas del viento solar y del campo magnético interplanetario, favorecen la reconexión magnética y la entrada de energía a la magnetosfera según aparece explicado en detalle en numerosos trabajos como: [5] y [6] y sus respectivas referencias. La perturbación sobre la magnetosfera terrestre es transmitida hacia la ionosfera, mediante diversos fenómenos de transporte [7], por lo que la respuesta a escala global de la ionosfera, al intenso calentamiento y a la aceleración del arrastre iónico, es modulada por todos aquellos procesos que impliquen continuidad, movimientos advectivos y la fuerza de Coriolis. Estos procesos físicos no pueden verse de forma aislada ya que influyen de conjunto, condicionando el comportamiento ionosférico local [8], [9].



**Figura 1.** Condiciones físicas del viento solar (V.S), el campo magnético interplanetario (CMI), y el índice geomagnético Dst desde el día 17 al 22 de diciembre de 1980.

**Morfología de un sector latitudinal de la ionosfera en el Hemisferio americano (caso 1)**

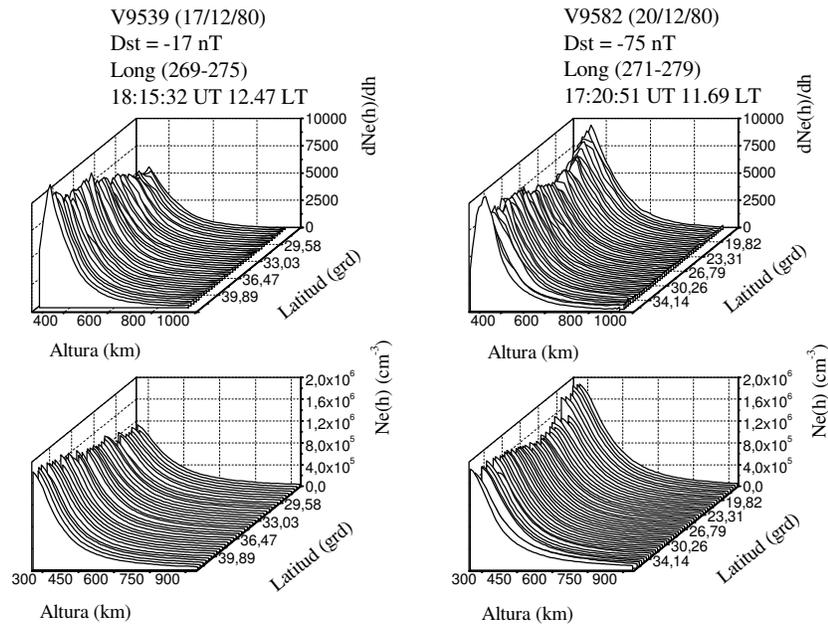
A partir de dos pases del satélite Intercosmos-19 se compara el estado de la ionosfera tranquila y perturbada. El pase, V9539, del día 17 de diciembre de 1980, sondea el rango de latitud  $26.55^\circ$  hasta los  $43.28^\circ$  norte y el rango de longitudes  $269.49^\circ$  hasta los  $275.57^\circ$  oeste, por encima de los 940 km . Los ionogramas son tomados cada 8 segundos, desde las 18:12 UT (12.17 LT) hasta las 18:17 UT (12.66 LT). El índice geomagnético Dst = -17 nT, lo cual se puede considerar como no perturbado.

El segundo pase, V9582, del día 20 de diciembre de 1980, sondea el rango de latitud  $16.32^\circ$  hasta los  $41.84^\circ$  norte y el rango de longitudes  $271.44^\circ$  hasta los  $279.47^\circ$  oeste, por encima de los 935 km . De igual forma los ionogramas son tomados cada 8 segundos, desde las 17:16 UT (11.37 LT) hasta las 17:24 UT (12.04 LT). El índice geomagnético Dst = -75 nT, lo cual se considera como perturbado. Del análisis de los ionogramas top-side se obtienen los perfiles de concentración electrónica y los gradientes de densidad electrónica (Figura 2).

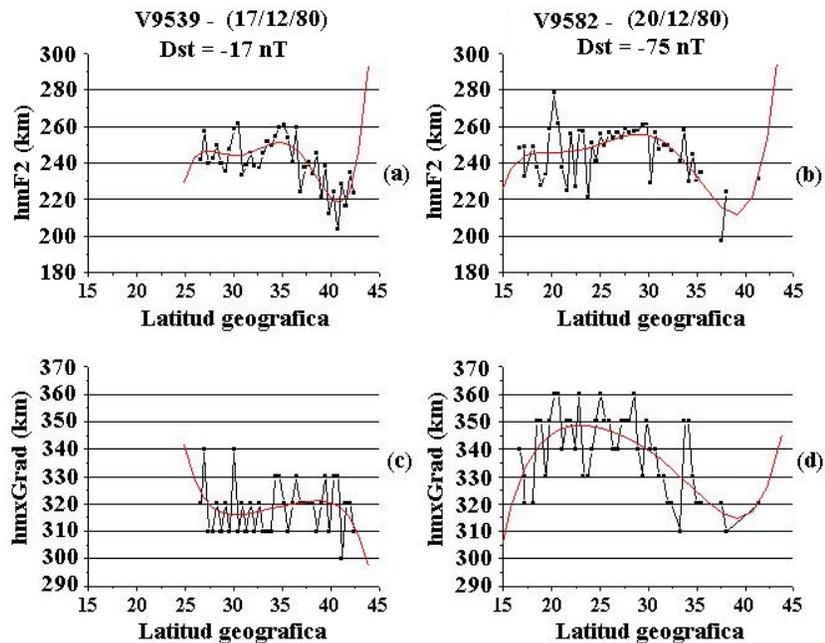
En las gráficas (Figura 3 a,b) se aprecia la variación latitudinal que presenta hmF2 para los perfiles de densidad electrónica y HmxGrad para los gradientes de concentración (Figura 3 c,d), tanto en condiciones geomagnéticas tranquilas como perturbadas. Del análisis de las gráficas de hmF2 como función de la latitud no se aprecian diferencias muy marcadas, como en el caso de la altura del máximo gradiente como función de la latitud (HmxGrad). En este caso si se hace evidente la expansión que sufre la capa F2 durante condiciones geomagnéticas perturbadas.

Hacia las bajas latitudes se observa un incremento cercano a los 50 kilómetros para la altura del máximo del gradiente de concentración electrónica. Esta ligera expansión de la capa F2 se explica por el incremento en el calentamiento de Joule que proviene de las

zonas de altas latitudes y que experimenta un desplazamiento hacia las zonas ecuatoriales. En este caso el pase correspondiente al día perturbado (20/12/80) se realiza durante la fase de recuperación de la tormenta, donde el valor del índice Dst = -75 nT. Durante esta fase la energía almacenada en el anillo de corrientes ecuatorial, es liberada como parte del proceso de restablecimiento del equilibrio energético en la magnetosfera.



**Figura 2.** Gráficos de concentración electrónica ( $Ne(h)$ ) y de su gradiente con la altura ( $dNe(h)/dh$ ) en condiciones geofísicas diferentes, obtenidos a partir del sondeo del Intercosmos-19 (caso1).



**Figura 3.** Gráficos de la altura máxima de la capa F2 (hmF2) y de la altura máxima del gradiente de concentración electrónica (hmxGrad) para los pases del Intercosmos -19, V9539 y V9582.

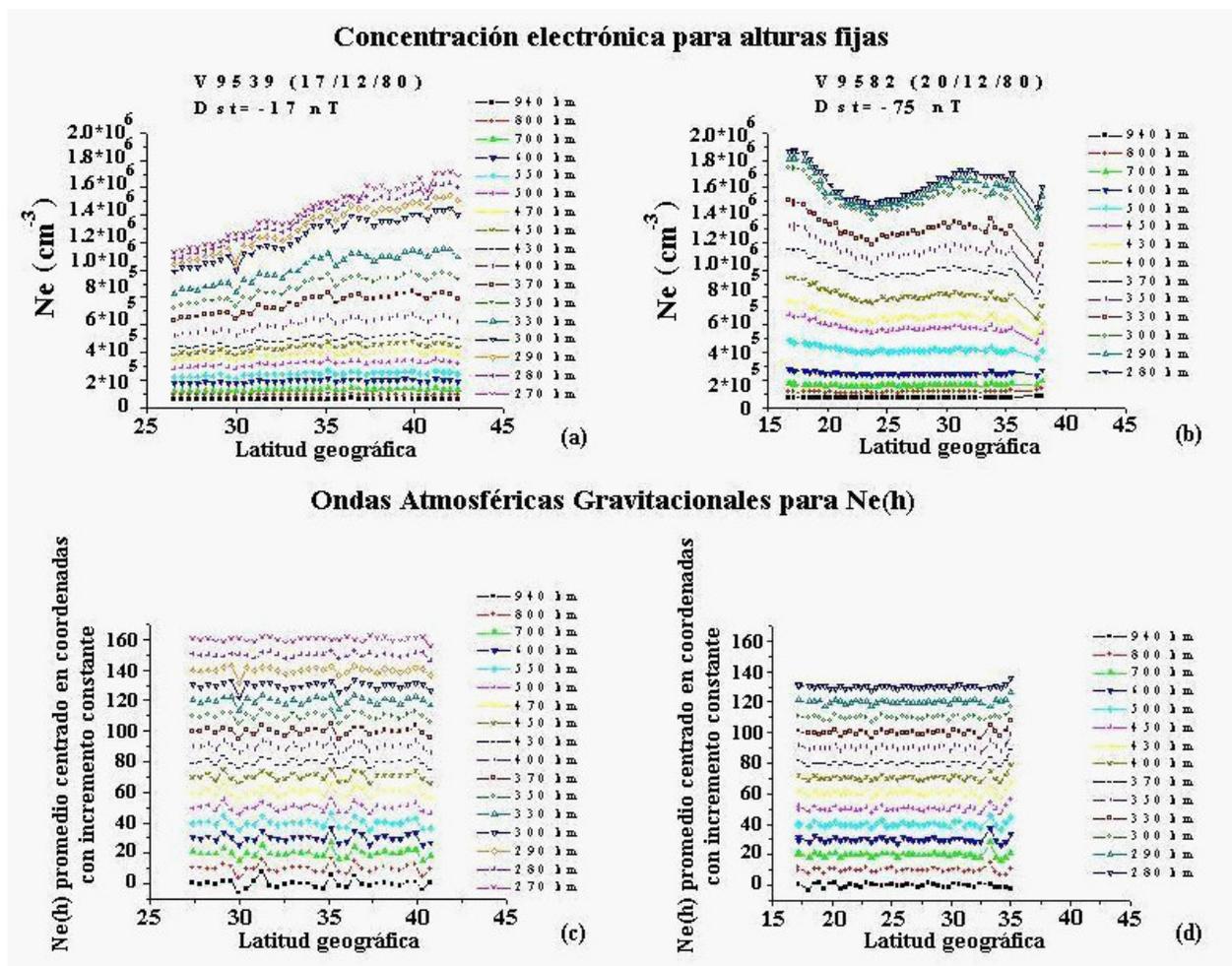
También de los gráficos de concentración electrónica para altura constante (Figura 4 a, b) se observa que durante el periodo previo de calma geomagnética (Dst = -17 nT), hacia la zona de altas latitudes, hay una tendencia a incrementarse la concentración electrónica respecto a las bajas latitudes, si en altura nos aproximamos a hmF2. Esta tendencia desaparece durante la fase de perturbación geomagnética (Dst = -75 nT), observándose un cierto comportamiento ondulatorio, a lo largo de la latitud para la concentración electrónica a altura constante, con una tendencia al aumento de la amplitud de esta onda hacia las zonas ecuatoriales igualmente aproximándonos a hmF2.

Otro efecto observado durante el sondeo top-side, es un amortiguamiento en la amplitud de las ondas atmosféricas que normalmente están presentes durante condiciones tranquilas, como se ve en la siguiente figura (Figura. 4 c, d).

En ambas condiciones se presenta un comportamiento similar con relación a la altura, ya que no se aprecia diferencia alguna en cuanto a que se

evidencie algún tipo de variación de la amplitud de la oscilación representada, con la altura. Solo al compararlos entre sí se aprecia una clara amortiguación de las amplitudes de la oscilación, cuando la ionosfera es encuentra perturbada, en el rango de las latitudes medidas. Esta amortiguación de la amplitud de las ondas se puede explicar por el hecho de que durante la perturbación se incrementa la viscosidad molecular de la atmósfera ionizada [10]. Es decir, que la onda se mueve en este caso por un medio de mayor densidad si se compara con los dos días tranquilos previos a la perturbación.

Otra característica que resulta de gran interés, es la diferencia en cuanto a la intensidad con que se manifiesta la perturbación ionosférica como función de la latitud y la longitud geográfica. El parámetro que permite caracterizar el grado de afectación o variación de foF2, es  $\delta foF2$ , que se obtiene de la diferencia entre el valor perturbado medido y el valor mediano mensual tranquilo, dividido por el valor perturbado medido y todo esto multiplicado por el 100 %. En nuestro caso se tomó como valor mediano tranquilo, el correspondiente a los dos días



**Figura 4.** En las gráficas (a,b) se muestra la concentración electrónica para cada altura constante como función de la latitud geográfica durante un periodo de calma geomagnética y durante una tormenta. En las gráficas (c,d) se observa como se amortiguan las OAG en condiciones perturbadas.

previos a la tormenta (17 y 18 dic. 1980). Como valor perturbado el correspondiente a la tormenta (19 y 20 dic. 1980) Esto permite caracterizar el grado de perturbación a corto plazo, al pasar de un día geomagnéticamente tranquilo a otro muy perturbado, y de esta forma identificar las fases positivas y negativas de la tormenta ionosférica en cada localidad como se ve en la Figura 5.

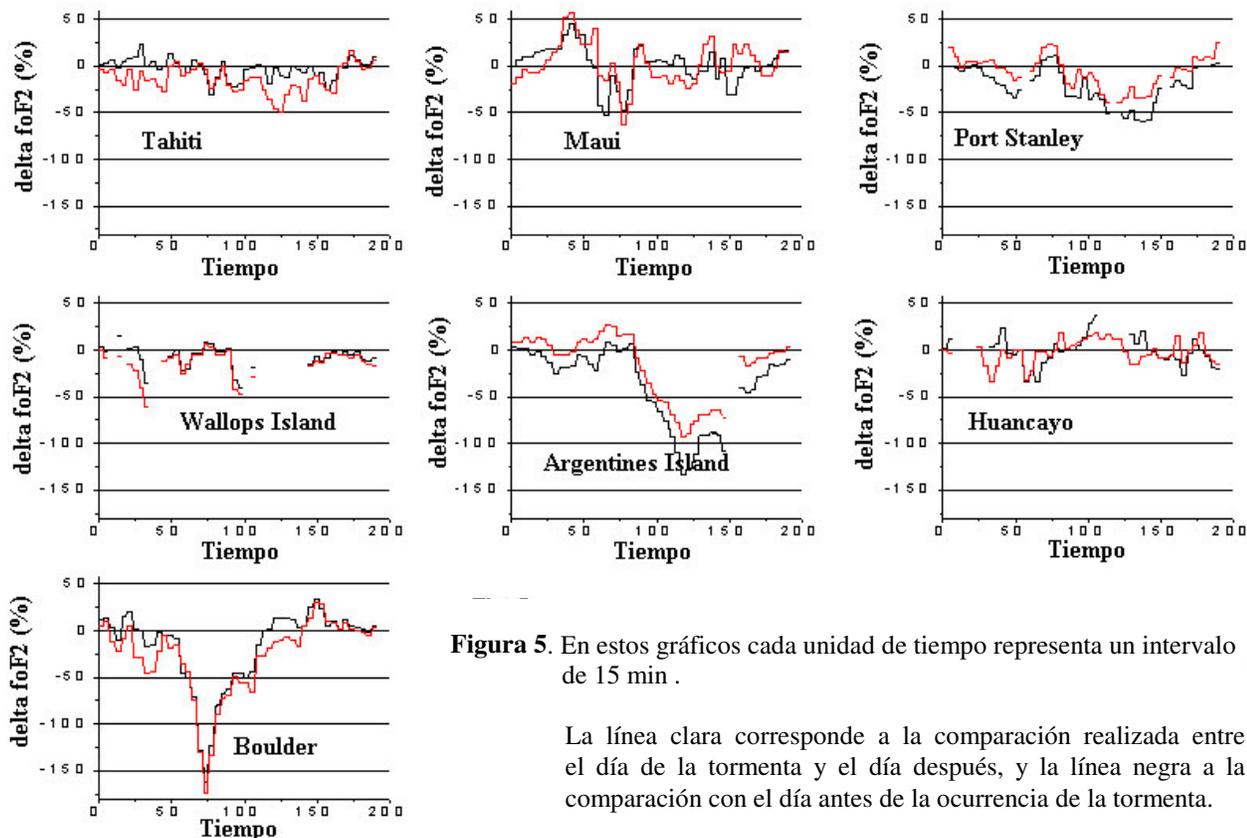
En la estación ionosférica de Tahiti [coord. geog. (-17.7N 210.6E) coord. geomag. (-15.18N 284.6E)] el  $\delta foF2$ , obtenido de comparar el promedio de foF2 de los dos días previos a la tormenta, indica un comportamiento ondulatorio sostenido. Aquí no se puede identificar claramente ninguna fase de la tormenta, aunque se evidencia una tendencia hacia valores negativos después de las primeras 14 horas del día 19. Mientras que el  $\delta foF2$  que corresponde a la comparación del promedio de los días siguientes a la fase perturbada del índice Dst, si indica una marcada fase inicial negativa que dura aproximadamente 12 horas. Después de transcurrido este tiempo hay una tendencia a la oscilación durante unas 8 horas y posteriormente una nueva caída de la concentración electrónica que dura cerca de 3 horas para volver nuevamente a oscilar. Esto indica una fuerte alteración de los niveles de ionización en la capa F2 en un corto periodo de tiempo.

En la estación ionosférica de Maui [coord. geog. (20.8N 203.5E) coord. geomag. (21.22N 270E)] el  $\delta foF2$  previo a la tormenta indica una marcada fase positiva al subir la concentración electrónica desde

las primeras horas del día 19 volviéndose negativa luego de transcurridas aproximadamente 10 horas, en esta fase negativa se mantiene por un periodo de 12 horas. Posteriormente vuelve a subir la concentración electrónica durante 10 horas, luego de las cuales aparece una fase oscilatoria durante cerca de 6 horas, antes de volver a caer en una fase negativa que dura aproximadamente 4 horas. En el caso del  $\delta foF2$  posterior a la tormenta, el patrón de comportamiento es bastante similar a lo anteriormente descrito durante casi 36 horas, invirtiéndose el comportamiento a una fase positiva de 4 horas luego de las cuales vuelven a estar en fase ambas curvas.

En la estación ionosférica de **Port Stanley** [coord. geog.(-51.7N 302.2E) coord. geomag. (-40.77N 10.6E)] el  $\delta foF2$  previo a la tormenta y el posterior a la tormenta se encuentran casi en fase experimentando aproximadamente las mismas variaciones. Inicialmente presentan una marcada fase negativa que dura aproximadamente unas 10 horas. Posteriormente se incrementa la concentración y aparece una fase positiva de corta duración cerca de 3 horas, después de las cuales nuevamente se experimenta un decrecimiento de la concentración creándose una fase negativa que perdurara durante mas de 24 horas.

La estación ionosférica de **Wallops Islan** [coord. geog. (37.9N 284.5E) coord. geomag. (49.02N 354.4E)], presenta discontinuidades muy grandes como para poder hacer una descripción adecuada de la variación de  $\delta foF2$ .



**Figura 5.** En estos gráficos cada unidad de tiempo representa un intervalo de 15 min .

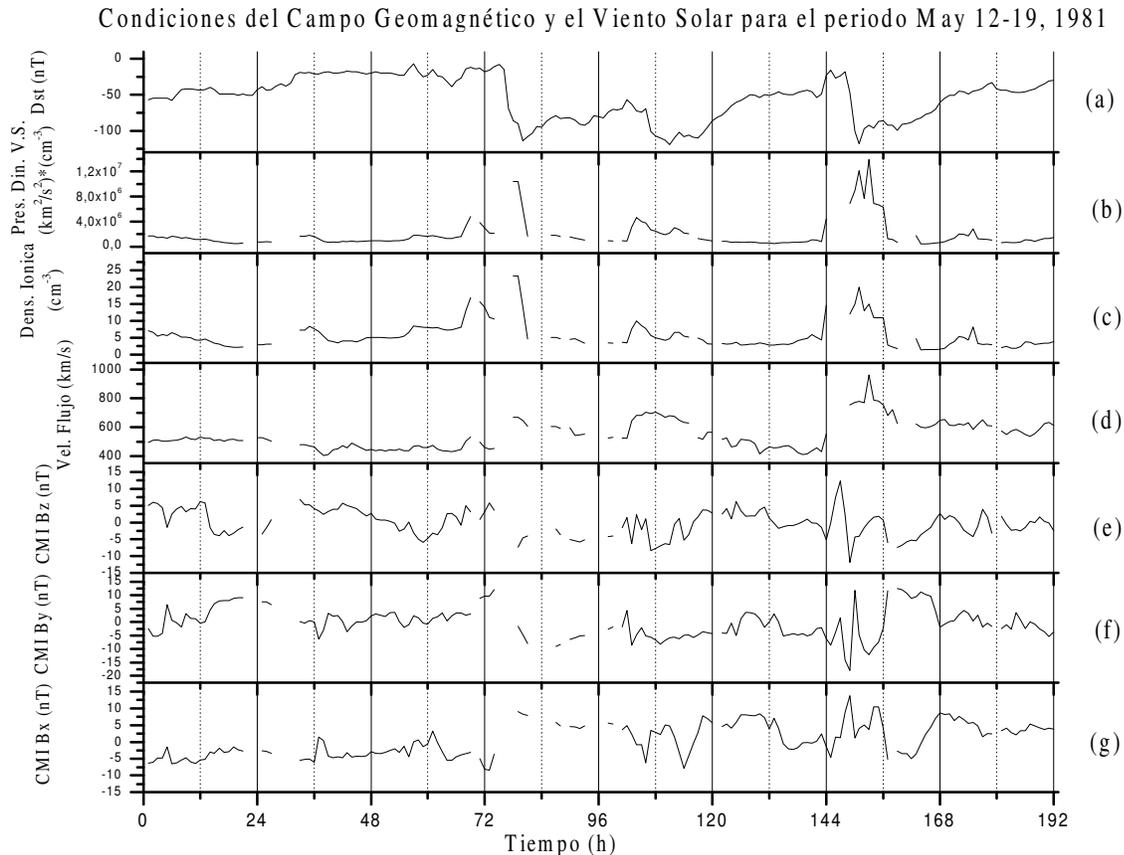
La línea clara corresponde a la comparación realizada entre el día de la tormenta y el día después, y la línea negra a la comparación con el día antes de la ocurrencia de la tormenta.

En la estación ionosférica **Argentines Islan** [coord. geog. (-65.25N 295.8E) coord. geomag. (-54.14N 4.7E)] la variación del parámetro  $\delta f_oF2$  antes y después de la perturbación, se mantienen en fase con igual comportamiento. Ambas presentan una ligera caída de la concentración durante las primeras 20 horas, con posterioridad a esto y coincidiendo con el decrecimiento del índice Dst, hay una súbita caída de la concentración. Esta marcada fase negativa indica un decrecimiento sostenido de la concentración durante un periodo de 8 horas, luego de las cuales comienza a recuperarse.

La estación ionosférica de **Huancayo** [coord. geog. (-12N 284.7E) coord. geomag. (-0.87N 355.6E)] registra una variación de  $\delta f_oF2$ , bastante complicada con algunas discontinuidades de corta duración. En ambos casos, se presentan oscilaciones de amplitud variable. El  $\delta f_oF2$  antes de la perturbación, muestra una fase negativa luego de haber estado presumiblemente en una fase positiva durante las primeras 12 horas del día 19 diciembre. Dicha fase negativa dura cerca de 12 horas. Luego de esto presumiblemente hay un incremento de la concentración (existe una discontinuidad de la medición), que se mantiene por un periodo de 12 horas con oscilaciones.

En el último caso, la estación ionosférica de **Boulder** [coord. geog. (40N 254.7E) coord. geomag. (48.84N 318.8E)] al igual que la de Argentines Islan, presenta la variación del parámetro  $\delta f_oF2$ , antes y después de la tormenta en fase. Presentándose una fuerte caída de la concentración electrónica, que genera una fase negativa muy marcada que dura algo más de 12 horas, luego de las cuales se restablecen las condiciones iniciales previas a la tormenta geomagnética. A diferencia del registro realizado por la estación Argentines Islan, la caída de la concentración electrónica se registra en Boulder aproximadamente unas 7 horas antes. Esto nos permite inferir que la perturbación en la ionosfera se demoró aproximadamente unas 7 u 8 horas en viajar desde Boulder hasta Argentines Islan. Esto nos daría aproximadamente una velocidad de propagación de la perturbación de  $0.22R_E$  km/h ( $R_E$ : radio de la tierra) ya que ambas estaciones se encuentran separadas, en longitud geográfica unos  $40^\circ$  y unos  $102^\circ$  en latitud. Además cada estación registra un nivel de afectación diferente, lo cual está condicionado por la hora local de comienzo de la perturbación.

El comportamiento anteriormente descrito para cada estación ionosférica indica la marcada dependencia latitudinal de la variación de  $\delta f_oF2$ , durante esta perturbación geomagnética.



**Figura 6.** Condiciones físicas del viento solar (V.S.), el campo magnético interplanetario (CMI), y el índice geomagnético Dst desde el día 12 al 19 de mayo, 1981.

• **Caso 2 (del 12 al 18 de Mayo de 1981)**

**Morfología de la perturbación geomagnética**

Este caso es más complejo por el hecho de que la perturbación a diferencia del caso anterior no es un fenómeno aislado, sino que es una superposición de perturbaciones que provocan varias tormentas geomagnéticas, según se refleja en la anterior gráfica del índice geomagnético Dst. (Figura 6a).

En la gráfica (Figura 6) se muestra cómo las componentes  $B_z$  y  $B_y$  presentan un comportamiento irregular, permaneciendo durante algunos periodos de varias horas tanto en valores positivos como negativos de forma alterna. Esto se refleja en el estado de leve perturbación que presenta el índice Dst hasta que el día 14/05/81 aproximadamente 02:00 UT aparece un frente de onda, según se ve del gráfico de velocidad de flujo (Figura 6d) al pasar en muy corto tiempo de aproximadamente 500 km/s a 700 km/s. Esto estuvo acompañado por un incremento en la densidad. Además, hubo valores negativos en las componentes  $B_z$  y  $B_y$  durante este periodo de tiempo, en que fue comprimida la magnetosfera. Esta compresión se puede apreciar en la gráfica de la presión dinámica del viento solar (Figura 6b) donde coincide la hora en que aparece el incremento de presión, con la caída del índice Dst, hasta valores de  $Dst = -112$  nT.

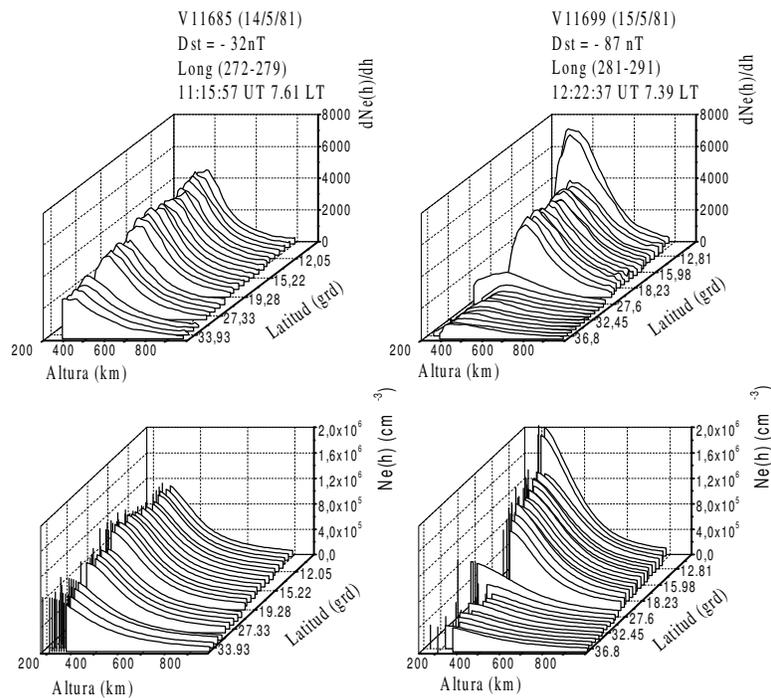
**Morfología de un sector latitudinal de la ionosfera en el Hemisferio americano (caso 2)**

Para este caso se cuenta con dos registros de sondeo top-side del satélite Intercosmos-19, recepcionados por el Instituto de Geofísica y Astronomía, de la Ciudad de La Habana. El pase V11685, del día 14 de Mayo de 1981 que sondea el rango de latitud desde los  $8.40^\circ$  hasta los  $41.3^\circ$  norte y el rango de longitudes desde los  $272.63^\circ$  hasta los  $282.24^\circ$  oeste, a una altura por encima de los 800 km .

Igualmente, los ionogramas son tomados cada 8 segundos, desde las 13:12 UT (7.39 LT) hasta las 13:22 UT (8.19 LT). Durante este intervalo de tiempo el valor del índice geomagnético  $Dst = -32$  nT, que se puede clasificar como perturbación leve, ya que está por encima de  $-50$  nT.

Y un segundo pase, V11699, del día 15 de mayo de 1981, donde se sondea el rango de latitud desde los  $1.85^\circ$  hasta los  $39.4^\circ$  norte y el rango de longitudes desde los  $281.67^\circ$  hasta los  $291.86^\circ$

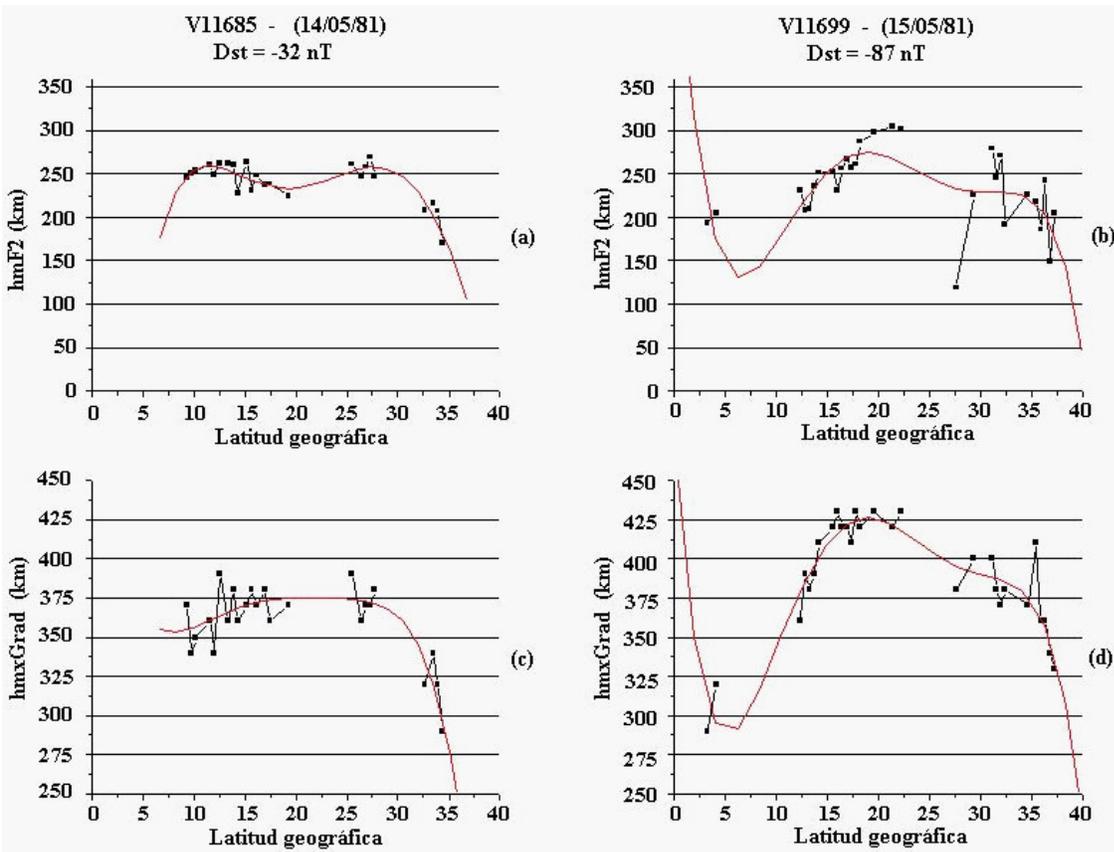
oeste, a una altura por encima de los 785 km . De igual forma cada ionograma es tomado cada 8 segundos, desde las 12:17 UT (7.08 LT) hasta las 12:29 UT (7.94 LT). En este caso el valor del índice geomagnético  $Dst = -87$  nT, lo cual se considera como perturbado. Del análisis de los ionogramas top-side se obtienen las anteriores gráficas (Figura 7) para los perfiles de concentración electrónica y los gradientes de densidad electrónica.



**Figura 7.** Gráficos de concentración electrónica ( $Ne(h)$ ) y de su gradiente con la altura ( $dNe(h)/dh$ ) en condiciones geofísicas diferentes, obtenidos a partir del sondeo del Intercosmos-19 (caso2).

Este segundo caso, presenta intervalos de latitud donde no se registra medición. Pero presenta un comportamiento semejante al primer caso, puede apreciarse que en las siguientes gráficas de  $hmF_2$  (Figura 8 a,b), durante el sondeo perturbado se registra un incremento visible en la altura del máximo de concentración electrónica de la capa F2, de aproximadamente 50 km. En la gráfica de la altura del máximo de gradiente de concentración electrónica (Figura 8 c,d) este incremento es mucho mas evidente, indicando una clara expansión de la capa F2 durante la ocurrencia de la perturbación geomagnética como consecuencia del calentamiento de Joule.

Otro gráfico que brinda información sobre el comportamiento de la ionosfera, es el de concentración electrónica para altura constante, como se aprecia en la figura siguiente (Figura 9 a,b).

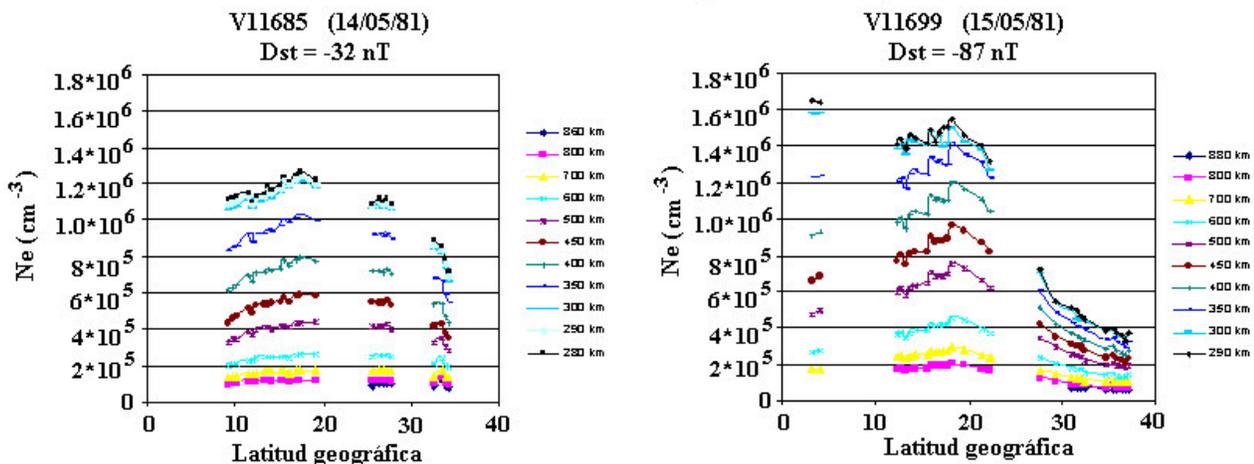


**Figura 8.** Gráficos de la altura máxima de la capa F2 (hmF2) y de la altura máxima del gradiente de concentración electrónica (hmxGrad) para los pases del Intercosmos -19, V11685 y V11699.

Debido a la ausencia de valores para ciertos sectores en el rango de latitudes sondeado, es imposible estimar el comportamiento de las ondas gravitacionales, ya que no se puede saber con certeza la dinámica que ha seguido la ionosfera en dichos sectores. Pero de los últimos gráficos mostrados (Figura 9 a,b) se puede apreciar cómo,

durante la perturbación, se produce un incremento notable de la concentración electrónica en dirección a las latitudes ecuatoriales, así como que hay una notable disminución de dicho parámetro hacia las latitudes medias; si se comparan dichos rangos de latitudes en el caso del día no perturbado geomagnéticamente.

### Concentración electrónica para alturas fijas



**Figura 9.** En las gráficas (a,b) se muestra la concentración electrónica para cada altura constante como función de la latitud geográfica durante un periodo de calma geomagnética

## CONCLUSIONES

Los casos analizados muestran que durante una perturbación en el viento solar en la que se propaga una onda de choque (incremento en la densidad iónica y la velocidad ) se entrega una gran cantidad de energía a la magnetosfera no solo por la compresión experimentada dinámicamente, sino que la topología presente durante estas condiciones por el campo magnético interplanetario con  $B_z$  y  $B_y$  negativos, condiciones que favorecen la reconexión magnética entre el campo magnético interplanetario y la magnetosfera terrestre.

Durante estas perturbaciones geomagnéticas la energía entregada por el viento solar se disipa por

diversos mecanismos desde la magnetosfera a la ionosfera, incrementando los niveles de ionización y aumentando la temperatura electrónica. Esto se ve reflejado en la expansión que experimenta la altura de la capa F2 y la amortiguación de la amplitud de las ondas gravitacionales debido al incremento de la viscosidad del medio. Ambos casos analizados presentan un incremento apreciable en la altura del máximo del gradiente de concentración electrónica en la capa F2 durante la ocurrencia de la perturbación.

También existen diferencias en cuanto al comportamiento de la perturbación de acuerdo a latitud, según se pudo apreciar en las graficas de  $f_oF_2$  en cada estación ionosférica analizada.

## REFERENCIAS

- [1]. PRÖLLS, G. (1995): "Ionospheric F-region storms", In: Vollan , H. (Ed.), **Handbook of Atmospheric Electrodynamics 2**. CRC Press, Boca Raton, 195-248.
- [2] REES, D. (1995): "Observations and Modelling of ionospheric and thermospheric disturbances during major geomagnetic storms: a review", in **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics** 57, 1433.
- [3] FIELD, P.R.; H. RISHBETH, R.J. MOFFETT **et al.** (1998): "Modelling composition changes in F-layer storms", in **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics** 60(5), 523.
- [4] RISHBETH, H. (1998): "How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-layer". **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics** 18, 234.
- [5] LYONS, L.R., (2000): "Geomagnetic disturbances: characteristics of, distinction between types, and relations to interplanetary conditions" in **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 62, 1087.
- [6] BARGATZE, L.F.; R.L. MCPHERRON and D.N. BAKER (1986): "Solar Wind-Magnetosphere Energy Input Functions" in "Solar Wind-Magnetosphere Coupling", edited by Y. Kamide and J. L. Slavin, 101-109, by (TERRAPUB), Tokio.
- [7] SHUNK, R.W. and A.F. NAGY (2000): Chapter 5 of "IONOSPHERES: Physics, Plasma Physics, and Chemistry", Cambridge University Press.
- [8] PRICE, G.D.; R.W. SMITH and G. HERNANDEZ (1995): **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**.
- [9] FULLER-ROWELL, T.J. **et al.** (1991): **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics** 53, 541.
- [10] CHAPMAN, S. and R.S. LINDZEN (1970): in "Atmospheric Tides: thermal and gravitational", D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.