

RESPUESTA HEMISFERICA DE LA IONOSFERA A LAS FUERTES PERTURBACIONES
MAGNETICAS DE AGOSTO DE 1972*

Ana C. Martínez de Garat** y José R. Manzano***

Laboratorio de Ionósfera, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología
Universidad Nacional de Tucumán
Tucumán, Argentina

RESUMEN

Se conoce perfectamente que la ionósfera y en especial la región F, sufren notables apartamientos de su comportamiento normal durante el desarrollo de tormentas geomagnéticas fuertes.

El presente trabajo consiste en el estudio del comportamiento de los parámetros foF2, h'F y hpF2 para las redes sudamericana, africana y australiana de sondadores para el período que se extiende desde el 3 al 6 de agosto de 1972, caracterizado por tres comienzos súbitos (SC) de tormentas magnéticas. Es evidente de los resultados, que las perturbaciones son consistentes con procesos TID (perturbaciones ionosféricas viajeras), con propagación tanto en latitud como en longitud y velocidades que van desde los 400 a los 1.000 m/seg.

ABSTRACT

Large departure from normal behavior of the ionosphere and specially F-region during the development of strong geomagnetic storms is well known.

The present paper studies the foF2, h'F and hpF2 parameters behavior for the South American, African and Australian ionosonde networks for the august 3 - 6 period characterized by three magnetic storm sudden commencements (SC). It is evident from the results that the disturbances are consistent with the TID's processes that propagate both in latitude and longitude with speeds of 400 to 1.000 m/seg.

* Trabajo subvencionado parcialmente por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) a través del Programa Nacional de Radiopropagación.

**Becaria del CONICET.

***Miembro de la Carrera del Investigador del CONICET.

1. INTRODUCCION

Los profundos cambios que ocurren en la atmósfera superior ionizada y neutra están asociados en la mayor parte de los casos con intensas fluctuaciones en el campo geomagnético. Las perturbaciones magnéticas constituyen un importante lazo de unión entre el sol y la Tierra ya que su energía está suministrada, en última instancia por el viento solar.

Las tormentas ionosféricas, tanto como las magnéticas comprenden una secuencia muy complicada de fenómenos. La mayoría de las conclusiones respecto a las mismas están siempre sujetas a reservas de una clase u otra. Las teorías sobre las tormentas son tentativas y las tormentas individuales varían tanto que pueden encontrarse excepciones a casi cualquier descripción de los fenómenos observados. Sin embargo, de acuerdo a Matsushita (1959), pueden indicarse resultados estadísticos de los rasgos generales de una tormenta fuerte. De la misma manera, en épocas recientes (Prölsch, 1980) han podido obtenerse conclusiones significativas con respecto a las tormentas ionosféricas positivas y negativas en relación con las distintas causas físicas que les dan origen.

El propósito del presente trabajo es el estudio del comportamiento de la concentración electrónica de pico de la capa F (proporcional a foF2), de la altura virtual de la base (h'F) y de la altura del pico de concentración de la región F (hpF2), durante el período de tormentas magnéticas fuertes que se extiende desde el 4 al 6 de agosto de 1972. El análisis se efectuó con datos de los sondadores de las redes sudamericana, africana y australiana, cubriéndose así prácticamente todo el hemisferio sur. Se tuvieron en cuenta los momentos de iniciación de la perturbación, los posibles mecanismos que les dan origen, así como los distintos caminos de propagación existentes.

2. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Se centró la atención en los días en los cuales se produce el comienzo súbito de la tormenta magnética y el día posterior. Los SC se dan a las 01.19 hs., 02.20 hs. y a las 20.54 hs. de Tiempo Universal del día 4 de agosto. Los otros días, fundamentalmente el 6/8 y 7/8, se consideran, si bien no como días tranquilos, al menos como días "normales".

Las tormentas analizadas serán denominadas como (1), (2) y (3) siguiendo el orden cronológico, para mayor comodidad. Las estacio-

nes consideradas son las siguientes: Islas Argentinas, Puerto Stanley, Buenos Aires, Tucumán y Huancayo para la red americana; Hermanus y Johannesburgo para la red africana; Hobart, Salisbury, Townsville y Vanimo para la red australiana.

2.1 Red americana

Las figuras 1 y 2 muestran la respuesta de la capa F a los SC (1), (2) y (3) para la red americana. Se ve claramente de las curvas $h'F$ (figura 1) que la perturbación se propaga desde las zonas de más alta latitud hacia el ecuador. Esto es particularmente notable para el SC (3) que es el que provoca los mayores cambios en la ionósfera, lo que puede apreciarse a través de los valores de K_p y A_E y del notable ascenso de la base de la capa F (aproximadamente unos 400 km).

Coincidiendo con el SC (1) y (2) se ha medido, de acuerdo a datos suministrados por el Pioner IX, una velocidad del viento solar del orden de los 800 km/seg. El flujo de protones solares (Explorer 41) con energías mayores que 10 Mev es de cerca de 500 protones/cm²/seg. Entre las 16 y las 20 horas del tiempo local del 4/8 (el SC (3) es a las 16.54 hs. de TL) el viento solar aumenta su velocidad de 700 a 1.100 km/seg y el flujo de protones solares con energías mayores que 10 Mev avanza de 24.000 a unos 68.000 protones/cm²/seg. Es interesante señalar que esta gran velocidad del plasma solar, conjuntamente con el intenso flujo de protones se da simultáneamente con las perturbaciones más intensas que se encuentran en todo el período considerado.

El estudio de foF_2 (figura 2) muestra el predominio de la tormenta positiva para todas las estaciones de la red. Las pequeñas depresiones que se observan no alcanzan a ser significativas ni siquiera en las estaciones de más alta latitud.

Las curvas hpF_2 (figura 3) ayudan a completar la imagen y confirman los puntos más destacados del análisis hecho anteriormente.

2.2 Red africana

No ha podido realizarse el estudio de $h'F$ por ser los datos demasiado incompletos. De acuerdo al comportamiento de la altura de pico de la capa F2 (figura 4) se debe concluir que la única tormenta que se manifiesta es la (3), con su SC a las 22.54 hs. de TL del 4/8.

En relación a las otras tormentas se teme que sea un poco arriesgado tratar de sacar conclusiones ya que los apartamientos

en relación a los días tranquilos son poco significativos. En cuanto al parámetro h_pF_2 , estas tormentas no aparecen, o, en su defecto lo hacen muy débilmente.

Las curvas de concentración electrónica (figura 4), indicativas de la densidad máxima de la región F2, muestran decididamente el predominio de la tormenta ionosférica positiva. En este sentido el comportamiento es asimilable al de la red americana.

2.3 Red australiana

Las figuras 5 y 6 muestran el comportamiento de la ionósfera australiana a través de la representación de la altura de pico de capa F2 y de su frecuencia crítica f_oF_2 . Se ha trabajado con datos de las estaciones de Hobart, Salisbury, Townsville y Vanimo. La diferencia de hora existente con las estaciones americanas hace que las tormentas que allí eran de noche, aquí sean diurnas. Los SC (1) (2) y (3) ocurren en Australia a las 11.19 hs. del 4/8, a las 12.20 hs. del 4/8 y a las 06.54 hs. del 5/8 respectivamente.

Con relación a los SC (1) y (2) y considerando las curvas h_pF_2 se ve claramente (salvo en Vanimo) que el levantamiento de la capa empieza aproximadamente a la misma hora (14.00 hs. TL). De acuerdo a la figura 5, y analizando el SC (3), se extrae una consecuencia importante. La perturbación se manifiesta primero en las estaciones próximas al ecuador y aparece más tarde en las zonas de alta latitud. Se tratará de explicar este hecho. En las estaciones de baja latitud la perturbación de la ionósfera comienza cerca de seis horas antes que en las estaciones de latitud más alta.

Dirijamos ahora nuestra atención a la figura 6 que representa la concentración electrónica máxima de la capa F2 a través del parámetro f_oF_2 para los días 4, 5, 6 y 7/8 de 1972. Aquí también se ha tomado como curva de control el promedio sobre días tranquilos. La ionósfera australiana muestra, en este sentido, una estructura inversa a la que se manifiesta en Africa y en Sudamérica. En efecto se observa un notable vaciamiento electrónico en todas las estaciones que se consideran salvo, quizás, Vanimo, que muestra, alternativamente fases positivas y negativas.

Por el contrario, la respuesta de la ionósfera a los SC (1) y (2), es muy débil y su apartamiento de la curva de control no es tan significativo. Su fase es positiva en toda la red.

Se quiere aclarar que los datos correspondientes a la altura de la base de la capa, F, $h'F$, no han estado a nuestra disposición.

3. PROPAGACION DE LA PERTURBACION

Existe acuerdo entre el conjunto de los autores en que las tormentas magnéticas y las ionosféricas, relacionadas entre sí, se inician en las zonas aurales propagándose luego hacia las bajas latitudes. Las tormentas que se analizan en este trabajo cumplen con esto, pero es evidente que el camino seguido por la perturbación no responde a un patrón simple sino que está influenciado por distintos factores.

De acuerdo al análisis de los resultados hecho más arriba, la tormenta sigue, en América, un camino que va de sur a norte; en África la situación es más confusa y en Australia el comportamiento se invierte respecto a América. De esta circunstancia puede concluirse que existe una "zona de impacto" ubicada seguramente en la región auroral correspondiente a la red americana desde donde se propaga la perturbación tanto en longitud como en latitud.

Una vez producido el impacto, la tormenta sigue caminos señalados por tres grandes brazos con sus respectivas velocidades. Una de las trayectorias apunta directamente al norte (red americana). Otro de los caminos iría en dirección noreste (es aquí donde la velocidad de propagación alcanza sus valores más altos) llegando al norte de Australia (Townsville y Vainimo) y el tercer brazo, más lento, se dirigiría casi directamente al este, alcanzando posteriormente la zona sur de Australia. Aceptando esta posibilidad se hace un cálculo aproximado de las velocidades de propagación, teniendo en cuenta el SC (3) que es el más intenso. Es necesario determinar primero la distancia, lo cual se hace mediante relaciones de trigonometría esférica, y el cálculo del tiempo se estima directamente de la gráfica.

Del cálculo surge, en primera aproximación que la velocidad de propagación disminuye un poco al acercarse al ecuador, pero básicamente la tormenta viaja hacia el norte y hacia el este con la misma velocidad (aproximadamente 400 m/seg). Esta alcanza valores muy altos, por encima de los 1.000 m/seg, en la dirección noreste.

4. DISCUSION

Hay dos hechos que resultan de especial importancia y que deben ser tenidos en cuenta al realizar la discusión. Por un lado el particular interés que despierta el estudio de una parte de la ionósfera que cubre una zona tan extensa del globo terráqueo, lo que permite comparar respuestas en latitudes muy diversas a la misma perturbación. Por otra parte, no debe perderse de vista que la tor

tormenta que ha canalizado la mayor parte del análisis, a la que se ha designado como (3), es de una magnitud excepcional. En efecto, al comparar resultados obtenidos en el presente trabajo con resultados obtenidos por otros autores debe recordarse que no es usual de manera alguna que el índice AE sobrepase los 2.000 gammas y que el índice Kp se mantenga con valores que oscilan de 7 a 9 durante las 24 horas que siguen al SC de la tormenta.

Es conocido que el viento solar interactúa con el campo magnético de la Tierra transfiriendo una parte de su energía a la magnetósfera terrestre y de ahí a la atmósfera superior. Se han propuesto varios modelos sobre la interacción del viento solar con la magnetósfera compatibles con las tormentas en la Tierra. En la secuencia de tormentas que se analizan en este trabajo es fácil observar que la perturbación más intensa coincide con los valores más altos de velocidad del viento solar, produciéndose la perturbación aún antes de la interacción gruesa del plasma solar con el campo geomagnético.

Hay muchos mecanismos que tratan de explicar los múltiples aspectos de las tormentas ionosféricas (Manzano, 1978; Prölss, 1980)

A partir de este denso conjunto de ideas las principales características de las tormentas de agosto de 1972 siguen perfectamente la descripción sobre las "Perturbaciones Ionosféricas Viajeras" hecha por Davis y Da Rosa que establece: 1). Están estrechamente relacionadas con la actividad magnética. 2). El mecanismo de producción está relacionado con el nivel de la actividad magnética. 3). Se originan en latitudes altas localizadas en el sector nocturno del óvalo auroral. 4). Propagación a latitudes más bajas después de su creación. 5). Velocidades del orden de los 500 m/seg. (en nuestro caso llega hasta los 1.000 m/seg). 6). Pequeño cambio de sus características después de viajar grandes distancias.

De acuerdo a varios autores, por ejemplo Georges (1968) y Thomas (1968) los TID's son causados por ondas gravitatorias atmosféricas, cuya generación está relacionada con las perturbaciones geomagnéticas de la zona auroral. Se haría evidente que la ionósfera es anisótropa ya que existía un único lugar de impacto y la perturbación se propaga con diferentes velocidades en las distintas direcciones.

Estudios recientes (Prölss, 1980) muestran claramente que la fase negativa de las tormentas ionosféricas está causada por cambios en la composición ionosférica, lo que está ampliamente confir-

mado por mediciones experimentales que han hecho posible por primera vez una comparación directa entre cambios asociados con las tormentas magnéticas en la composición neutra y los efectos de las tormentas negativas.

No todos los datos investigados muestran este estrecho acoplamiento. Esto no es sorprendente ya que la densidad del plasma de la región F2 está controlada por un gran número de mecanismos competitivos. Sin embargo, en general, los datos sobre composición y plasma están bien relacionados.

Desde este punto de vista, la decidida fase negativa que muestra la tormenta que se analiza en la ionósfera australiana, estaría indicando una notable disminución en la razón O/N_2 . La tormenta magnetosférica produce la tormenta atmosférica. Esta, a su vez, induce cambios en la composición neutra, fundamentalmente en la razón O/N_2 , los cuales desencadenan la tormenta ionosférica negativa. Este mecanismo, esquemáticamente explicado, daría cuenta de los hechos básicos observados en la red australiana en relación a las notables depresiones de f_oF_2 .

Prölss, en el trabajo ya citado, sostiene que en el hemisferio de invierno, las perturbaciones en la ionósfera son positivas y las tormentas negativas prácticamente no existen. Esta afirmación está en contradicción con los resultados obtenidos en el presente trabajo para la red australiana de sondadores. Por el contrario, en Africa y América este hecho sí se cumple.

A pesar de que Prölss globalmente no hace diferencias entre tormentas ocurridas de día y tormentas nocturnas, se piensa que este hecho debería tenerse en cuenta.

Hay evidencia experimental directa de que realmente no existe correlación entre las perturbaciones positivas y los cambios en la composición neutra (Prölss, 1976a). Ahora generalmente se cree que los incrementos en la densidad de plasma son causados principalmente por transporte de ionización. Siguiendo esta idea, la tormenta magnetosférica originaría campos eléctricos que desencadenan la tormenta ionosférica positiva. Sin embargo se considera que el efecto principal es debido a vientos que han nacido de la tormenta atmosférica a través de la inyección de energía provocada por la tormenta magnetosférica original y que levantan la ionización a zonas de menor pérdida. La fase decididamente positiva de las tormentas analizadas para Sudamérica y Africa estaría explicada, básicamente por estos mecanismos.

BIBLIOGRAFIA

- Davies M. J. y Da Rosa (1969), J. Geophys. Res. 74, 5721
Georges T. M. (1968), J. Atmos. Terr. Phys. 30, 735
Manzano J. R. (1978), Space Reserch. 18
Pröiss G. W. (1976a), The Geophysical Use of Satellite Beacon Observations, edited by M. Mendillo pp. 324-344, Boston University
Pröiss G.W. (1980), Reviews of Geophys. and Space Phys. 18, 183
Thomas G. (1968), J. Geophys. Res. 73, 3319
Matsushita S. (1959), J. Geophys. Res. 64, 305

EPIGRAFES DE LAS FIGURAS

- Figura 1: Se representa $h'F$ para la red americana de sondadores. La curva de control dibujada en líneas de trazos se ha construido con 11 días magnéticamente tranquilos. Las flechas indican los SC de las tormentas geomagnéticas. Se compara con los índices magnéticos Kp y AE. La parte rayada indica valores superiores a los normales y la sombreada valores inferiores.
- Figura 2: Idem anterior pero para foF2.
- Figura 3: Idem anterior para hpF2.
- Figura 4: Idem anterior pero se representan juntas foF2 y hpF2 para la red africana.
- Figura 5: Idem figura 3 para hpF2 de la red australiana.
- Figura 6: Idem figura 2 para foF2 para la red australiana.

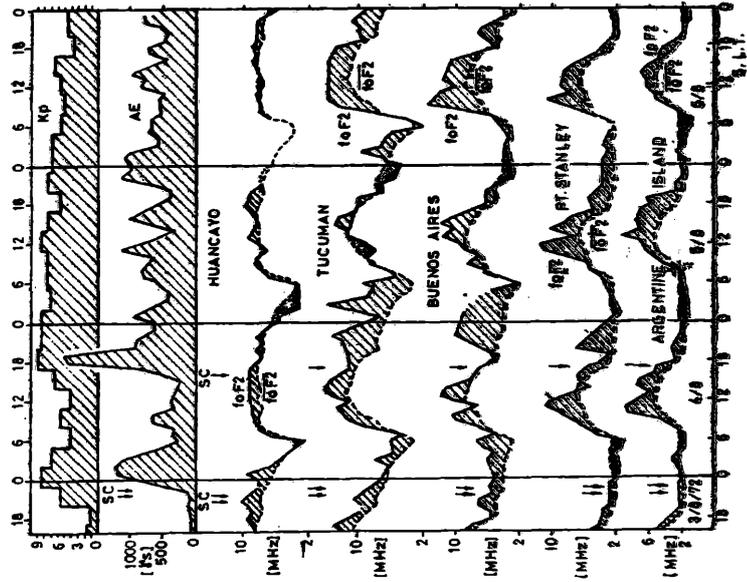


FIGURA 2

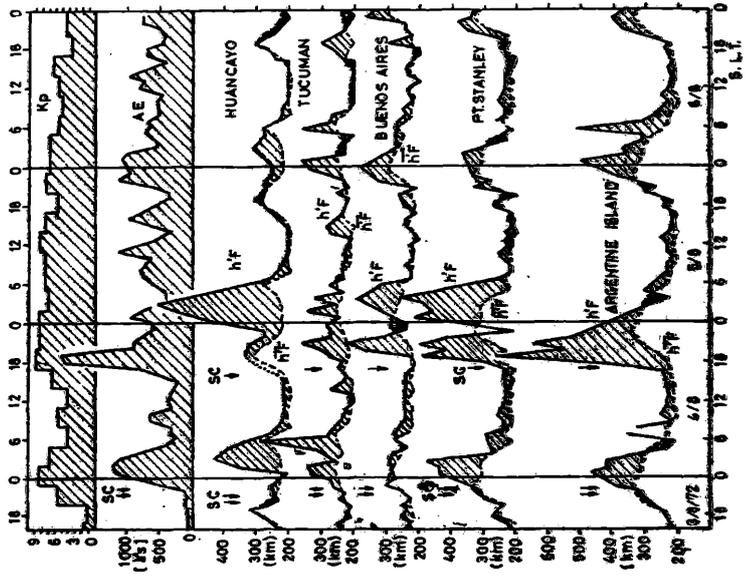


FIGURA 1

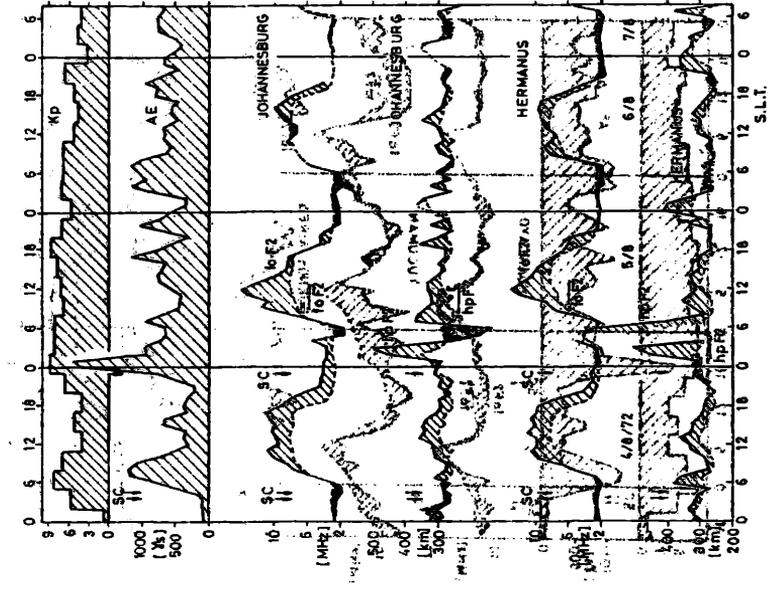


FIGURA 4

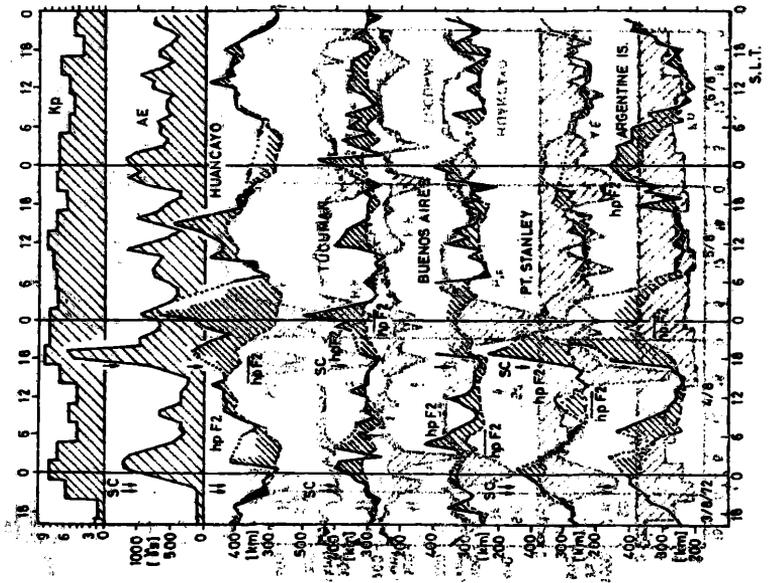


FIGURA 3

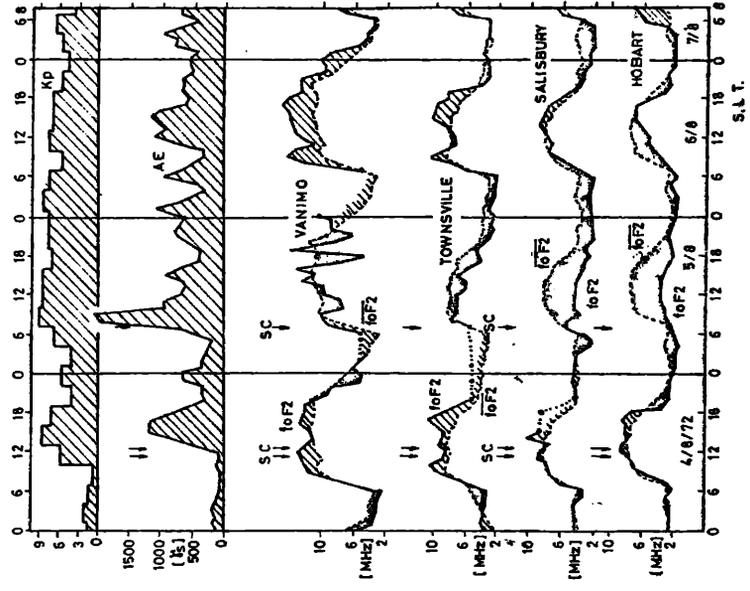


FIGURA 6

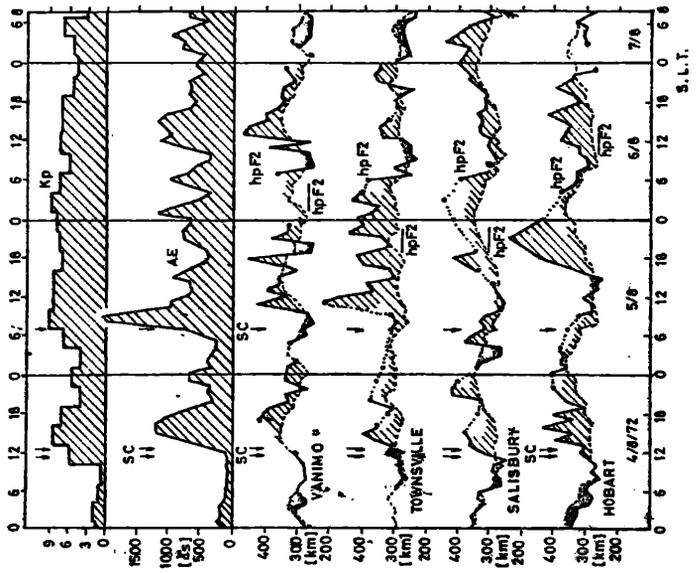


FIGURA 5

