

COMPORTAMIENTO DE LAS CONCENTRACIONES IONICAS ATOMICAS Y MOLECULARES SOBRE SUDAMERICA, OBSERVADAS CON SATELITES PASANTES S3-1 Y S3-2.#

José R. Manzano*

Laboratorio de Ionósfera - Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología - Universidad Nacional de Tucumán.

Bernardino P. Toledo

Facultad de Ciencias Exactas - Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires - Tandil.

RESUMEN

Se analizan desde el punto de vista físicoquímico las mediciones de concentración de iones atómicos y moleculares, obtenidas por los satélites S3-1 y S3-2 en diversas órbitas y en su pasaje sobre Sudamérica. Las órbitas consideradas durante los días 25, 27 y 28/3/76 corresponden a períodos de actividad geomagnética nula, moderada y perturbada.

Es muy significativa la perfecta correspondencia de la curva de concentración de N^+ con la de O^+ , aunque la primera muestra valores de concentración dos órdenes de magnitud inferiores. Esto ocurre aún en días perturbados. Datos proporcionados por el satélite S3-1 para setiembre de 1976 muestran, además del proceso indicado arriba la similitud en comportamiento y valor de las concentraciones de los iones moleculares NO^+ y O_2^+ .

Se pretende explicar estos resultados en base a las correspondientes ecuaciones de continuidad y para el rango de alturas de interés (240 a 300 km). En cuanto a la dinámica que justifique la profunda bahía negativa del día 28/3/76 (TU), se da la alternativa de dos procesos: uno originado por el interjuego entre plasmasfera e ionosfera a lo largo de tubos de flujo, y el otro por el "enfrentamiento" entre dos mecanismos opuestos, el de generación de la anomalía ecuatorial ionosférica y el de propagación de la perturbación que proviene de zonas aurorales. La discusión es planteada también en base a la confrontación con valores de contenido electrónico sobre Tucumán, y de concentración electrónica a lo largo de la red sudamericana de sondadores.

ABSTRACT

Atomic and molecular ions concentration over South America, measured by the S3-1 and S3-2 satellites, are analyzed from a physicochemical point of view. The orbits in consideration, for the 25, 27 and 28 of March, 1976, correspond to periods of null, moderate and disturbed geomagnetic activity.

The perfect correspondence between N^+ and O^+ although with values of concentration two orders of magnitude lower for N^+ , is one of the standing out features of the concentration curves, even for disturbed days. Data provided by the S3-1 satellite for September 1976 show, besides of the above mentioned process, the similarity in behaviour and value of the NO^+ and O_2^+ molecular ions concentrations.

It is intended to explain these results based on the corresponding continuity equations and for the height interval of interest (240 to 300 km). As for the dynamic process to justify the deep negative bay of March 28 (UT), two alternatives are given: a process originated by the plasmasphere-ionosphere interplay along the flux tubes, and the other by the "facing" between two opposed mechanisms, that of generation of the ionospheric equatorial anomaly, and that of propagation of perturbation from auroral zones. The aforementioned discussion has been also based on the confrontation with values of electron content over Tucumán, and electron concentration along the South American ionosonde network.

Trabajo parcialmente financiado por el CONICET a través del PRO-MARP.

* Miembro de la Carrera del Investigador del CONICET.

INTRODUCCION

Son muy escasos los trabajos existentes en la bibliografía que vinculan mediciones "in situ" de la componente ionizada de la región F por satélites pasantes, con información proporcionada por instrumentos de superficie en nuestro hemisferio. El lanzamiento de los satélites S3-1 y S3-2, de bajo perigeo, y diseñados para facilitar el estudio científico de las propiedades de la atmósfera superior, en conjunción con información ionosférica medida por la red latinoamericana de sondadores, y con datos de contenido electrónico total obtenidos en Tucumán han abierto la posibilidad de realizar una amplia investigación sobre los aspectos químicos y dinámicos del acoplamiento ionosfera-plasmasfera-lengua de plasma.

La tarea involucrada, en el objetivo mencionado es larga, por lo que en este trabajo nos limitaremos al análisis físico-químico, con algunas consideraciones finales sobre los aspectos sobresalientes de la posible dinámica en juego.

Los datos analizados corresponden a las concentraciones de los iones atómicos O^+ , N^+ , N_2^+ , NO^+ y O_2^+ , proporcionadas por los satélites ya citados S3-1 y S3-2. Esta información se obtuvo, para el S3-1, del trabajo de PHILBRICK y otros (1981)(Fig.2) y para el S3-2 por datos proporcionados privadamente por C.R.Philbrick. La componente ionizada se compara con datos de contenido electrónico total, obtenidos en Tucumán, de registros de señales del satélite pasante INTASAT con órbita casi polar a ~ 1000 km de altura, y con datos de la red latinoamericana de sondadores verticales, mencionada en la Tabla I.

Tabla I. Lista de sondadores

Ionosondas Estaciones	Geográficas		Geomagnéticas		Dip Magnético
	Lat.	Long.	Lat.	Long.	
Islas Argentinas	- 65	296	- 54	003	- 58
Ushuaia	- 55	292	- 43	001	- 51
Puerto Argentino	- 52	302	- 40	009	- 47
Buenos Aires	- 35	301	- 23	009	- 32
Tucumán	- 27	295	- 16	003	- 22
Huancayo	- 12	285	- 0,6	354	- 0,05

El satélite S3-1 bajó en su perigeo hasta los 153 km y el S3-2 hasta los 243 km.

PRESENTACION Y ANALISIS DE DATOS

La Figura 1 muestra los resultados obtenidos por el satélite S3-2 en su revolución nº1550, correspondiente al día 25 de marzo de 1976. Además de coordenadas y altura, se presentan el tiempo universal y el tiempo local (no el tiempo de huso horario), correspondientes al tramo de la órbita que pasa aproximadamente sobre la línea sudamericana de sondadores. Las concentraciones corresponden a los iones atómicos O^+ y N^+ , y a los iones moleculares NO^+ y N_2^+ . El tramo de la órbita ha sido recorrido cuando la actividad magnética correspondía a un $K_p = 0^+$ (03 a 06 hs TU), es decir período muy tranquilo, actividad que por otro lado ha caracterizado a todo el día 25. Por esta última razón se ha tomado a este día como referencia para distintas comparaciones.

De esta figura es posible observar la constancia en O^+ y N^+ para todo el recorrido, aún con cambio sustancial de altura (~ 180 km). En esta figura, como en las que siguen (Fig.2 y 3), se destaca el casi perfecto seguimiento de N^+ al comportamiento de O^+ , aunque su concentración sea más chica en más de un orden de magnitud.

La Figura 2 muestra los mismos parámetros pero para la órbita 1592 del día 28/3/76 (TU), con un $K_p = 4^+$ (moderado). Es evidente el cambio drástico en la concentración de todos los iones, especialmente el O^+ , y con excepción del N_2^+ , que se debe tomar con precauciones dado que el espectrómetro tiene su sensibilidad inferior en el orden de 10^2 cm^{-3} , siendo afectados valores inferiores con grandes errores. Como se ha mencionado más arriba, se observa también el seguimiento del N^+ al O^+ en su comportamiento.

La Figura 3, tomada de Radicella y otros (1982), representa N_e máximo obtenido para foF2 de los distintos sondadores de la red latinoamericana (Huancayo: H; Tucumán: T; Buenos Aires: B; Concepción C; Puerto Argentino: P; Ushuaia: U e Islas Argentinas: I), para diferentes horas del día 27 y 28/3/76. Se toman los valores del día 24/3/76 como datos de referencia, para la misma red y las mismas horas. A las 22 hs TEL empieza a manifestarse entre Tucumán y Buenos Aires la fase negativa que se observa en la concentración iónica. El perfil en latitud para N_e nos permite ver el gran incremento hacia el norte de Tucumán y especialmente en Huancayo.

Entre las 22 hs (TEL)(02 hs TU) y las 23 hs (TEL)(03 hs TU), N_mF2 decrece de $4,5 \times 10^5$ a $2,5 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$, lo que implica una velocidad de pérdida de $55 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ para electrones. Observando la Figura 2, podemos decir que en el descenso en los componentes ionizados

tiene peso primordial el O^+ , dado que los otros componentes contribuyen con un 2% del total. Si referimos estos datos a los de la Fig 4, la que presenta los mismos parámetros que las Figs. 1 y 2, y que corresponde al paso n°1591 previo anterior al que manifiesta la profunda fase negativa, vemos que la concentración iónica ha bajado con una velocidad de $51 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$. Este valor surge de considerar como iniciación del descenso la hora del pasaje del satélite por la latitud de Tucumán en la revolución 1591 ($01^{\text{h}}.25^{\text{m}}$ TU). De cualquier modo, si el tiempo de descenso hubiera sido aproximadamente igual al de NmF2, el orden de magnitud en la velocidad de decrecimiento sería el mismo.

El valor del decrecimiento en las concentraciones iónicas es el mismo, si se compara con la Fig. 1 (curva de control).

La Figura 5 representa el contenido electrónico total hasta la altura del satélite INTASAT ($\sim 1000 \text{ km}$). Se puede apreciar que el comportamiento es análogo al de NmF2, con una profunda fase negativa hacia la latitud de Tucumán e incremento hacia el norte de los -23° de latitud subionosférica.

La Figura 6 nos muestra el comportamiento de los índices magnéticos Dst (ecuatorial) y AE (auroral) para el período en análisis. En cuanto al índice AE, desde las 12 hs (TEL) hasta la madrugada del día siguiente se observa una subtormenta que llega a 700 nT, sobre la cual "cabalgan" tres micro-subtormentas con comienzo hacia las 13, 18.30 y 23 hs. El índice Dst es también indicativo de ligeras variaciones de la actividad magnética en el mismo sentido que las mostradas por el AE.

La tercera microsubtormenta es coincidente con la fase negativa que nos preocupa. Dado que los datos de Dst y AE accesibles son horarios, se debe considerar que las perturbaciones adicionales para la 3ra. intensificación de la actividad magnética pueden haber empezado entre las 22 y 23 hs. Un análisis de NmF2 para intervalos de 15 minutos en el sondador de Tucumán (no representados), indica que la fase negativa empezó entre 22 y 22.15 (TEL).

Por último, la Figura 7 muestra los mismos parámetros que las Figs. 1, 2 y 4, con el agregado de los datos de concentración de O_2^+ . Esta figura es mostrada con el propósito, en esta primera parte, de indicar la casi perfecta coincidencia en comportamiento y valor de las concentraciones de NO^+ y O_2^+ , aunque también es digno de señalar la presencia bien definida de la anomalía ecuatorial, casi simétrica, para los iones atómicos O^+ y N^+ . Sin embargo, este efecto de a-

nomalía no se manifiesta en los iones moleculares. Este hecho merecerá atención en otro trabajo.

DISCUSION

Parte I: Consideraciones físico-químicas

La serie completa de ecuaciones de continuidad para O^+ , O_2^+ , N^+ , N_2^+ y NO^+ , que no reproducimos aquí por razones de brevedad, están dadas en M. NICOLET (1963), incluyendo en ellas todos los términos de producción y pérdida posibles. Realizadas algunas simplificaciones surgidas de la comparación de términos, y considerando en un primer intento nulo el término de transporte en las derivadas convectivas, integra las ecuaciones llegando a los siguientes resultados:

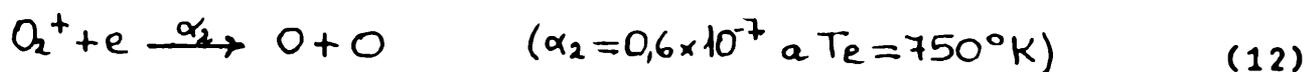
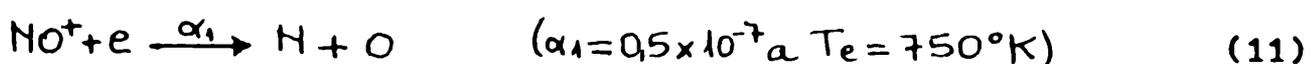
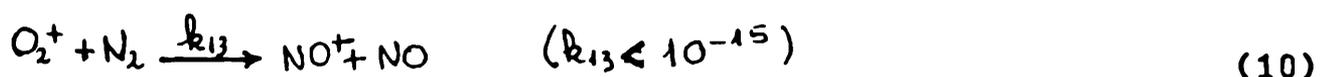
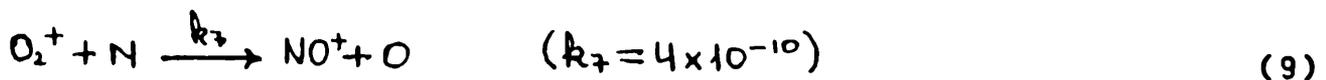
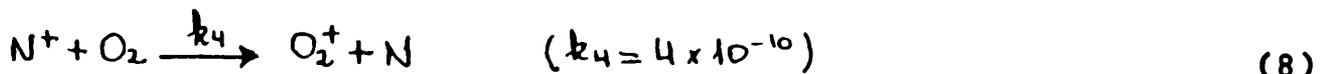
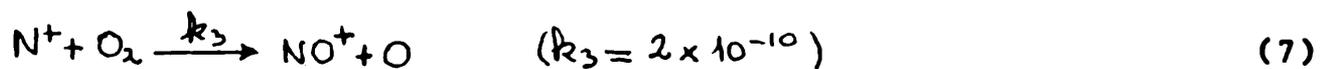
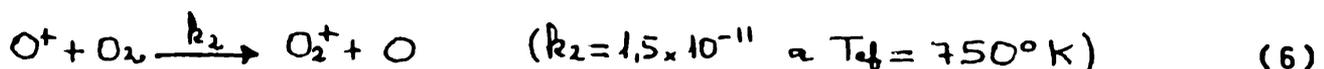
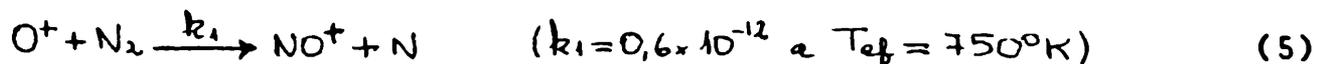
$$[O^+] = [O^+]_0 e^{-\{k_1[N_2] + k_2[O_2]\}t} + \frac{I(O)[O]}{k_1[N_2] + k_2[O_2]} \left\{ 1 - e^{-\{k_1[N_2] + k_2[O_2]\}t} \right\} \quad (1)$$

$$[O_2^+] = \frac{[O_2] \{I(O_2) + k_2[O^+]\}}{\alpha_2[e] + k_7[N] + k_{13}[N_2]} \quad (2)$$

$$[NO^+] = \frac{[N_2] \{k_1[O^+] + k_{13}[O_2^+]\} + k_7[N][O_2^+]}{\alpha_1[e]} \quad (3)$$

$$[N^+] = [N^+]_0 e^{-(k_4 + k_3)[O_2]t} + \frac{I(N)[N_2]}{(k_4 + k_3)[O_2]} \left\{ 1 - e^{-(k_4 + k_3)[O_2]t} \right\} \quad (4)$$

En estas expresiones $[X]$ indica concentración (cm^{-3}), I el coeficiente de fotoionización (seg^{-1}), α el coeficiente de recombinación disociativa ($\text{cm}^3 \text{seg}^{-1}$) y k los coeficientes de intercambio ($\text{cm}^3 \text{seg}^{-1}$). Las reacciones que aparecen en las ecuaciones (1) a (4) son las siguientes:



Los diferentes coeficientes fueron obtenidos de TORR y TORR (1979) y de Mc EWAN y PHILLIPS (1975).

Las ecuaciones (4) y (1) muestran la tendencia de N^+ de estar presente a elevadas alturas en comportamiento análogo al de O^+ , aunque con una concentración menor que depende de la ionización disociativa de N_2 .

Estimaremos ahora los términos que aparecen en las ecs. (2) y (3).

$$[O_2^+] = \frac{[O_2] \{I(O_2) + k_2 [O^+]\}}{\alpha_2 [e] + k_7 [N] + k_{13} [N_2]} \quad (2)$$

$$\therefore [O_2^+] = \frac{[O^+] \{k_2 [O_2] + \frac{[O_2]}{[O^+]} I(O_2)\}}{\alpha_2 [e] + k_7 [N] + k_{13} [N_2]} \quad (13)$$

$$[NO^+] = \frac{[N_2] \{k_1 [O^+] + k_{13} [O_2^+]\} + k_7 [N] [O_2^+]}{\alpha_1 [e]} \quad (3)$$

$$\therefore [NO^+] = [O_2^+] \left\{ \frac{k_7 [N] + k_{13} [N_2] + k_1 [N_2] \frac{[O^+]}{[O_2^+]}}{\alpha_1 [e]} \right\} \quad (14)$$

con

$$[e] \cong 2 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

$$[N] \text{ (} ^2D + ^4S \text{)} = 5,7 \times 10^6 \text{ cm}^{-3} \text{ (a las 14 hs TL y } \theta_s = 50^\circ \text{) (de SCHUNK y NAGY, 1978)}$$

$$[O_2] = 1,4 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-3} \quad (\text{JACCHIA, 1977})$$

$$[N_2] = 3 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$$

$$[O^+] \cong 3 \times 10^5 \text{ cm}^{-3} \quad (\text{Fig. 1})$$

$$I(O_2) = 4 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \quad (\text{TORR y TORR, 1979})$$

$$\frac{[O^+]}{[O_2^+]} = \frac{\alpha_2 [e] + k_7 [N] + k_{13} [N_2]}{k_2 [O_2] + \frac{[O_2]}{[O^+]} I(O_2)}$$

En esta expresión:

$$\text{a) } \alpha_2 [e] = 1,68 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$\text{b) } k_7 [N] = 0,23 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$\text{c) } k_{13} [N_2] = 3 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \quad \text{despreciable frente a (a) y (b)}$$

$$\text{d) } k_2 [O_2] = 0,21 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

$$\text{e) } \frac{[O_2]}{[O^+]} I(O_2) = 2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1} \quad \text{También despreciable frente a (d)}$$

En consecuencia, obtenemos:

$$\frac{[O^+]}{[O_2^+]} \cong \frac{\alpha_2 [e] + k_7 [N]}{k_2 [O_2]} = q_1$$

De la ecuación (14) obtenemos:

$$\frac{[NO^+]}{[O_2^+]} = \frac{k_2[N] + k_1[N_2]}{\alpha_1[e]} = 1,1$$

En estas expresiones se han considerado los valores de k_1 y k_2 que se obtienen de las expresiones de Torr y Torr, cuando la temperatura efectiva es de unos $750^\circ K$, adecuada a la época de medición.

El resultado último nos dice algo que se ve experimentalmente en la Fig. 7; es decir que para el rango de alturas que nos interesa $[NO^+]$ debe ser aproximadamente igual a $[O_2^+]$.

Realizaremos ahora una estimación de los valores estacionarios que aparecen en las ecs. (1) y (4). Para ello se usan los coeficientes de ionización dados por TORR y TORR (1979) y concentraciones de neutros dadas por el modelo de JACCHIA (1977). Con,

$$I(O) = 2,9 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \text{ (día) para la producción de } O^+ \text{ en sus tres estados.}$$

$$I(N) = 1 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \text{ (día) para la acción sobre } N_2 \text{ solamente,}$$

$$[N_2] = 3 \times 10^8 \text{ cm}^{-3},$$

$$[O_2] = 1,4 \times 10^7 \text{ cm}^{-3},$$

$$[O] = 1 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$$

se obtiene:

$$[O^+] \text{ est} = 8 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

$$[N^+] \text{ est} = 3,5 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

ambos valores dentro del orden de lo observado por el satélite S3-2 (Fig. 1), para mediciones nocturnas y en condiciones magnéticas tranquilas.

Para el caso del O^+ el término de producción q está dado por

$$q(O^+) = [O] \cdot I(O) = 290 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

Para el N^+ ,

$$q(N^+) = [N_2] \cdot I(N) = 30 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

donde N^+ es producido por fotoionización disociativa del N_2 , ocasionada por radiación ultravioleta.

Se puede afirmar que la producción está dada por 4 procesos:

$$q = q_{\text{solar}} + q_{\text{disp}} + q_{\text{mol}} + q_{\text{fotel}} \quad (15)$$

donde q_{solar} corresponde a los iones generados por incidencia de radiación solar directa, que obviamente desaparece en la noche; q_{disp} que corresponde a ionización nocturna producida por radiación solar

que, proveniente del sector diurno, es dispersada en el sector nocturno de la atmósfera (el sol debajo del horizonte); q_{mol} corresponde a intercambios con moléculas o átomos, y q_{fotel} que corresponde a la ionización por fotoelectrones.

En la expresión (15) tenemos para el caso del O^+ :

$$q_{\text{mol}} = k_3 [O] [N_2^+] + k_4^* [N] [O_2^+] \quad (16)$$

que surge de la ecuación de continuidad para O^+ dada por NICOLET (1963). El 2º sumando es significativo solo cuando O_2^+ está en estado excitado. Con los valores de N_2^+ dados por Fig. 1 y de O dado por el modelo de Jacchia, resulta:

$$q_{\text{mol}} \approx k_3 [O] [N_2^+] = 3 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

Para q_{disp} tenemos la expresión:

$$q_i = n_i I_i$$

donde n_i es la concentración del constituyente i ,

$$I_i = \sum F_{\ell} \sigma_{\ell,i}$$

donde $\sigma_{\ell,i}$ es la sección eficaz de fotoionización para la i -ésima especie a la longitud de onda ℓ , y

$$F_{\ell}(\bar{x}, \theta_s) = \int Y_{\ell}(\bar{x}, \theta_s, \Omega) d\Omega$$

el flujo de fotones para la ℓ -ésima longitud de onda que llega al nivel \bar{x} , con ángulo cenital θ_s

$$Y_{\ell} = \text{intensidad en fotones cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

Con los valores dados por STROBEL y otros (1974) y TORR y TORR (1979), para los diferentes parámetros y para el caso nocturno donde solo pueden tener significancia las radiaciones Lyman α y β , He I y He II, se obtiene:

$$q_{\text{disp}}(O^+) = [O] I(O) = [O] \sum F_{\ell} \sigma_{\ell,O} = 0,04 \text{ iones cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

Torr y Torr consideran que la ionización producida por fotoelectrones constituye globalmente un 25% de toda la ionización anterior.

De lo calculado se deduce que $q(O^+)$ producido durante la pre-medianoche por procesos moleculares y radiaciones, es despreciable

comparado con el valor estacionario de $290 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$.

La situación del N^+ debe ser análoga, por lo que se considera innecesario calcularlo.

De todo lo analizado y calculado anteriormente se concluye que es evidente la existencia de transporte de ionización, y en consecuencia no puede despreciarse este término en las ecuaciones de continuidad. Es decir que deben considerarse todos los términos de la deriva convectiva. Por ejemplo,

$$\frac{d[O^+]}{dt} = \frac{\partial[O^+]}{\partial t} + \text{div}(n\vec{V})$$

donde \vec{V} es el vector velocidad de difusión o transporte de iones O^+ . Esta difusión o transporte fijará el máximo de Nm F2 dado que $[e] \approx [O^+]$.

Parte II: Consideraciones dinámicas

Remitiéndonos especialmente al período de profunda bajada en la concentración iónica en latitudes subecuatoriales (Fig.2), el comportamiento de NmF2 (Fig.3) y CET (Fig.5), nos está indicando una evidente competencia entre el mecanismo generador de la anomalía ecuatorial, "efecto fuente", y el mecanismo que después de ser producido en la zona auroral por la subtormenta, se propaga hacia bajas latitudes. Este último mecanismo es generado por calentamiento Joule y precipitación de partículas a lo largo de las líneas de campo magnético (corrientes de Birkeland) en el anillo auroral. Esta inyección de energía produce calentamiento de la atmosfera neutra arriba de los 100 km, generando en consecuencia procesos de convección con circulación hacia bajas latitudes, a los cuales se suman oscilaciones de la atmósfera con sus consecuentes caminos de propagación. Estos dos procesos, arrastran lógicamente a la componente ionizada, ocasionando así significativas variaciones en su comportamiento.

En base a lo mencionado podemos decir que la subtormenta auroral trata de acumular ionización en bajas latitudes y el efecto fuente trata de hacer lo contrario. De los resultados obtenidos no existe duda de que el mecanismo de subtormenta es predominante, por lo menos hasta los 25° S aproximadamente, donde se produce el equilibrio. Esta latitud es también el punto de partida del incremento rápido de los iones hacia bajas latitudes, alcanzando su valor mayor en el ecuador geomagnético. La normalización que se observa en el comportamiento de NmF2 hacia mayores latitudes que los 40° S , está también prácticamente reflejada en la concentración iónica (Radi-cella y otros, 1982).

Un ligero análisis puede corroborar lo dicho. Así como hemos calculado la velocidad de variación de NmF2 para la latitud de Tucumán, que nos dió alrededor de $55 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$, podemos hacerlo para Huancayo en el ecuador magnético. Allí, para el mismo lapso usado anteriormente (22 a 23 hs TEL), Nm creció desde 13×10^5 a $15 \times 10^5 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$; lo que nos conduce a idéntica velocidad de crecimiento en el ecuador, que de decrecimiento en la latitud de Tucumán. No podemos comparar el valor absoluto de la concentración electrónica con la iónica total, que tendrían que ser iguales, dado que el satélite pasó a 245 km de altura mientras que Nm fué medido cuando el pico de región F estaba alrededor de los 390 km. Sin embargo, si buscamos un lugar equivalente a Tucumán en Figuras 2 y 4, en las cercanías de 15°N de latitud geomagnética, encontramos que el satélite pasó a unos 350 km. Siguiendo la órbita a mayores alturas vemos que las concentraciones iónicas son similares, por lo que podemos considerar que el valor de la concentración iónica total en el punto elegido, es típico de los valores sobre Tucumán a 390 km. Por supuesto, estamos aceptando simetría en todos los mecanismos actuantes sobre ambos hemisferios. Con este criterio, la Fig.4 nos dice que la concentración iónica total $[Y_t^+] \approx [O^+] \approx 6 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ coincidente con el dato de Tucumán previo al decrecimiento en Nm, y la Fig.2 nos lleva a $[O^+] = 3 \times 10^5$, también cercano al de Tucumán. Estos últimos resultados nos están diciendo que, a pesar de que el satélite no está midiendo en el pico de concentración de la región F, las velocidades de reducción de la concentración son similares tanto a los 245 como a los 390 km, y estas a su vez iguales a la velocidad de crecimiento en la zona ecuatorial magnética, como vimos antes, zona en la que la altura del máximo Nm, hpF2, se acerca a la altura de medición del satélite. Esto último también es confirmado por el satélite S3-2 a través de las Figs. 2 y 4, pues tomando puntos cercanos al ecuador y a la altura de ~ 300 km (hpF2 para Huancayo), la velocidad de incremento en $[O^+]$ es del orden de $65 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$, valor similar a los anteriores teniendo en cuenta las aproximaciones realizadas para poder comparar los diferentes parámetros.

Dos mecanismos podrían explicar el proceso observado de fase negativa entre 25°S y 40°S , y fase positiva desde 25°S hacia el ecuador y aún más allá. El primero está relacionado con el ascenso o descenso de flujo de H^+ plasmasférico, según el signo del campo eléctrico resultante de los campos de convección y corrotacional. Pa-

ra bajos L (hasta $L = 4$ a 5), y en condiciones normales, el campo plasmasférico es radial, por lo que no puede existir deriva vertical. El juego entre ionosfera y plasmasfera consiste en el mantenimiento de la igualdad de concentraciones en la ionósfera, y a lo largo del tubo de flujo que partiendo de latitudes medias o bajas llega al ecuador. Esto implica, para este mecanismo sobre el cual no existen dudas, que durante el día la ionización sube de la ionosfera a la plasmasfera y de noche el proceso se invierte. Este acoplamiento mantiene los valores de concentración nocturnos, inesperados si se los analiza desde el punto de vista de producción de ionización por radiación o por impactos. Según la hipótesis de Murphy (1974), en condiciones perturbadas una deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ a elevadas alturas en el ecuador nocturno, incluso correspondientes a la parte interior de la lengua de plasma, lleva a una compresión de plasma hacia valores más bajos de L cuando el campo de convección alba-crepúsculo, que predomina a esas alturas, se intensifica. Esta compresión de plasma en la zona ecuatorial, al ser equilibrada por el plasma a bajos L, busca camino de salida a lo largo de los tubos de flujo magnético dado el gradiente de presión existente entre sus extremos. En este caso desciende H^+ hacia la ionosfera, más allá de la zona de transición (alrededor de los 700 km para Tucumán). Este H^+ reacciona con el O neutro de la ionosfera superior a través de la reacción resonante de intercambio



En este caso el nuevo perfil de O^+ lleva a un incremento en NmF2, aunque la capa F haya bajado. Esto se acercaría al comportamiento de la zona ecuatorial donde las concentraciones suben y la altura de pico hpF2 baja. Sin embargo, a latitudes como las de Tucumán y mayores, el efecto es contrario, lo que estaría más bien conectado con un enrarecimiento de la concentración de plasma en la parte superior del tubo de flujo. Esto por su lado implica un decrecimiento del campo de convección para valores mayores de L en la magnetosfera. Los modelos y los resultados experimentales indican que este comportamiento tan disímil no es característico de la lengua de plasma donde el campo de convección magnetosférico se puede considerar casi homogéneo. Sin embargo, el esquema en la plasmasfera, que posee campos radiales en condiciones tranquilas, es muy complejo durante subtormentas. El campo de convección puede penetrar hasta bajas latitudes distorsionando completamente el campo corotacio-

nal, originando perfiles de campo eléctrico cambiantes en dirección.

La demasiada complejidad más que la certeza, nos lleva a inclinarnos por el tradicional mecanismo de vientos horizontales que "barrén" ionización de latitudes medias y bajas, elevándola a lo largo de los tubos de flujo por los caminos de superior conductividad, hacia la región ecuatorial. Este esquema más simple justifica la fase negativa en latitudes bajas y la positiva en zona ecuatorial.

Con todo, el mecanismo debe ser más complejo, dado que a pesar del exceso en NmF2 en zona ecuatorial, esta concentración decrece desde las 23 hs TEL a las 24 hs TEL, indicando que debe existir un refuerzo del campo eléctrico hacia el Este en el ecuador con elevación de plasma y redistribución del mismo a mayores alturas.

En consecuencia, en el segundo caso tenemos la combinación de dos mecanismos, arrastre por viento neutro hacia el ecuador y deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ en el ecuador a mayores alturas.

Un efecto que no consideramos hasta ahora es el de la corriente de anillo, situada entre valores de L que van desde 3 a 5 y que genera el campo magnético que se opone al terrestre. De allí, las bahías negativas en la componente H. Esta corriente para producir depresión en H debe estar dirigida hacia el Oeste, siendo realmente la resultante entre una corriente interna al anillo dirigida al Este y una externa en sentido Oeste. Esta última predomina. De ahí, la corriente neta en dirección Oeste. El campo eléctrico asociado a esta corriente de anillo justificaría una deriva vertical hacia arriba pero si el campo eléctrico del anillo apuntara el Este, hecho que está en contradicción con el signo de Dst, que muestra tendencia a hacerse más negativo en el período bajo análisis.

El comportamiento de hpF2 en el caso de Tucumán y Huancayo, reforzarían el sentido de las respectivas fases negativa y positiva. En Tucumán, hp sube entre las 22 y las 23 hs, llevando la ionización a zonas de menor pérdida por recombinación. Es decir, la fase negativa sería más intensa si la capa no hubiera subido. En el caso de Huancayo la situación es inversa. La capa baja a zonas de mayor recombinación, por lo que la fase hubiera sido más positiva si la capa no hubiera bajado.

Todo este complejo panorama dinámico debe ser consecuencia de la tercera micro-subtormenta iniciada a lo sumo hacia las 23 hs de TEL. No puede ser consecuencia de la subtormenta principal que se extiende desde las 12 hs hasta las 06 hs del día siguiente (28 de marzo). Si se observa con cuidado, la segunda micro-subtormenta ini

ciada a lo sumo a las 19 hs, genera una secuencia de procesos casi análoga a la anterior, con algunas diferencias aparentes en el comportamiento de hp (no representada). Aquí para Tucumán la capa baja en lugar de subir. Esto significa mayor recombinación, hecho que se observa en los datos de Nm (no representados) los que muestran una fase negativa mucho más intensa que la de las 23 hs.

Por fin, merece señalarse la drástica erosión en la ionización ocurrida en zona ecuatorial entre 00 y 01 hs de TEL, cuándo prácticamente todas las estaciones se normalizan. Este proceso debe estar asociado con un intenso campo hacia el Este, que originaría una rápida deriva hacia arriba y reacomodamiento de la ionización. El retorno al estado normal de todos los registros de la red no avalan un mecanismo de viento neutro para este evento. El mismo merece ser estudiado con más detenimiento en un trabajo futuro.

BIBLIOGRAFIA

- Jacchia, L.G.; 1977: "Thermospheric temperature, density, and composition: new models", Smithsonian Astrophysical Observatory, Special Report 375.
- Mc Ewan, M.J. y Phillips, L.F.; 1975: "Chemistry of the Atmosphere, Pub. Edward Arnold - Londres.
- Murphy, J.A.; 1974: "Numerical studies of some aeronomic processes" Tesis Doctoral, Universidad de Sheffield, Inglaterra.
- Nicolet M.; 1963: "La constitution et la composition de l'atmosphère superieure", Geophysics, The Earth's Environment. Pub. Gordon and Breach.
- Philbrick, C.R., Lammerzahl, P., Neske, E. y Dumbs, A.; 1981: "Comparison of plasma densities in the daytime polar F-region measured by the AEROS-B and S3-1 satellites", J.Atmos.Terr.Phys., 43, 1081 - 1091.
- Radicella, S.M., Manzano, J.R. y Ortiz de Adler, N.; 1982: "Satellite and ground observations of a marked negative phase during the recovery of an ionospheric storm", Enviado para su publicación al J.Atmos.Terr.Phys.
- Schunk, R.W. y Nagy A.F.; 1978: "Electron temperatures in the F re-

gion of the ionosphere; theory and observations", Rev. Geophys. Space Phys., 16, 355 - 399

Strobel D.F., Young T.R., Meier R.R., Coffey T.P. y Ali A.W.; 1974: "The nighttime ionosphere: E region and lower F region", J. Geophys. Res., 79, 3171 - 3178.

Torr D.G. y Torr M.R.; 1979: "Chemistry of the thermosphere and ionosphere", J. Atmos. Terr. Phys., 41, 797 - 839.

EPIGRAFES DE LAS FIGURAS

Figura 1: Perfiles de composición iónica medidos por el satélite S3-2, en función del tiempo, mostrándose además latitud y longitud geográficas, latitud geomagnética, altura y tiempo local. Órbita 1550.

Figura 2: Idem Figura 1. Órbita 1592.

Figura 3: Perfiles latitudinales de concentración electrónica, N_e , y altura de pico, h_p , determinados en base a ionogramas de la red sudamericana de sondadores verticales.

Figura 4: Idem Figura 1. Órbita 1591.

Figura 5: Contenido electrónico medido sobre Tucumán en base a datos del satélite INTASAT.

Figura 6: Índices ecuatorial magnético, Dst, y auroral magnético, AE, para el período 25/3/76 al 28/3/76.

Figura 7: Idem Figura 1, pero para el satélite S3-1 y órbita 1581.

