

VARIACION DE LAS DENSIDADES IONICAS CON LA ACTIVIDAD SOLAR

M.C. Azpiazu* y S. Duhau**

Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad de Buenos Aires

RESUMEN

Para calcular la composición de la región E de la ionósfera para actividad solar alta es usual que se cuadruplica la radiación solar incidente medida de manera que los perfiles electrónicos obtenidos coincidan con los observados. Con el fin de analizar la causa de esta discrepancia en el presente trabajo se resuelve el sistema de ecuaciones de continuidad de los iones en la región E para dos actividades solares, una alta ($F_{10,7} = 166$) y otra baja ($F_{10,7} = 76$). Para ello se utilizan perfiles de temperatura y densidad electrónica medidos simultáneamente y espectros de flujo solar observados en condiciones equivalentes. Se encuentra que la discrepancia entre el flujo solar medido y el requerido en los cálculos teóricos se debe a la suposición de equilibrio térmico entre electrones y gas neutro.

ABSTRACT

In order to calculate the composition of the Ionospheric E-region, the measured incident solar radiation is usually multiplied by four so that the electron density profiles obtained may agree with the observed profiles. In the present work, in order to analyze the cause of this discrepancy, the system of ionic continuity equations in the E-region is solved for two solar activities, one high ($F_{10,7} = 166$) and the other low ($F_{10,7} = 76$). For this purpose, simultaneous measurements of temperature and electron density, and solar flux spectra observed under equivalent conditions, are used. The discrepancy between the measured solar flux and the one required in the other theoretical calculations is due to the assumption of thermal equilibrium between the electrons and the neutral gas.

* Becaria del CONICET.

** Miembro de la Carrera del Investigador del CONICET

1. INTRODUCCION

Las densidades relativas de las dos especies ionizadas predominantes en la región E, O_2^+ y NO^+ , varían fuertemente con la actividad solar. Se han elaborado modelos semiempíricos, como el de Mitra y Banerjee (1972), que los reproducen. Estos autores encuentran que el cociente de densidades, $n(NO^+)/n(O_2^+)$, aumenta con la actividad solar y atribuyen este comportamiento a un crecimiento en las concentraciones de NO y N que deberían también aumentar fuertemente con la actividad solar tomando un valor siete veces más grande a alta que a baja actividad.

Sin embargo, los modelos teóricos propuestos (ver por ejemplo Chakrabarty y otros, 1978; Roble y otros, 1978) no reproducen las variaciones de $n(NO^+)/n(O_2^+)$ observadas. Azpiazu y Duhau (1981) han elaborado un modelo teórico de formación de la región E que se aplica en el presente trabajo al cálculo de las densidades iónicas relativas en dos condiciones solares extremas en días quietos. Para ello se han analizado las variaciones con la actividad solar de los parámetros físicos y se han utilizado mediciones simultáneas realizadas con sondas de Langmuir de densidad y temperatura electrónicas y espectros de flujo solar incidente correspondientes a las mismas actividades solares y a índices magnéticos muy bajos.

2. VARIACION CON LA ACTIVIDAD SOLAR DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS CONSTITUYENTES IONOSFERICOS Y DEL MONOXIDO DE NITROGENO

Como en la región E las concentraciones de los constituyentes minoritarios, de la atmósfera, N y NO, dependen fuertemente del estado de ionización (ver por ejemplo Kondo y Ogawa, 1977), en este trabajo se analizan sus variaciones con la actividad solar junto con la de las especies ionizadas, aunque no haya mediciones simultáneas en la bibliografía.

2.1. Mediciones

Las mediciones de densidades de iones en la región en estudio muestran que durante el día, excluyendo el amanecer y el atardecer, predomina el NO^+ cuando la actividad solar es alta (ver por ejemplo Istomin, 1963 y Taylor y Brinton, 1961). En cambio, para baja actividad solar, predomina el NO^+ hasta ~ 110 km, en que pasa a ser mayoritario el O_2^+ (ver por ejemplo Johnson, 1966). Mitra y Banerjee (1972) han estudiado esta variación y presentan dos promedios de mediciones realizados en condiciones solares extremas (ver figs. 1 a y b curvas 1), y como ya dijimos, atribuyen esta variación a un cambio en las concentraciones de N y NO.

En cuanto a las concentraciones de N y NO las mediciones son escasas, no habiendo en la literatura ninguna que corresponda a alta actividad solar a latitudes medias. En la región E se puede afirmar que la concentración de N es 100

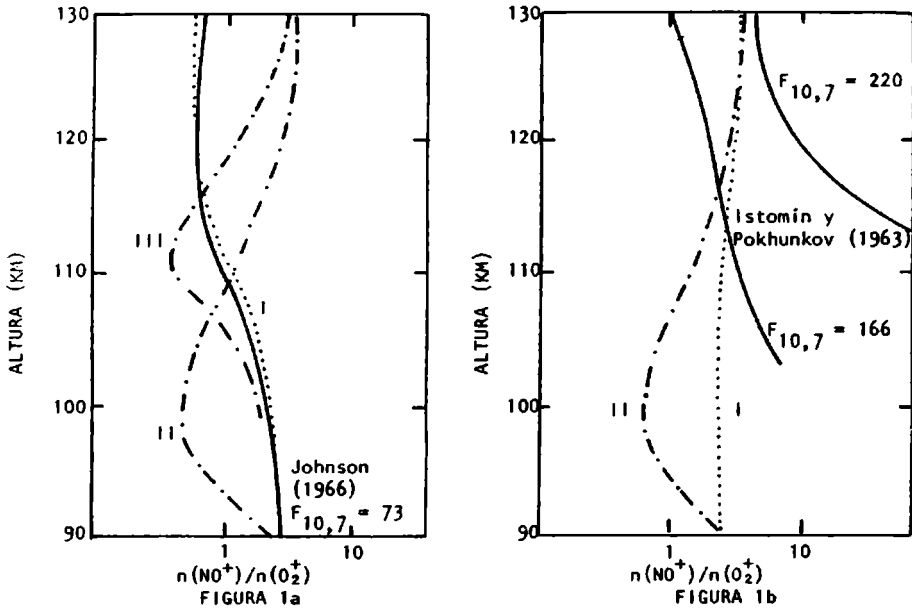


FIGURA 1: Perfil de densidades iónicas relativas para: a) baja y b) alta actividad solar. Mediciones en línea llena. Promedio de Mitra y Banerjee (1972): I; resultados de Chakrabarty y otros (1978): II, y de Roble y otros (1978): III.

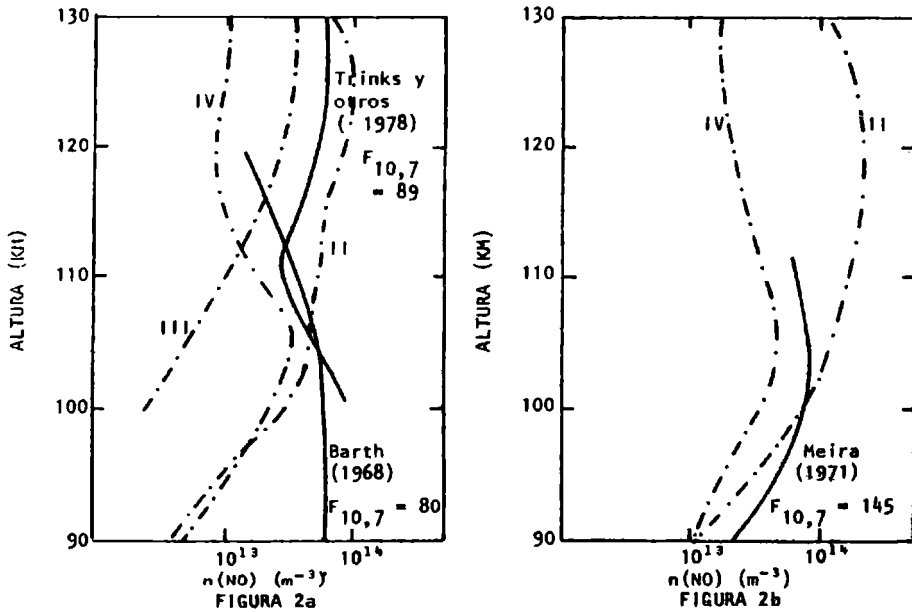


FIGURA 2: Perfil de densidad de NO para: a) baja y b) alta actividad solar. Curvas II y III ídem Figura 1. Resultado de Kondo y Ogawa (1977): curva IV.

veces menor que la de NO y por lo tanto en este trabajo estudiaremos esta última especie exclusivamente.

En las figs. 2a y b se han graficado las diversas mediciones diurnas de [NO] a latitudes medias e indicado su correspondiente $F_{10,7}$. Obsérvese que la concentración de este constituyente en la base de la región E disminuye cuando la actividad solar aumenta.

2.2. Resultados teóricos

Chakrabarty y otros (1978) han elaborado un modelo de formación de región E y calculan las densidades iónicas relativas y la densidad electrónica para alta y baja actividad solar, ajustando perfiles de concentración de N y NO. Para reproducir las mediciones de densidad electrónica a alta actividad solar deben cuadruplicar el flujo solar incidente en el rango de rayos X, sin embargo no reproducen correctamente la variación con la actividad solar de las densidades iónicas (ver figs. 1a y b curvas II).

Roble y otros (1978) elaboran un modelo de formación de las regiones E y F y lo aplica a un caso particular, en que el satélite AE-C ha descendido hasta los 160 km sobre Millstone Hill. A pesar de la coincidencia entre sus cálculos y las mediciones a esa altura es de notar que, en región E, predicen un predominio de NO^+ en casi toda la región salvo a los 110-115 km en que $[\text{NO}^+] \approx [\text{O}_2^+]$ (ver fig. 1a, curva III).

Por otra parte, hay un buen acuerdo entre las mediciones de NO y el perfil propuesto por Chakrabarty y otros (1978) para alta actividad solar; (ver fig. 2b, curva II) sin embargo, a baja actividad sus resultados sólo son compatibles con las mediciones por encima de ~ 105 km, siendo la diferencia de hasta un orden de magnitud en la base de la región E (ver fig. 2a, curva II). En la fig. 2a se ha graficado además el resultado del modelo de Roble y otros (1978) (curva III). Nótese que este perfil está de acuerdo con las mediciones por encima de ~ 112 km.

Otros autores como por ejemplo Kondo y Ogawa (1977) han estudiado específicamente la química del NO y han hallado perfiles de concentración del mismo que ajustan bien las mediciones a actividad solar moderada no ocurriendo lo mismo a baja actividad para la cual subestiman la concentración de NO en toda la región E (ver figs. 2a y b, curvas IV).

3. PREDICCIÓN DE LAS VARIACIONES CON LA ACTIVIDAD SOLAR DE

$$n(\text{NO}^+)/n(\text{O}_2^+) \text{ Y DE } n(\text{NO})$$

En el presente trabajo se utiliza el modelo teórico de formación de la región E elaborado por Azplazu y Duhau (1981) para calcular las variaciones con la actividad solar de las densidades iónicas relativas y del NO. Por ello en lo que sigue se resume ese modelo y se describe la metodología utilizada en la selección

de los parámetros en su aplicación a los dos casos mencionados en la introducción.

3.1. Modelo teórico

El modelo de Azpiazu y Duhau (1981) es aplicable a latitudes medias, en horas cercanas al mediodía de días geomagnéticamente quietos. En estas condiciones la región E está en equilibrio fotoquímico y si se tienen en cuenta todas las reacciones químicas factibles (ver Tabla I) y se calculan las vidas medias de los

Tabla I

Reacción	Velocidad de reacción (cm^3s^{-1})	Referencia
(1) $\text{O}^+ + \text{NO} \rightarrow \text{N} + \text{O}_2^+$	$\ll 1,3 \times 10^{-12}$	Banks y Kockarts, 1973
(2) $\text{O}^+ + \text{NO} \rightarrow \text{O} + \text{NO}^+$	2×10^{-11}	Goldan y otros, 1966
(3) $\text{O}^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}_2^+$	$10^{-9} T^{-0,7}$	Chakrabarty y otros, 1978
(4) $\text{O}^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{N} + \text{NO}^+$	$1,2 \times 10^{-12} (300/T_v)^{0,8}$	M.R. Torr y otros, 1977
(5) $\text{O}^+ + e \rightarrow \text{O}$	$4 \times 10^{-12} (T_e)^{-0,78}$	Chakrabarty y otros, 1978
(6) $\text{N}_2^+ + \text{O} \rightarrow \text{N} + \text{NO}^+$	$2,5 \times 10^{-10}$	Ferguson, 1967
(7) $\text{N}_2^+ + \text{O} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}^+$	10^{-12}	Ferguson, 1967
(8) $\text{N}_2^+ + \text{NO} \rightarrow \text{N}_2 + \text{NO}^+$	$3,3 \times 10^{-10}$	Fehsenfeld y otros, 1970
(9) $\text{N}_2^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_2^+$	10^{-10}	Fite, 1969
(10) $\text{N}_2^+ + e \rightarrow \text{N} + \text{N}$	$2,9 \times 10^{-7} (300/T_e)^{1/3}$	Biondi, 1969
(11) $\text{O}_2^+ + \text{N} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{O}$	$2,5 \times 10^{-11}$	Frederick y otros, 1976
(12) $\text{O}_2^+ + \text{NO} \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}^+$	8×10^{-10}	Chakrabarty y otros, 1978
(13) $\text{O}_2^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{NO}^+$	$< 2 \times 10^{-16}$	Nicolet, 1965
(14) $\text{O}_2^+ + e \rightarrow \text{O} + \text{O}$	$2 \times 10^{-7} (300/T_e)$	Biondi, 1969
(15) $\text{NO}^+ + e \rightarrow \text{O} + \text{N}^+$	$5 \times 10^{-7} (300/T_e)$	Chakrabarty, 1978
(16) $\text{NO}^+ + e \rightarrow \text{N} + \text{O}$	$4 \times 10^{-7} (300/T_e)$	Biondi, 1969

productos resultantes, se puede considerar que los mecanismos activos de formación son los esquematizados en la figura 3. Nótese que el O, el N_2 y el O_2 son ionizados directamente por la radiación solar incidente pero sólo el O_2^+ es estable, el O^+ y el N_2^+ reaccionan rápidamente con los componentes neutros de la atmósfera intercambiando su carga con los mismos. Obsérvese, además, que los coeficientes de recombinación con los electrones son inversamente proporcionales a la

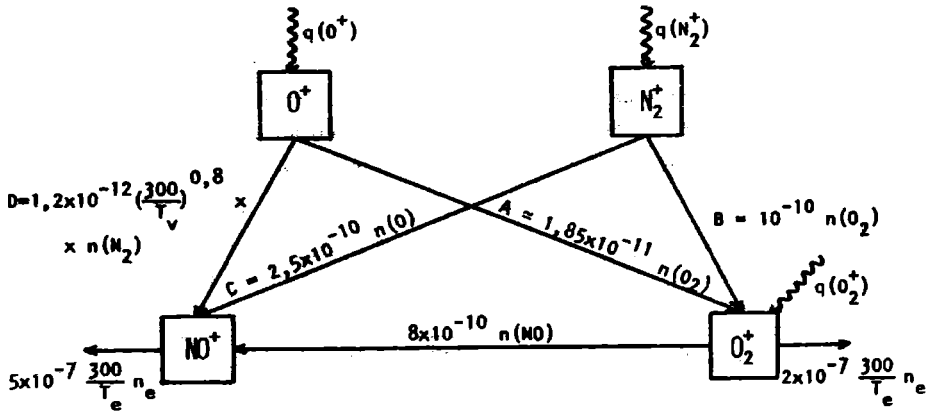


FIGURA 3

Esquema de formación de la región E.

temperatura electrónica y que el coeficiente de la reacción $O^+ + N_2 \rightarrow NO^+ + N$ depende de la temperatura vibracional del N_2 .

Por otra parte, como no existen iones negativos, la condición de cuasi-neutralidad eléctrica se reduce a:

$$n_e = n(NO^+) + n(O_2^+) \quad (1)$$

Teniendo en cuenta esta ecuación y las reacciones sintetizadas en la figura anterior es posible calcular las densidades de los dos iones predominantes así como del NO a partir de las siguientes ecuaciones:

$$n(NO) = \frac{[q(O_2^+) + A + B] k_{15} n_e + [C + D - k_{15} n_e^2] k_{14} n_e}{\{k_{15} n_e^2 - [q(O_2^+) + A + B + C + D]\} k_{12}} \quad (2)$$

$$n(O_2^+) = \frac{q(O_2^+) + A + B}{k_{14} n_e + k_{12} n(NO)} \quad (3)$$

$$n(NO^+) = \frac{k_{12} n(NO) + C + D}{k_{15} n_e} \quad (4)$$

donde:

$$A = k_3 n(O_2) n(O^+) \quad ,$$

$$B = k_9 n(O_2) n(N_2^+) \quad ,$$

$$C = k_6 n(O) n(N_2^+),$$

$$D = k_4 n(N_2) n(O^+),$$

con

$$n(O^+) = \frac{q(O^+)}{k_4 n(N_2) + k_3 n(O_2)}, \quad (5)$$

y

$$n(N_2^+) = \frac{q(N_2^+)}{k_6 n(O) + k_9 n(O_2)}, \quad (6)$$

siendo k_n la velocidad de la reacción n (ver Tabla 1).

Se calcula la velocidad de fotolonización de la especie ionizada i a la altura h :

$$q_i(h) = \int_0^{\infty} n_n(h) \phi_{\infty}(\lambda) \sigma_{abs,n}(\lambda) \eta_n(\lambda) e^{-\tau(\lambda,h)} d\lambda,$$

donde n_n es la densidad numérica del constituyente atmosférico ionizado, ϕ_{∞} es el flujo solar incidente en la atmósfera, σ_{abs} y η son la sección eficaz de absorción y eficiencia de ionización respectivamente, y

$$\tau(\lambda, h) = \int_h^{\infty} \sum_j n_j \sigma_{abs,j}(\lambda) \sec \chi dh,$$

donde χ es el ángulo cenital solar y el índice j caracteriza al constituyente atmosférico que absorbe radiación solar de longitud de onda λ por encima de h .

Obsérvese que contrario a lo usual en estas ecuaciones se ha elegido predecir el NO en vez de n_e . Aquí se ha preferido invertir la elección pues existen numerosas mediciones de n_e mientras que el comportamiento del perfil de NO en la región E es casi desconocido.

3.2. Metodología para la elección de los parámetros

Para calcular las variaciones con la actividad solar de las densidades iónicas relativas y del NO de acuerdo con las ecuaciones (2), (3) y (4) es necesario conocer las variaciones de la temperatura y densidad electrónica, del flujo solar incidente y de las densidades y temperatura de los constituyentes atmosféricos mayoritarios.

Duhau y Azplazu (1981) encontraron que cuando se utiliza un riguroso criterio de selección de días magnéticamente quietos: $K_p \leq 1^+$ durante todo el día y $A_p \leq 7$, datos de temperatura electrónica están mucho mejor correlacionados. Siendo este parámetro uno de los que más varían con la actividad magnética concluimos que, si además, como es usual, se selecciona el día por su actividad solar, se obtendrán condiciones reproducibles que permitirán aún en ausencia de mediciones simultáneas confiabilidad en la predicción. Los días así seleccionados serán

denominados equivalentes, y mediciones realizadas en esos días serán utilizadas cuando se carezca de mediciones simultáneas.

Los resultados de las mediciones de temperatura electrónica obtenidos con sondas de Langmuir y con radar de dispersión incoherente son contradictorios. Mientras que este último método predice equilibrio térmico entre los electrones y el gas neutro, las mediciones realizadas "in situ" dan cuenta de una temperatura electrónica superior a T_n y fuertemente variable con la actividad solar y geomagnética. Esta contradicción se resuelve cuando se calcula la temperatura electrónica a partir de las mediciones de absorción desviativa. Este último método predice, en el pico de densidad electrónica de la región E, una temperatura electrónica igual a la medida con sondas de Langmuir (Duhau y Azpiazu, 1981). Por lo tanto, en lo que sigue, se hará referencia sólo a las mediciones obtenidas mediante este método.

La región E es ionizada por la radiación solar en el rango de longitudes de onda entre 0,1 y 102,5 nm, es decir rayos X y UVL. La intensidad del flujo solar varía naturalmente con la actividad solar pero, si consideramos como índice de la misma el $F_{10,7}$, la ley de variación depende de la longitud de onda. Es así como Kreplin (1970), analizando los datos de los satélites NRL Solrad, encuentra que los registros de intensidad varían de actividad solar mínima a máxima en un factor 20 para bandas comprendidas entre 4,4 y 6,0 nm y un factor 200 cuando se miden las intensidades para longitudes de onda entre 0,1 y 0,8 nm. En el rango del ultravioleta lejano (UVL), las variaciones con $F_{10,7}$ no son siempre lineales; la correlación puede ser tanto positiva como negativa. Es por eso que se estudia el comportamiento por bandas y las extrapolaciones para actividades solares no medidas no son posibles. Sin embargo, debido a la falta de datos se recurre a relaciones entre el flujo en UVL y el flujo en 10,7 cm (Schmidtke, 1979).

4. RESULTADOS Y DISCUSION

Se ha aplicado el modelo de formación de la región E al cálculo de las densidades iónicas relativas y del ND en las dos condiciones extremas de actividad solar; $F_{10,7} = 166$ y $F_{10,7} = 76$.

Para evaluar estas densidades se han utilizado perfiles simultáneos de densidad y temperatura electrónicas obtenidas con ionosondadores y con sondas de Langmuir en días geomagnéticamente quietos: vuelo 6.02 realizado el 15 de junio de 1960 ($F_{10,7} = 166$, Spencer y otros, 1962) y vuelo 18.01 realizado el 19 de marzo de 1965 ($F_{10,7} = 76$, Brace y otros 1969). Para baja actividad solar se ha utilizado, en el cálculo de q_1 , el espectro de radiación solar incidente medido en condiciones equivalentes en abril de 1974 (Mason, 1976b) y para alta actividad solar, como no hay mediciones en todo el espectro, se han utilizado las mediciones reali-

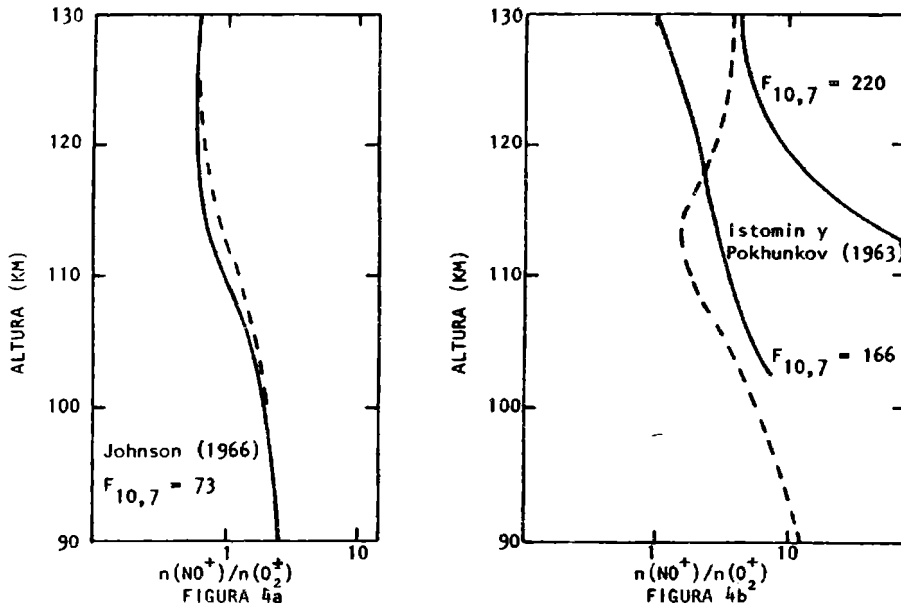


FIGURA 4: Perfil de densidades iónicas relativas para: a) baja y b) alta actividad solar. Mediciones en línea llena y resultados del presente trabajo en línea de trazos.

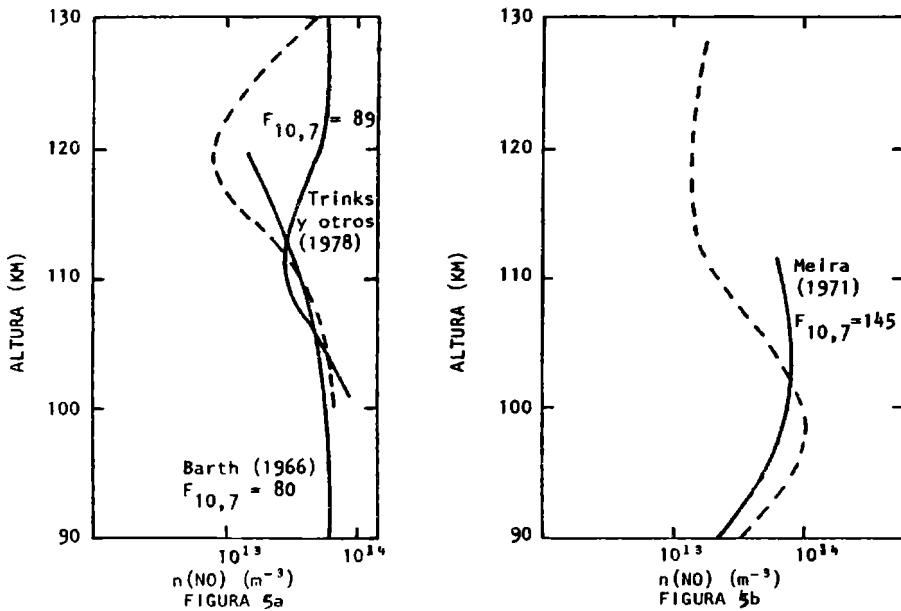


FIGURA 5: Perfil de densidad de NO para: a) baja y b) alta actividad solar. Mediciones en línea llena y resultados del presente trabajo en línea de trazos.

zadas por Mason (1976a y b), Hall y otros (1969), Heroux y otros (1975) y Higgins (1976) y se ha completado el espectro mediante las leyes de interpolación que estos autores suministran.

Las densidades de los constituyentes predominantes de la atmósfera y su temperatura han sido obtenidos del modelo de Jacchia (1977), considerando la temperatura exosférica $T_{\infty} = 700$ K para baja actividad solar y $T_{\infty} = 1100$ K para alta actividad solar.

De todas las recopilaciones de secciones eficaces de absorción y de ionización se ha usado la suministrada por Richmond (1972) ya que divide el espectro de radiación en las mismas bandas que los que miden la radiación solar incidente.

En la Figura 4a se han graficado las densidades iónicas relativas calculadas en el presente trabajo junto con el único perfil experimental equivalente, para baja actividad solar. Nótese que en estas condiciones el modelo elaborado reproduce cualitativa y cuantitativamente el perfil experimental.

En la Figura 4b se graficaron las densidades iónicas relativas para alta actividad solar. Las dos mediciones graficadas corresponden a días no perturbados, para la realizada el 15-6-60 el $F_{10,7} = 166$, y $F_{10,7} = 220$, el 22-6-59. El presente modelo predice el predominio de NO^+ en toda la región.

Los resultados del cálculo de la concentración de NO se han graficado en la Figura 5a. De las dos mediciones la realizada por Barth (1966) corresponde a una actividad solar menor ($F_{10,7} = 80$) que la de Trinks y otros (1978) ($F_{10,7} = 89$), por lo tanto es más válida la comparación con el primero. Nótese que se ha obtenido un buen acuerdo en el rango de alturas medido.

En la Figura 5b se presentan las densidades de NO para alta actividad solar y la medición que se ha realizado para más alta actividad solar ($F_{10,7} = 145$), que es la obtenida por Meira (1971). Aquí cabe notar que el modelo teórico reproduce cualitativamente el perfil experimental y el orden de magnitud medido en toda la región. La ausencia de mediciones a más alta actividad solar impide una comparación cuantitativa.

Agradecimientos: Este trabajo fue subvencionado por el CONICET como parte del Programa Nacional de Radiopropagación.

BIBLIOGRAFIA

- Azpiazu, M.C. y Duhau, S., 1981: Daytime E-region ion and nitric oxide densities (a publicar).
- Banks, P.M. y Kockarts, G., 1973: Aeronomy; Academic Press, New York y Londres.
- Barth, C.A., 1966: Rocket measurements of nitric oxide in the upper atmosphere;

- Planet. Sp. Sci., 14, 623.
- Biondi, M.A., 1969: Atmospheric electron-ion and ion-ion recombination processes; Can. J. Chem., 47, 1711.
- Brace, L.H., Mayr, H.G. y Carignan, G.R., 1969: Measurements of electron cooling rates in the mid-latitude and auroral zone thermosphere; J. Geophys. Res., 74, 257.
- Chakrabarty, P., Chakrabarty, D.K. y Bjorn, L., 1978: Solar activity variation of nitric oxide in the E-region and its Implications; J. Atmos. Terr. Phys., 40, 81.
- Duhau, S. y Azpiazu, M.C., 1981: Non-thermal equilibrium between electrons and neutrals at ionospheric E-region heights; Geophys. Res. Lett. (en prensa).
- Fehsenfeld, F.C., Dunkin, D.B. y Ferguson, E.E., 1970: Rate constants for the reaction of CO_2^+ with O, O_2 and NO; N_2^+ with O and NO; and O_2^+ with NO; Planet. Space Sci., 18, 1267.
- Ferguson, E.E., 1967: Ionospheric ion-molecule reaction rates; Rev. Geophys., 5, 305.
- Fite, W.L., 1969: Positive ion reactions; Can. J. Chem., 47, 1797.
- Frederick, J.E., Rusch, D.W., Victor, G.A., Sharp, W.E., Hays, P.B. y Brinton, H.C., 1976: The OI (6300 Å) airglow: observations and excitation mechanisms; J. Geophys. Res., 81, 3923.
- Goldan, P.D., Schmeltekopf, A.L., Fehsenfeld, A.L., Schiff, F.C. y Ferguson, E.E., 1966: Thermal energy ion-neutral reaction rates - II. Some reactions of ionospheric interest, J. Chem. Phys., 44, 4095.
- Hall, L.A., Higgins, J.E., Chagnon, C.W. y Hinteregger, H.E., 1969: Solar cycle variations of extreme ultraviolet radiation; J. Geophys. Res., 74, 4181.
- Heroux, L., Cohen, M. y Higgins, H.E., 1975: Improved calculations of electron densities between 110 and 300 km derived from the solar EUV fluxes of August 23, 1972; J. Geophys. Res., 80, 4732.
- Higgins, H.E., 1976: The solar EUV flux between 230 and 1220 Å on November 9, 1971; J. Geophys. Res., 81, 1301.
- Istomin, V.G. y Pokhunkov, A.A., 1963: Mass spectrometer measurements of atmospheric composition in the U.S.S.R.; Space Res. III, 117.
- Jacchia, L.G., 1977: Thermospheric temperature, density and composition: new models; Smithsonian Astrophys. Obs. Sp. Rep. 375.
- Johnson, C.Y., 1966: Ionospheric composition and density from 90 to 1200 km at solar minimum; J. Geophys. Res., 71, 330.
- Kondo, Y. y Ogawa, T., 1977: A temperature dependent model of the thermospheric odd nitrogen, J. Geomagn. Geoelectr., 29, 65.
- Krepin, R.W., 1970: The solar cycle variation of soft X-ray emission; Ann. Geophys., 26, 567.

- Mason, J., 1976a: The solar extreme ultraviolet between 30 and 205 Å on November 9, 1971, compared with previous measurements in this spectral region; J. Geophys. Res., 81, 1629.
- Mason, J., 1976b: Satellite measurements of solar UV during 1974; Air Force Cambridge Research Laboratories, Environmental Research Papers No. 546.
- Meira, L.G., 1971: Rocket measurements of upper atmospheric nitric oxide and their consequences to the lower ionosphere; J. Geophys. Res., 76, 202.
- Mitra, A.P. y Banerjee, P., 1972: Solar activity variation of $[NO^+]/[O_2^+]$ in the E and F regions; Space Res. XII, 1315.
- Nicolet, M., 1965: Ionospheric processes and nitric oxide; J. Geophys. Res., 70, 691.
- Richmond, A.D., 1972: Numerical model of the equatorial electrojet; AFCRL-72-0668.
- Roble, R.G., Stewart, A.I., Torr, M.R., Rusch, D.W. y Wand, R.H., 1978: The calculated and observed ionospheric properties during Atmospheric Explorer - C satellite crossings over Millstone Hill; J. Atmos. Terr. Phys., 40, 21.
- Schmidtke, G., 1979: Variability of solar ultraviolet flux and its significance to models of the neutral upper atmosphere; Space Res. XIX, 193.
- Spencer, M.W., Brace, L.H. y Cargan, G.R., 1962: Electron temperature evidence for non-thermal equilibrium in the ionosphere; J. Geophys. Res., 67, 157.
- Taylor, H.A. y Brinton, H.C., 1961: Atmospheric ion composition measured above Wallops Island, Virginia; J. Geophys. Res., 66, 2587.
- Torr, M.R., St. Maurice, J.-P. y Torr, D.G., 1977: The rate coefficient for the $O^+ + N_2$ reaction in the ionosphere; J. Geophys. Res., 82, 3287.
- Trinks, H., von Zahn, U., Barth, C.A. y Kelly, K.K., 1978: A joint nitric oxide measurement by rocket-borne ultraviolet photometer and mass spectrometer in the lower thermosphere; J. Geophys. Res., 83A, 203.