

## LA TEMPERATURA VIBRACIONAL DEL $N_2$ EN LA REGION E DE LA IONOSFERA II: ANALISIS DE LOS PARAMETROS Y RESULTADOS

A. de la Torre y S. Duhau\*

Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Universidad de Buenos Aires

### RESUMEN

Se evalúa la temperatura vibracional de  $N_2$ ,  $T_v$ , en la región E ionosférica, obteniéndose perfiles de dicho parámetro para baja, media y alta actividad solar en días geomagnéticamente quietos.

Para ello se analizó cuidadosamente la elección de parámetros intervinientes en el cálculo de  $T_v$ , evaluando la importancia de la variabilidad de cada uno de los perfiles de dicha temperatura. Asimismo se realizó una estimación de la incerteza que afecta a dicho cálculo a partir de un conocimiento de los errores relativos con que fueron obtenidos dichos parámetros. Se observa que la dependencia logarítmica de  $T_v$  con la densidad de cuantos vibracionales amortigua la influencia de la considerable incerteza existente en algunas variables fundamentales.

### ABSTRACT

The  $N_2$  vibrational temperature,  $T_v$ , in the ionospheric E-region has been calculated. Profiles of this parameter at low, medium and high solar activity and geomagnetically quiet days has been obtained.

To do so, the parameters of the model have been carefully selected and the importance of their variability in the  $T_v$  profiles has been analysed. From the relative errors in those parameters, an estimation of the error in  $T_v$  has been made. The logarithmic relation between  $T_v$  and the density of vibrational quanta reduces the influence of the considerable uncertainty of some of the variables.

\* Miembro de la Carrera del Investigador del CONICET.

## 1. INTRODUCCION

En un trabajo previo (de la Torre y Duhau, 1983) se llevó a cabo una revisión de todos los mecanismos de producción y pérdida de energía vibracional del gas de N<sub>2</sub> en la región E ionosférica, evaluando así la importancia relativa de cada uno de dichos procesos a fin de determinar cuales de estos son realmente significativos en el cálculo de T<sub>v</sub>. Se obtuvo como resultado que en el intervalo de altura considerado predominan los mecanismos de excitación por colisiones con átomos de O<sup>1</sup>D y de desactivación a través de los gases de CO<sub>2</sub> y O.

A fin de investigar la precisión con que se calcula T<sub>v</sub> y su variabilidad serán analizados cada uno de los parámetros intervinientes en el cálculo de los procesos mencionados, considerando las variaciones que los mismos sufren, ya sea debido a la incerteza con que fueran determinados o a las modificaciones de las condiciones atmosféricas e ionosféricas correspondientes. Teniendo en cuenta esto último es que se calculará T<sub>v</sub> para tres actividades solares 90 y 125 km de altura. Se tomarán latitudes medias y días geomagnéticamente quietos a fin de poder utilizar mediciones en condiciones equivalentes.

## 2. MODELO TEORICO

## 2.1. Ecuaciones del modelo

La expresión correspondiente a la temperatura vibracional del gas de N<sub>2</sub> en la región E de la ionósfera es (ver p.e. Varnum, 1972):

$$T_v = \frac{\Delta E}{k \ln\left(1 + \frac{\{N_2\}(z)}{\rho(z)}\right)} \quad (1)$$

donde  $\Delta E = 0.293$  eV,  $k$  es la constante de Boltzmann,  $\{N_2\}(z)$  es la concentración del gas de N<sub>2</sub> a una altitud  $z$  y  $\rho(z)$  representa la densidad de cuantos de vibración. A las alturas aquí consideradas, y teniendo en cuenta únicamente los procesos relevantes en la producción y pérdida de energía vibracional mencionados en apartado anterior, resulta:

$$\rho(z) = \left\{ k_3 \{CO_2\}(z) + k_4 \{O\}(z) \right\}^{-1} q_1(z) \quad (2)$$

donde  $k_3$  y  $k_4$  son los coeficientes de las reacciones de transferencia de la energía de vibración del N<sub>2</sub> a los gases de CO<sub>2</sub> y O.  $q_1(z)$  representa la producción de cuantos debido a la desactivación de los átomos de O<sup>1</sup>D en procesos de colisión con moléculas de N<sub>2</sub>, y es igual a (ver p.e. Busch y otros, 1975)

$$q_1(z) = \eta_1 \{O_2\}(z) \int_{1160}^{1750} \sigma_{O_2}(\lambda) \mu(\lambda) \cdot \left\{ \phi_{\infty}(\lambda) \exp(-\sigma_{O_2}(\lambda) \int_z^{\infty} \{O_2\}(z') \sec \chi(z') dz') \right\} d\lambda, \quad (3)$$

siendo  $\sigma_{O_2}(\lambda)$  la sección eficaz de absorción del  $O_2$ ,  $\mu(\lambda)$  el rendimiento cuántico de fotodisociación,  $\phi_{\infty}(\lambda)$  el flujo de radiación solar incidente en la exósfera,  $\chi$  el ángulo cenital solar y  $\eta_1$  es la eficiencia de producción de cuantos por colisión entre un átomo de O'D y una molécula de  $N_2$ .

## 2.2. Coeficientes de reacción

Una revisión exhaustiva del coeficiente  $k_3$  en base a mediciones propias y de otros autores ha sido llevada a cabo por Taylor y Bitterman (1969), quienes además realizaron un ajuste estadístico de dichos datos experimentales en función de la temperatura cinética de los gases de  $CO_2$  y  $N_2$  (ver figura 1). La variabilidad de dichos valores puede estimarse en menos de un 10%.

El coeficiente  $k_4$  ha sido obtenido experimentalmente por Mc Neal y otros (1972, 1974) (ver figura 1) quienes evaluaron que el error que afecta dichas mediciones es menor que el 40%.

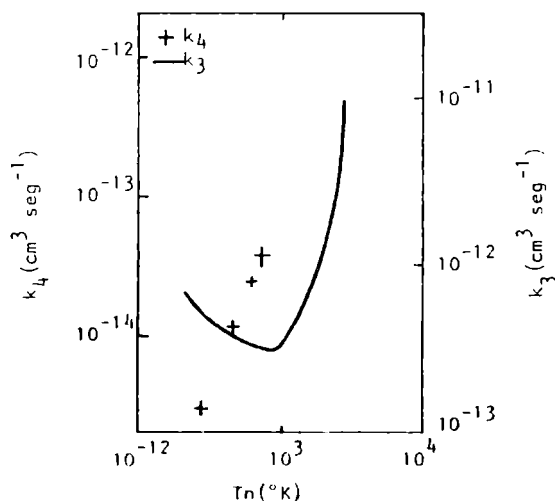


Figura 1 Coeficientes de reacción de  $k_3$  y  $k_4$

### 2.3. Secciones eficaces y parámetros fisicoquímicos

Las secciones eficaces de absorción del O<sub>2</sub> corresponden a las mediciones realizadas por Metzger y Cook (1964) (ver figura 2) con un error estimado por dichos autores en menos de un 5%. Los rendimientos cuánticos de fotodisociación han sido medidas por Lee y otros (1977) con un error evaluado en un 10% (ver figura 2). La eficiencia de producción de cuantos  $\eta_1$  ha sido obtenida ultimamente por Slanger y Black (1974) e igual a  $(2.2 \pm 0.4)$  cuantos por reacción.

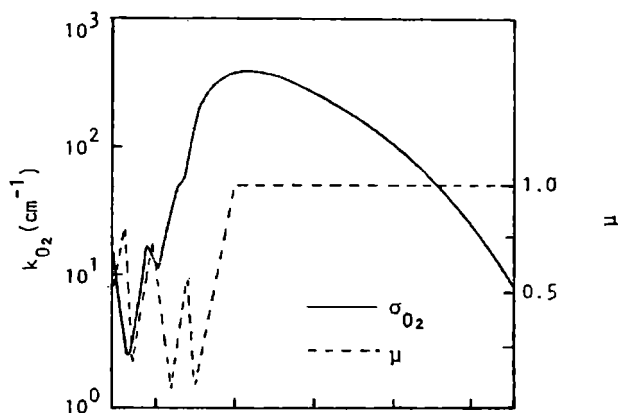


Figura 2. Rendimientos cuánticos de fotodisociación y coeficientes de absorción del O<sub>2</sub>,  $k_{O_2}$ , donde  $k_{O_2} = 2.169 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3} \cdot \sigma_{O_2}$

### 2.4. Flujos solares y parámetros atmosféricos y ionosféricos

El flujo de radiación solar ha sido parametrizado linealmente en función del índice solar  $F_{10.7}$  por Torr y otros (1980) en base a un gran número de datos experimentales en el continuo de Schumann-Runge (ver tabla 1).

Los modelos de densidad y temperatura de los componentes neutros dan valores coincidentes por encima de la región E pero no sucede lo mismo dentro de esta región. En particular las mediciones hechas con radar de Thompson no dan resultados coincidentes con los obtenidos in situ (ver p.e. Salah y Evans, 1975). Sin embargo Duhau y Louro (1983) encontraron que existen limitaciones para la aplicación de las teorías existentes debido a las condiciones de la región E, pero que en un caso seleccionado por baja actividad geomagnética en el cual las con-

diciones de aplicabilidad de dichas teorías se cumplen, la temperatura neutra,  $T_n$ , y la frecuencia de colisión calculada con las densidades de  $N_2$  y  $O_2$  dadas por el modelo de Jacchia (1977) -en lo sucesivo J77- coinciden con el resultado medido con radar. Esto daría un indicio de que el J77 describe adecuadamente  $T_n$ ,  $\{O_2\}$  y  $\{N_2\}$ .

TABLA 1

INTERVALO DE RADIACION SOLAR $\{A\}$	a	b
1375-1400	4.56(7)	2.05(9)
1400-1450	7.68(7)	6.35(9)
1450-1500	7.36(7)	1.13(10)
1500-1550	1.13(8)	2.50(10)
1550-1600	1.16(8)	3.60(10)
1600-1650	1.32(8)	5.34(10)
1650-1700	2.55(8)	2.22(11)
1700-1750	2.07(8)	1.29(11)

Coefficientes correspondientes al ajuste lineal  $\phi(\Delta\lambda) = a F_{10.7} + b$ , obtenido por Torr y otros (1980) en función del índice solar  $F_{10.7}$

No obstante, mediciones de  $\{N_2\}$ ,  $\{O_2\}$  y  $\{O\}$  obtenidas recientemente in situ con espectrómetro de masa en un día geomagnéticamente perturbado ( $k_p = 4$ ) (Trinks y otros, 1978), dan valores que se apartan sustancialmente en la región E de los perfiles predichos por el J77 para las mismas condiciones (ver figura 3). Además en el caso del O, de acuerdo a los resultados experimentales obtenidos por Sharp (1980) ( $F_{10.7} \approx 140$  y  $k_p \approx 1$ ), la onda de choque que se forma rodeando al cohete debido a la velocidad supersónica con la que está se mueve cambia drásticamente la densidad de esta especie en las proximidades del mismo, por lo que dicho autor implementó un dispositivo para medir fuera de la onda de choque. La figura 4 muestra el resultado junto con el valor dado por J77 y MSIS para las mismas condiciones de actividad solar y magnética. El J77 y el resultado de Sharp coinciden por encima de los 130 km mientras que MSIS da valores significativamente por encima de aquellos. Obsérvese que alrededor de los 100 km J77 excede a Sharp

en un 500 % aproximadamente.

Por último, debido a la gran escasez de mediciones de CO<sub>2</sub> en la región E, se realizó una estimación de su variabilidad con la actividad solar en base a los resultados teóricos de Trinks y Fricke (1978), obtenidos para distintos ángulos cenitales (ver figura 5).

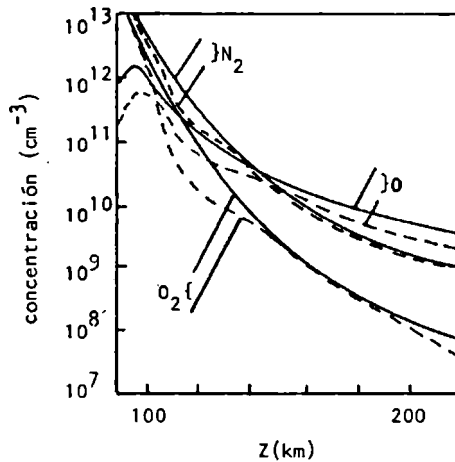


Figura 3. Concentraciones de las especies mayoritarias (—): J77, (---): Trinks y otros (1978)

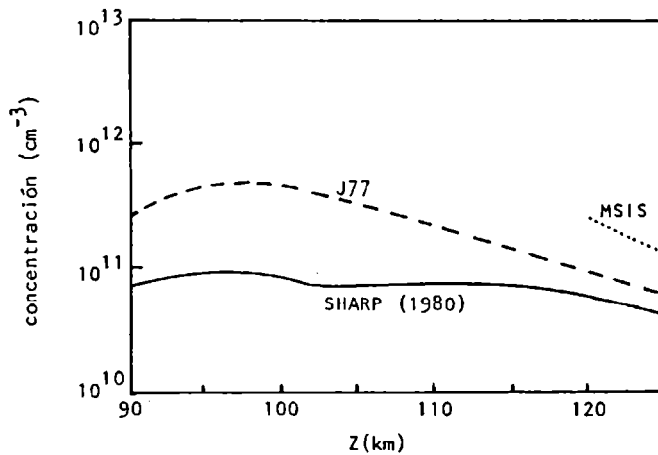
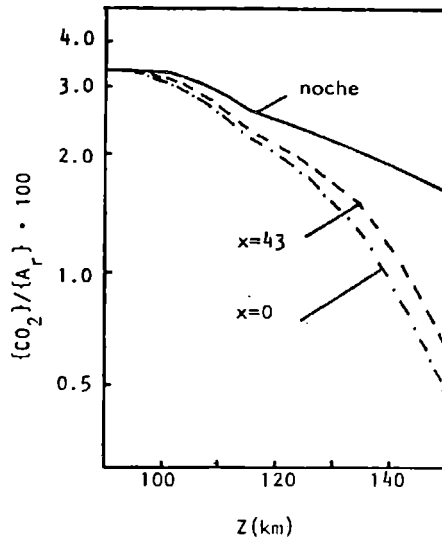


Figura 4. Concentraciones de oxígeno atómico



**Figura 5.** Perfiles de  $\text{CO}_2$  calculado por Trinks y Fricke (1978) para 3 ángulos cenitales

### 3. RESULTADOS OBTENIDOS

Se calculó en primer lugar la producción de cuantos de vibración con los datos de  $\text{O}_2$  del J77 para baja, media y alta actividad solar y con los de Trinks y otros (1978) para baja actividad solar, obteniéndose los perfiles de la figura 6. Puede observarse que el efecto compensatorio que se produce al aumentar la altitud entre la menor atenuación de radiación solar por la columna de  $\text{O}_2$  y la disminución de dicha especie, origina un pico de producción de  $\text{O}^1\text{D}$  entre 100 y 105 km. Asimismo se evaluó que la posibilidad de creación de estos átomos excitados por debajo de  $1342 \text{ \AA}$  afecta a lo sumo la producción total en un 5%. Las contribuciones más significativas de  $\text{O}^1\text{D}$  por intervalo de longitud de onda se produce a cada altura en general para  $\lambda > 1500 \text{ \AA}$  y por debajo de los 100 km únicamente para  $\lambda > 1650 \text{ \AA}$ . También se encontró que la consideración de la leve variación de las secciones eficaces de absorción del  $\text{O}_2$  con  $T_n$  no justifica su inclusión en los cálculos.

Luego se evaluó la pérdida de cuantos de vibración por unidad de concentración de los mismos, es decir los productos  $k_3(T_n)\{\text{CO}_2\}(z)$  y  $k_4(T_n)\{\text{O}\}(z)$  para baja, media y alta actividad solar (ver figura 7), observándose el efecto casi

uniforme con la altura del 0 como desactivador de cuantos vibracionales y la notable variabilidad a su vez del CO<sub>2</sub> en dicho proceso.

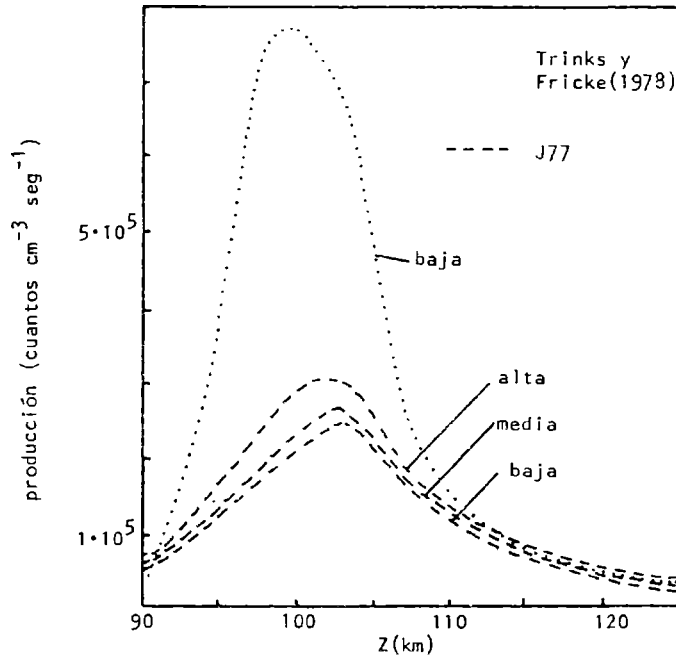


Figura 6. Producción de cuantos de vibración, considerando perfiles de O<sub>2</sub> en distintas actividades solares.

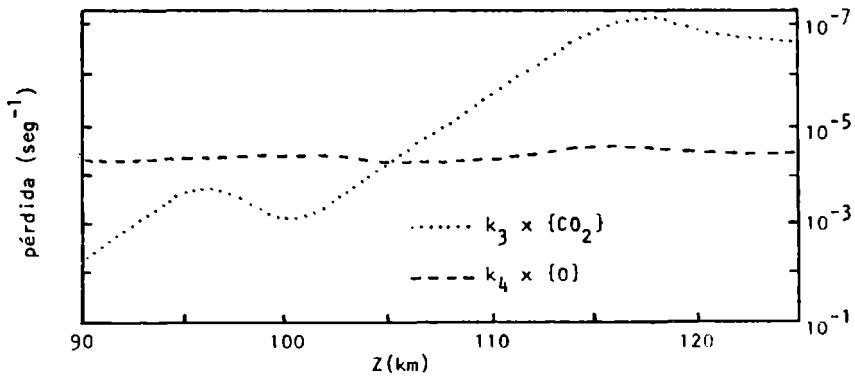


Figura 7. Pérdida de cuantos de vibración por unidad de concentración de los mismos, para baja actividad solar.



Por último se procedió a calcular  $\rho$  y  $T_v$  de acuerdo a las expresiones (2) y (3). Fueron tomados conjuntos de distintos grupos de datos de las especies neutras  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $O$  y  $CO_2$  según se mencionó en 2.4. Los distintos perfiles de  $\rho$  y  $T_v$  obtenidos se hallan clasificados en la tabla 2 y graficados en la figura 8. Puede observarse en todos los casos que la máxima densidad de cuantos se produce entre 105 y 110 km, independientemente del conjunto de datos elegido y de la actividad solar. Asimismo la temperatura vibracional crece monotonamente en toda la región E y lentamente sobre el perfil de  $T_n$ , hallándose ambas asintóticamente en los 90 km.

TABLA 2

PERFIL DE $\rho$ y $T_v$	ACTIVIDAD SOLAR	DATOS DE				OBSERVACIONES
		$N_2$	$O_2$	$O$	$CO_2$	
1	BAJA	J77	J77	SH(80)	T y F(78)	*
2	MEDIA	J77	J77	SH(80)	T y F(78)	
3	ALTA	J77	J77	SH(80)	T y F(78)	*
4	BAJA	T y o(78)	T y o(78)	SH(80)	T y F(78)	**
5	BAJA	J77	J77	J77	T y F(78)	

Detalle de los cinco conjuntos de datos de concentraciones neutras de especies mayoritarias utilizados en el cálculo de  $\rho$  y  $T_v$ . J77: Jacchia (1977); SH:Sharp (1980); T y o: Trinks y otros (1978) y T y F: Trinks y Fricke (1978).

\* Variabilidad del J77 para el  $O$ .

\*\*Variabilidad del J77 para el  $O$ . Mediciones simultáneas de  $N_2$ ,  $O_2$  y  $CO_2$

Teniendo en cuenta los errores en cada parámetro utilizado, los cuales se han detallado en los apartados anteriores, se calculó el error en la determinación de cada uno de los términos correspondientes a la producción y pérdida de cuantos de vibración y el error en el cálculo de  $\rho$  y de  $T_v$ .

La tabla 3 resume estos resultados: obsérvese el modo en que el error en los términos de desexcitación por  $O$  y  $CO_2$  afectan alternativamente el error total en  $\rho$  a medida que se varía la altura, de manera que se compensan produciendo un  $\Delta\rho/\rho$  porcentual bastante uniforme, cuyo máximo a 110 km coincide con el máximo error en  $T_v$ . El aspecto quizás más importante es que a pesar de las considerables in-

certezas que afectan la mayoría de los coeficientes y parámetros utilizados es que la dependencia logarítmica de  $T_v$  con  $\rho$  y  $N_2$  limita toda posible variabilidad en  $T_v$  mas allá de un 30%. Se concluye que no existe duda en cuanto a que la teoría usual no admite la existencia de  $T_v > 700^\circ\text{K}$ , bien por debajo de las que requieren las densidades de  $O^+$  existentes según Duhau y Azpiazu (1983), mostrando, de ser ciertas las conclusiones de dichas autoras, la existencia de algún mecanismo anómalo de excitación del gas de  $N_2$ .

TABLA 3

Z (Km)	$\epsilon_{q1}$	$\epsilon_{CO_2}$	$\epsilon_O$	$\epsilon_\rho$	$\epsilon_{Tv}$
125	0.80	0.004 0.001	0.26 0.34	1.40	0.26
120	0.80	0.005 0.002	0.30 0.41	1.51	0.28
115	0.80	0.01 0.003	0.37 0.49	1.67	0.30
110	0.80	0.03 0.012	0.35 0.47	1.66	0.28
105	0.80	0.12 0.039	0.22 0.30	1.48	0.22
100	0.80	0.19 0.063	0.08 0.11	1.24	0.15
95	0.80	0.21 0.07	0.03 0.04	1.15	0.11
90	0.80	0.33 0.11	0.07 0.01	1.25	0.10

Errores relativos en función de la altura, Z, correspondientes a: los términos de producción de cuantos por fotodisociación ( $\epsilon_{q1}$ ) y pérdida por colisiones con los gases de  $CO_2$  y  $O$  ( $\epsilon_{CO_2}$  y  $\epsilon_O$  respect.), densidad de cuantos ( $\epsilon_\rho$ ) y temperatura vibracional ( $\epsilon_{Tv}$ ).

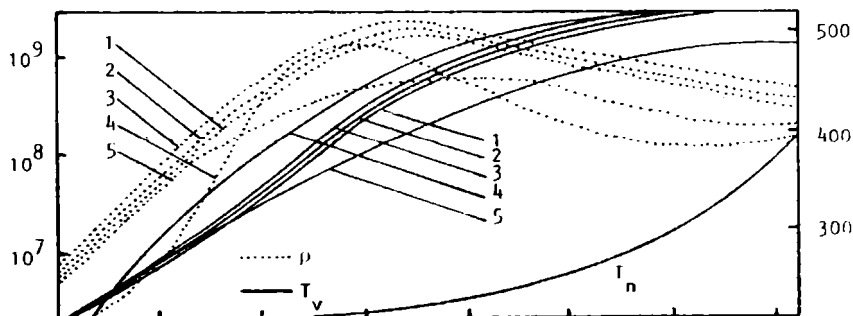


Figura 9. Perfiles de temperatura y densidad de cuantos vibracionales.

## BIBLIOGRAFIA

- de la Torre A. y Duhau S., 1983: La temperatura vibracional del  $N_2$  en la región E de la ionósfera. I.: Teoría; *Geoacta*, XII.
- Duhau S. y Louro A., 1983: Reinterpretación de espectros de dispersión de Thompson provenientes de la región E de la ionósfera; *Geoacta*, XII.
- Duhau S. y Azpiazu M.C., 1983: Obtención de la temperatura vibracional del  $N_2$  a partir de la densidad del ión de oxígeno atómico; *Geoacta*, XII.
- Jacchia L.G., 1977: Thermospheric temperature, density and composition: new model; *Smithson. Astrophys. Obs., Sp. Rep.*, 375.
- Lee L.C., Slinger T.G., Black G. y Sharpless R.C., 1977: Quantum yields for the production of  $O^1D$  from photodissociation of  $O_2$  at 1160-1770 Å; *J. Chem. Phys.*, 67, 5602.
- Mc Neal R.J., Whitson M.E. y Cook G.R., 1972: Quenching of vibrationally excited  $N_2$  by atomic oxygen; *Chem. Phys. Lett.*, 16, 507.
- Mc Neal R.J., Whitson M.E. y Cook G.R., 1974: Temperature dependence of the quenching of vibrationally excited nitrogen by atomic oxygen; *J. Geophys. Res.*, 79, 1527.
- Metzger P.H. y Cook G.R., 1964: A reinvestigation of the absorption cross sections of molecular oxygen in the 1050-1800 Å region; *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.*, 4, 107.
- Rusch D.W., Sharp W.E. y Hays P.B., 1975: Twilight Airglow 3.01-6300 Å radiation; *J. Geophys. Res.*, 80, 1832.
- Salah J.E., Evans J.V. y Wand R.H., 1975: E-region temperature measurements at Millstone Hill; *J. Atmos. Terr. Phys.*, 37, 461.
- Sharp, W.E., 1980: Absolute concentrations of  $O^3P$  in the lower thermosphere at night; *Geophys. Res. Lett.*, 7, 485.
- Slinger T.G. y Black G., 1974: Electronic to vibrational energy transfer efficiency in the  $O^1D-N_2$  and  $O^1D-CO$  systems; *J. Chem. Phys.*, 60, 468.
- Taylor R.L. y Bitterman S., 1969: Survey of vibrational relaxation data for processes important in the  $CO_2-N_2$  laser system; *Rev. Mod. Phys.*, 41, 26.
- Torr M.R., Torr D.G. y Hinteregger H.E., 1980: Solar flux variability in the Schumann-Runge continuum as a function of solar cycle 21; *J. Geophys. Res.*, 85, 6063.
- Trinks H. y Fricke K.H., 1978: Carbon dioxide concentrations in the lower thermosphere; *J. Geophys. Res.*, 83, 3883.
- Trinks H., Offerman D., Von Zahn U. y Steinhauer C., 1978: Neutral composition measurements between 90 and 220 km altitude by rocket borne mass spectrometer; *J. Geophys. Res.*, 83, 2169.
- Varnum W.S., 1972: Enhanced  $N_2$  vibrational temperatures in the thermosphere; *Planet. Space Sci.*, 20, 1865.

