

ESTUDIO DE LA VARIACION DE LOS PERFILES  
DE DENSIDAD ELECTRONICA EN LA REGION-D  
NOCTURNA

Sandro M. Radicella y Valdis Restbergs  
Programa Nacional de Radiopropagación

RESUMEN

Un coeficiente de adhesión efectivo  $\beta_{\text{eff}}$  ha sido definido por los autores en trabajos anteriores. En esta comunicación se utiliza el mismo para investigar los efectos de las concentraciones de alotropos del oxígeno y de los coeficientes de recombinación ion-electron e ion-ion, sobre los perfiles de densidad electrónica en la región-D nocturna.

Se encuentra que dichos perfiles son sensibles a las variaciones con la altura del oxígeno atómico e insensibles al ozono.

De los coeficientes de recombinación el único que influye en la concentración de electrones es el que responde al proceso de recombinación ion-electron.

ABSTRACT

An effective attachment coefficient  $\beta_{\text{eff}}$  was defined by the authors in previous works. In this one it is used to analyze theoretically the effect of the concentration of oxygen allotropes and of ion-electron and ion-ion recombination coefficients on electron density profiles in the nighttime D-region.

It is found that these profiles are sensitive to variations with height of atomic oxygen and insensitive to changes of ozone.

Only the ion-electron recombination coefficient modified the electron concentrations.

1.- INTRODUCCION

Se ha señalado en la literatura especializada que las concentraciones de los alotropos del oxígeno son las que definen la forma de los perfiles de densidad electrónica e iónica en la región-D.

Fehsenfeld y otros (1967) consideran a la razón  $[O_3] / [O]$  como fundamental en la producción de iones negativos estables y Ratnasari (1977) señala que la misma controla en gran medida la distribución de los iones negativos.

También ha sido aceptado que la concentración de electrones en la región D es determinada por dos procesos de recombinación y que debido a la presencia de iones conglomerados hidratados los valores de los coeficientes de recombinación son inciertos.

El objetivo de este trabajo es investigar, utilizando modelos numéricos y teniendo en cuenta los procesos que dan lugar a los iones negativos, la influencia de la concentración de alotropos del oxígeno y de los coeficientes de recombinación en la distribución de densidad electrónica entre los 70 Km y 90 Km de altura de la región D nocturna. Para ello se resuelve el sistema de ecuaciones de continuidad definido por Restbergs y Radicella (1978) que se obtiene al introducir el "coeficiente de adhesión efectivo"  $\beta_{eff}$  deducido por Radicella (1968). Se utilizan diversos modelos de concentraciones de alotropos del oxígeno y se hacen variar los valores de los coeficientes de recombinación en dos órdenes de magnitud.

## 2.-ESQUEMA DE REACCIONES IONICAS

Las 24 reacciones de la Tabla 1 se obtuvieron de Thomas (1971), Thomas y otros (1973), Arnold y Krankowsky (1972), Rowe y otros (1974) y Danilov (1975). Se incluyen también en la Tabla 1 las reacciones genéricas de recombinación ion-ion e ion-electron y los coeficientes de velocidad de reacción utilizados.

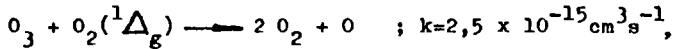
El modelo considera los siguientes iones negativos:  $O_2^-$ ,  $O_3^-$ ,  $O_4^-$ ,  $CO_3^-$ ,  $CO_4^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $NO_3^-$  y el ion positivo genérico  $XY^+$ .

De éstos el  $O_2^-$  es el ion negativo inicial mientras que  $NO_3^-$  es el ion negativo terminal. Se puede demostrar que las conclusiones de este trabajo son básicamente independientes de la existencia de iones conglomerados provenientes del ion  $NO_3^-$ .

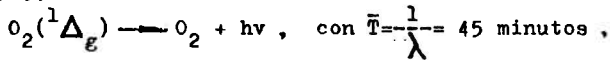
## 3.-PERFILES DE ESPECIES NEUTRAS

La Tabla 2 contiene las concentraciones de los perfiles nocturnos de oxígeno atómico y ozono utilizados en los cálculos. El sub-índice 1 corresponde a Moreels y otros (1977), el 2 a los calculados por Schimazaki y Laird (1972), el 3 a los dados por Bowman y otros (1970) y el 4 a (Hesstvedt, E., información no publicada, 1969) para el oxígeno atómico y a (Hesstvedt, E., información no publicada, 1970) para el ozono.

Las concentraciones del NO son las medidas por Tisone (1973) y las del NO<sub>2</sub> provienen del modelo teórico de Schimazaki y Laird (1972). La concentración total de neutros N y los valores del O<sub>2</sub> se obtuvieron de CIRA (1972). Las concentraciones de la especie excitada O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ<sub>g</sub>) fueron obtenidas de (Noxon, J.F., información no publicada, 1970); tomando en cuenta las reacciones de desactivación propuestas por Snelling y Hampson (1969)



y por Zipf (1969)



se obtuvieron valores nocturnos típicos de concentración del O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ<sub>g</sub>). La razón de mezclado volúmico del CO<sub>2</sub> es la dada por Hays y Olivero (1970).

#### 4.- FUENTES DE IONIZACION NOCTURNA

La Tabla 3 detalla las velocidades de ionización nocturna utilizadas. La contribución debido a radiación HLy α (1215,7 Å) dispersada en la geocorona, ha sido calculada utilizando la densidad de NO medida por Tisone (1973); la ionización debido a la radiación de rayos X difusos y la debido a SC XR-1 es la dada por Gagliardini y Karszenbaum (1975) y Karszenbaum y Gagliardini (1975) respectivamente y la debida a rayos X galácticos ha sido tomada de Arnold y Pierce (información no publicada, 1963) para actividad solar mínima.

5.- COEFICIENTES DE VELOCIDAD DE LAS REACCIONES DE RECOMBINACION  
Para el coeficiente de recombinación ion-electron, α<sub>D</sub>, se adoptaron los valores, en función de altura, dados por Biondi (información no publicada, 1970); Tabla 3.

El valor del coeficiente de recombinación ion-ion, α<sub>I</sub>, es incierto debido a la existencia de iones positivos y negativos hidratados. Rowe (información no publicada, 1972) acota el valor de α<sub>I</sub> entre 10<sup>-5</sup> y 10<sup>-8</sup> cm<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>; en este trabajo se adopta el valor estimativo de 1 x 10<sup>-6</sup> cm<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.

#### 6.- ANALISIS DE LOS PERFILES DE DENSIDAD ELECTRONICA CALCULADOS

En la Figura 1 se muestra el perfil de densidad electrónica calculado

lado utilizando la concentración de oxígeno atómico y ozono dada por Moreels y otros (1977). La concentración del ozono se modificó para obtener una variación de cuatro órdenes de magnitud. Se puede observar que el perfil de densidad electrónica es prácticamente insensible a grandes variaciones de densidad del ozono.

La Figura 2 muestra el importante efecto de la concentración del oxígeno atómico sobre la forma del perfil de densidad electrónica cuando se mantiene constante el perfil del ozono. Se observa que el factor determinante de la estructura nocturna del perfil electrónico es el oxígeno atómico.

La Figura 3 muestra los perfiles de densidad electrónica calculados haciendo variar en dos órdenes de magnitud al coeficiente de velocidad de recombinación ion-ion y al coeficiente de velocidad de recombinación ion-electron, independientemente. Se observa que para un mismo  $\alpha_D$  el perfil es insensible a la variación en dos órdenes de magnitud del  $\alpha_I$ , mientras que la concentración de electrones es influenciada por cambios en los valores de  $\alpha_D$ .

Se debe señalar que en todas las figuras, los perfiles calculados para condiciones ionosféricas estacionarias presentan los característicos gradientes pronunciados observados en perfiles experimentales de la región D nocturna.

#### 7.-CONCLUSIONES

- a) El perfil de densidad electrónica en la región D nocturna es insensible a grandes variaciones de concentración del ozono.
- b) El factor dominante que determina la altura del pronunciado gradiente de densidad electrónica en la región D nocturna y la forma del perfil, es la distribución del oxígeno atómico.
- c) La concentración electrónica de la región D nocturna es insensible a apreciables variaciones del coeficiente de recombinación ion-ion.
- d) El valor del coeficiente de recombinación ion-electron es el que determina la concentración de electrones para cada altura en la región D nocturna.

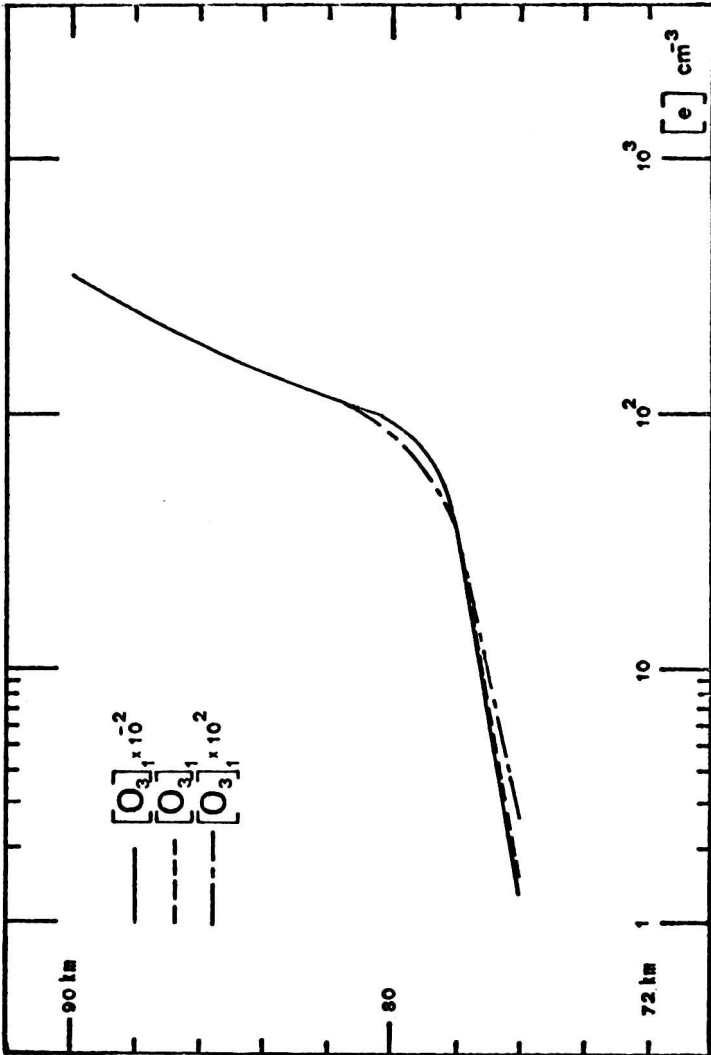


Fig. 1: Perfiles de densidad electrónica nocturna, calculados utilizando las concentraciones del oxígeno atómico y ozono dados por Moreels y otros (1977) y con perfiles modificados.

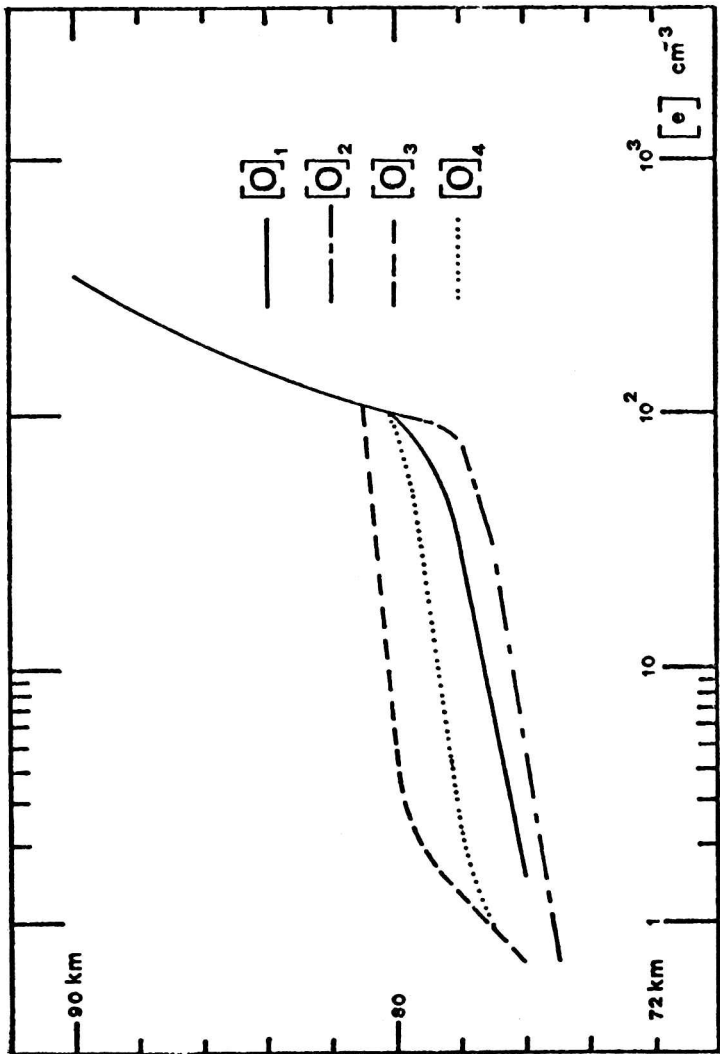


Fig. 2: Perfiles de densidad electr3nica nocturna, calculados utilizando diferentes concentraciones de ox3geno at3mico para un mismo perfil de ozono.

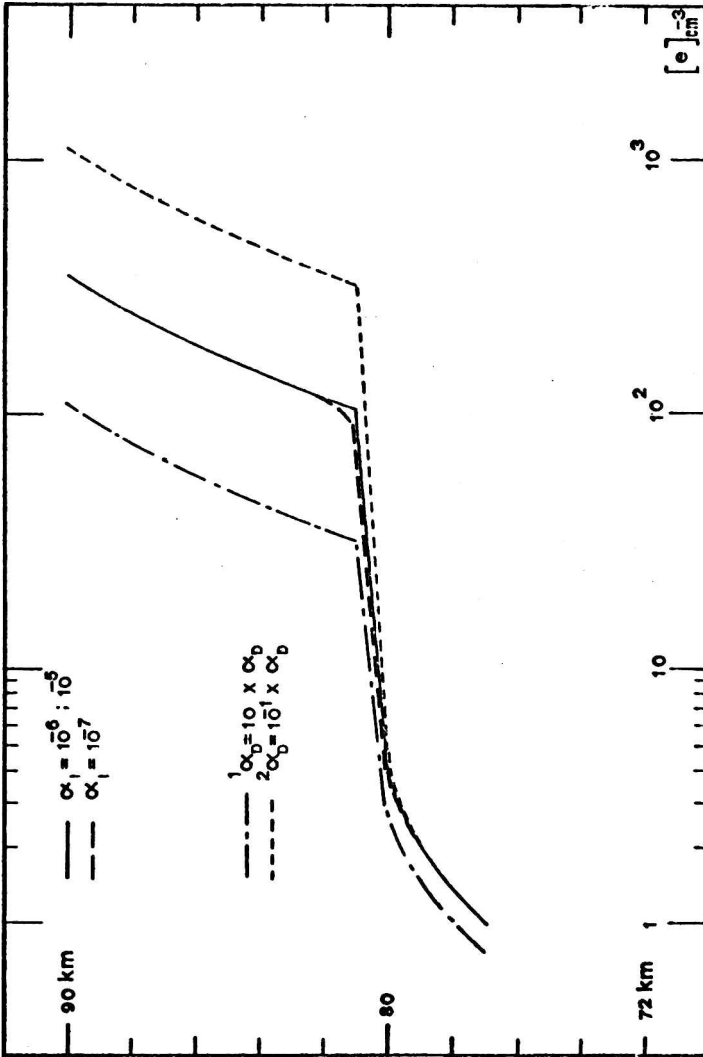


Fig. 3: Perfiles de densidad electrónica nocturna, calculados variando los valores de los coeficientes de velocidad de recombinación en dos órdenes de magnitud.

TABLA 1

$e + O_2 + O_2$	$\longrightarrow$	$O_2^- + O_2$	$1,8 \times 10^{-30}$
$O_2^- + O$	$\longrightarrow$	$e + O_3$	$3,3 \times 10^{-10}$
$O_2^- + O_2$	$\xrightarrow{(\Delta_g)}$	$e + 2 O_2$	$2,0 \times 10^{-10}$
$O_2^- + O_3$	$\longrightarrow$	$O_3^- + O_2$	$3,0 \times 10^{-10}$
$O_2^- + O_2 + M$	$\longrightarrow$	$O_4^- + M$	$2,0 \times 10^{-29}$
$O_2^- + NO_2$	$\longrightarrow$	$NO_2^- + O_2$	$8,0 \times 10^{-10}$
$O_2^- + NO$	$\longrightarrow$	$NO_2^- + O$	$1,0 \times 10^{-11}$
$O_3^- + CO_2$	$\longrightarrow$	$CO_3^- + O_2$	$4,0 \times 10^{-10}$
$O_3^- + O$	$\longrightarrow$	$O_2 + O_2$	$1,0 \times 10^{-10}$
$O_3^- + O$	$\longrightarrow$	$e + 2 O_2$	$1,0 \times 10^{-10}$
$O_3^- + O_3$	$\longrightarrow$	$e + 3 O_2$	$1,0 \times 10^{-10}$
$O_3^- + NO$	$\longrightarrow$	$NO_2^- + O_2$	$1,0 \times 10^{-11}$
$O_4^- + O$	$\longrightarrow$	$O_3^- + O_2$	$4,0 \times 10^{-10}$
$O_4^- + CO_2$	$\longrightarrow$	$CO_4^- + O_2$	$4,3 \times 10^{-10}$
$O_4^- + NO$	$\longrightarrow$	$NO_3^- + O_2$	$2,5 \times 10^{-10}$
$O_4^- + O_2$	$\longrightarrow$	$O_2^- + 2 O_2$	$1,8 \times 10^{-14}$
$CO_3^- + O$	$\longrightarrow$	$O_2^- + CO_2$	$8,0 \times 10^{-11}$
$CO_3^- + NO$	$\longrightarrow$	$NO_2^- + CO_2$	$9,0 \times 10^{-12}$
$CO_3^- + NO_2$	$\longrightarrow$	$NO_2^- + CO_2$	$8,0 \times 10^{-11}$
$CO_4^- + O$	$\longrightarrow$	$CO_3^- + O_2$	$1,5 \times 10^{-10}$
$CO_4^- + NO$	$\longrightarrow$	$NO_3^- + CO_2$	$4,8 \times 10^{-11}$
$CO_4^- + O_3$	$\longrightarrow$	$O_3^- + \text{Prod.}$	$1,0 \times 10^{-10}$
$NO_2^- + O_3$	$\longrightarrow$	$NO_3^- + O_2$	$1,8 \times 10^{-11}$
$O_2^- + CO_2 + O_2$	$\longrightarrow$	$CO_4^- + O_2$	$2,0 \times 10^{-29}$
$N^- + XY^+$	$\longrightarrow$	$\text{Prod.}$	$\alpha_I = 1,0 \times 10^{-6}$ -estimado-
$XY^+ + e$	$\longrightarrow$	$X + Y$	

Reacciones de la química de iones negativos y sus coeficientes de velocidad de reacción, en unidades C.G.S..



TABLA 2

Km	$\begin{bmatrix} 0 \\ 3 \end{bmatrix}_1$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 3 \end{bmatrix}_2$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 3 \end{bmatrix}_3$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 3 \end{bmatrix}_4$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}_1$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}_2$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}_3$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}_4$
70	1,5 9	1,0 10	1,2 9	8,0 9	7,0 3	6,0 6	1,0 0	2,1 5
71	1,0 9	9,0 9	8,0 8	5,3 9	6,5 4	1,8 7	7,0 0	1,0 6
72	7,0 8	6,0 9	5,0 8	3,6 9	3,0 5	3,0 7	1,0 2	5,0 6
73	5,3 8	5,0 9	2,0 8	2,3 9	1,5 6	8,0 7	3,0 2	1,2 7
74	4,5 8	3,5 9	1,2 8	1,3 9	4,0 7	1,6 8	1,0 3	2,2 7
75	3,0 8	2,3 9	9,0 7	8,0 8	1,5 8	2,2 8	8,0 3	3,2 7
76	2,4 8	1,0 9	6,0 7	3,3 8	3,5 8	8,0 8	5,0 4	4,0 7
77	2,2 8	3,0 8	2,0 7	2,2 8	9,0 8	2,3 9	3,0 5	5,0 7
78	2,0 8	1,1 8	1,2 7	1,6 8	2,0 9	8,0 9	1,5 6	2,1 8
79	1,9 8	1,2 8	9,0 6	1,2 8	3,8 9	1,5 10	1,5 7	1,9 9
80	1,8 8	2,0 8	7,0 6	8,0 7	1,2 10	2,0 10	1,5 8	8,0 9
81	1,7 8	4,0 8	1,0 7	6,4 7	2,9 10	4,0 10	7,0 9	3,0 10
82	1,6 8	6,8 8	2,0 7	6,8 7	4,8 10	7,0 10	1,5 10	1,0 11
83	1,5 8	1,1 9	4,0 7	9,2 7	7,0 10	1,8 11	4,0 10	1,8 11
84	1,4 8	1,6 9	7,0 7	1,3 8	1,2 11	2,2 11	8,0 10	2,5 11
85	1,3 8	2,0 9	8,0 7	1,7 8	2,1 11	2,8 11	1,0 11	3,2 11
86	1,2 8	2,0 9	7,0 7	1,8 8	2,8 11	4,8 11	1,2 11	4,1 11
87	1,1 8	1,4 9	6,5 7	1,9 8	3,2 11	5,2 11	1,3 11	5,1 11
88	1,0 8	1,1 9	6,0 7	1,8 8	3,5 11	5,7 11	1,4 11	6,0 11
89	9,5 7	9,0 8	3,0 7	1,7 8	3,7 11	5,9 11	1,6 11	6,8 11
90	9,0 7	7,0 8	2,0 7	1,3 8	3,9 11	6,0 11	1,7 11	7,0 11(x)

Observación: (x) 7,0 11 significa  $7,0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$

Concentraciones nocturnas de oxígeno atómico y ozono. (Ver texto)

TABLA 3

Km	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	Q	$\alpha_D$
70	1,40 -3	8,60 -3	1,70 -2	4,80 -4	2,784 -2	4,0 -6
71	1,37 -3	8,70 -3	1,55 -2	9,00 -4	2,647 -2	4,0 -6
72	1,34 -3	8,88 -3	1,45 -2	1,50 -3	2,622 -2	4,0 -6
73	1,32 -3	8,86 -3	1,38 -2	2,35 -3	2,633 -2	4,0 -6
74	1,28 -3	8,84 -3	1,28 -2	3,15 -3	2,607 -2	4,0 -6
75	1,26 -3	8,82 -3	1,20 -2	5,40 -3	2,748 -2	4,0 -6
76	1,23 -3	8,81 -3	1,12 -2	7,60 -3	2,884 -2	4,0 -6
77	1,21 -3	8,65 -3	1,05 -2	1,05 -2	3,086 -2	4,0 -6
78	1,18 -3	8,55 -3	9,70 -3	1,40 -2	3,343 -2	4,0 -6
79	1,15 -3	8,45 -3	9,10 -3	1,78 -2	3,650 -2	4,0 -6
80	1,13 -3	8,34 -3	8,50 -3	2,15 -2	3,947 -2	4,0 -6
81	1,10 -3	8,10 -3	8,20 -3	2,68 -2	4,420 -2	3,7 -6
82	1,07 -3	7,70 -3	8,60 -3	3,15 -2	4,787 -2	3,4 -6
83	1,03 -3	7,50 -3	7,20 -3	3,70 -2	5,273 -2	3,0 -6
84	1,00 -3	7,25 -3	6,60 -3	4,20 -2	5,685 -2	2,6 -6
85	9,97 -4	7,00 -3	6,20 -3	4,55 -2	5,970 -2	2,2 -6
86	9,60 -4	6,75 -3	5,80 -3	4,98 -2	6,331 -2	1,8 -6
87	9,30 -4	6,30 -3	5,50 -3	5,30 -2	6,573 -2	1,4 -6
88	8,97 -4	6,00 -3	5,20 -3	5,42 -2	6,630 -2	1,0 -6
89	8,70 -4	5,70 -3	4,80 -3	5,80 -2	6,937 -2	8,0 -7
90	8,20 -4	5,10 -3	4,45 -3	6,10 -2	7,137 -2	6,0 -7(x)

Observaciones: (x) 6,0 -7 significa  $6,0 \times 10^{-7}$  unidades C.G.S..

$q_1$  : rayos X difusos (1 a 100 keV)

$q_2$  : SC XR-1

$q_3$  : radiación cósmica galáctica (mínimo)

$q_4$  : HLy $\alpha$  (1215,7 Å) dispersado

$Q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4$

Velocidades de ionización nocturna y coeficientes de velocidad de recombinación ion-electron.

## BIBLIOGRAFIA

- Arnold, F., Krankowsky, D., 1972: Negative ions in the D-region; Aeronomy Report, 48, University of Illinois, Urbana.
- Bowmann, M.R., Thomas, L., Geisler, J.E., 1970: The effect of diffusion processes on the hydrogen and oxygen constituents in the mesosphere and lower thermosphere; Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 32, 1661-1674.
- CIRA, 1972; COSPAR international reference atmosphere; Akademie Verlag, Berlin.
- Danilov, A.D., 1975: Ionization-recombination cycle of the D-region; Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 37, 885-894.
- Fehsenfeld, F.C., Schmeltekopf, A.C., Schiff, H.I., Ferguson, E.E., 1967: Laboratory measurements of negative ion reactions of atmospheric interest; Planetary Space Science, 15, 373-379.
- Gagliardini, A., Karszenbaum, H., 1975: Electron production in the lower ionosphere by a diffuse galactic X ray background; Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 37, 845-849.
- Hays, P.B., Olivero, J.J., 1970: Carbon dioxide and monoxide above the troposphere; Planetary Space Science, 18, 1729-1733.
- Karszenbaum, H., Gagliardini, A., 1975: Galactic X-ray sources and the ionospheric D region, Nature, 257, 34.
- Moreels, G., Megie, G., Vallance Jones, A., Gattinger, R.L., 1977: An oxygen-hydrogen atmospheric model and its application to the HO emission problem; Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 39, 551-570.
- Radicella, S.M., 1968: Theoretical models of electron and ion density in the night-time D-region; Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 30, 1745-1760.
- Ratnasari, P.A.J., 1977: D-region processes at equatorial latitudes; Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 39, 999-1009.
- Restbergs, V., Radicella, S.M., 1978: Effective coefficients in D-region theory; COSPAR Space Research, 18, 253-256.
- Rowe, N.J., Mitra, A.P., Ferraro, A.J., Lee, H.S., 1974: An experimental

- and theoretical study of the D-region-II. A semi-empirical for mid-latitude D-region; *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 36, 755-786.
- Schimizaki, T., Laird, A.R., 1972: Seasonal effects on distribution of minor neutral constituents in the mesosphere and lower thermosphere; *Radio Science*, 7, 23-24.
- Snelling, D., Hampson, J., 1969: Water vapor concentration and neutral reactions in the mesosphere and stratosphere; *Aeronomy Report*, 32, University of Illinois, Urbana.
- Thomas, L., 1971: The lower ionosphere; *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 33, 157-195.
- Thomas, L., Gondhalekar, P.M., Bowmann, M.R., 1973: The negative ion composition of the daytime D-region; *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 35, 397-404.
- Tisone, G.C., 1973: Measurements of NO densities during sunrise at Kauai; *Journal of Geophysical Research*, 4, 746-750.
- Zipf, E.C., 1969: The collisional deactivation of metastable atoms and molecules in the upper atmosphere; *Canadian Journal of Chemistry*, 47, 1863-1870.