

Tesis de Posgrado

Modelo diurno de densidades iónicas en la región E de la ionósfera

Azpiazu, María Cristina

1986

Tesis presentada para obtener el grado de Doctor en Ciencias
Físicas de la Universidad de Buenos Aires

Este documento forma parte de la colección de tesis doctorales y de maestría de la Biblioteca Central Dr. Luis Federico Leloir, disponible en digital.bl.fcen.uba.ar. Su utilización debe ser acompañada por la cita bibliográfica con reconocimiento de la fuente.

This document is part of the doctoral theses collection of the Central Library Dr. Luis Federico Leloir, available in digital.bl.fcen.uba.ar. It should be used accompanied by the corresponding citation acknowledging the source.

Cita tipo APA:

Azpiazu, María Cristina. (1986). Modelo diurno de densidades iónicas en la región E de la ionósfera. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_2009_Azpiazu.pdf

Cita tipo Chicago:

Azpiazu, María Cristina. "Modelo diurno de densidades iónicas en la región E de la ionósfera". Tesis de Doctor. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 1986.
http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_2009_Azpiazu.pdf

EXACTAS UBA

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales



UBA

Universidad de Buenos Aires

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

Tema de Tesis

MODELO DIURNO-DE DENSIDADES IONICAS EN LA
REGION E DE LA IONOSFERA

Autor

María Cristina Azpiazu

Director de Tesis

Dra. Silvia Duhau

Lugar de trabajo:

Departamento de Ciencias Físicas

Tesis presentada para optar al título de Doctor en Ciencias Físicas

1986

*Tesis 2009
ej. 2*

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Silvia Duhau por su contribución a mi formación.
por su sentido crítico. su apoyo. comprensión y dedicación

A mi esposo por su incalculable ayuda y cariño.

A Silviana Comastri por sus oportunos consejos y su amistad.

A mis hijos.

INDICE

1. Introducción	1
2. La atmósfera terrestre	5
2.1 Atmósfera neutra	5
2.2 La ionósfera	8
3. Antecedentes	12
3.1 Introducción	12
3.1.1 La ecuación de la energía	18
a. Iones	18
b. Electrones	19
3.2 Análisis de los modelos de formación de la región E	21
3.2.1 Síntesis de los modelos teóricos	21
3.2.2 Síntesis de los modelos empíricos	44
3.3 Conclusiones	46
4. Modelo de formación de la región E	49
4.1 Sistema de ecuaciones	50
4.2 Análisis de los parámetros a utilizar	53
5. Cálculo de las densidades iónicas a distintas condiciones ionosféricas	69
5.1 Cálculo de las densidades iónicas y del monóxido de nitrógeno a latitud media	70
5.1.1 Baja actividad solar	70
5.1.2 Actividad solar moderada	79
5.1.3 Alta actividad solar	88

5.2 Cálculo de la densidad electrónica a latitudes ecuatoriales	95
6. Conclusiones	101

-

C A P I T U L O 1

Introducción

Se denomina región E a la zona de la ionósfera comprendida entre los 90 y 130 km de altura, zona en la que la densidad de corriente ionosférica es máxima y en la que pueden reflejarse las ondas de radio. La posibilidad de realizar radioenlaces por reflexión de las señales en la región E de la ionósfera incentivó el estudio de la formación y dinámica de la misma. En 1956 Chapman enuncia la teoría de la dínamo y calcula el tensor de conductividad utilizando un perfil promedio de concentración electrónica obtenido con ionosondadora y haciendo una estimación de la composición iónica y las frecuencias de colisión ya que no se habían realizado mediciones de concentraciones iónicas ni de temperaturas electrónica o del gas neutro. Recién en la década del 60, con el lanzamiento de cohetes de investigación ionosférica, se obtienen las primera mediciones de perfiles de concentraciones iónicas y de temperatura (ver p. ej. Spencer y otros, 1962, Johnson, 1966).

Se elaboran entonces los primeros modelos de formación de la región E (ver p. ej. Keneshea y otros, 1970) en los que se realiza una primera aproximación al estudio de la formación de esta región de la ionósfera, teniéndose en cuenta todas las reacciones químicas intervinientes y tomándose como datos la composición, densidad y temperatura de cada componente de la atmósfera y el flujo de radiación solar incidente se predice la densidad y temperatura de cada componente de la ionósfera.

Sin embargo, estos modelos no han sido exitosos, encontrándose resultados muy contradictorios. Por ejemplo, algunos autores modifican parámetros arbitrariamente para que sus resultados concuerden con las observaciones. Es así como Chakrabarty y otros, 1978, cuadriplican el flujo solar incidente respecto del medido y Richmond, 1972, disminuye los coeficientes de recombinación ión-electrón para que las densidades resultantes concuerden con las medidas. Sin embargo, y aún con estas modificaciones, los modelos no reproducen el comportamiento del perfil de densidades iónicas.

El interés existente en el análisis de la físico-química de la ionósfera y las contradicciones mencionadas llevaron a que los satélites de exploración espacial (p. ej. el AE-C) midieran las velocidades de las reacciones químicas (in situ) y simultáneamente se hiciera lo mismo en el laboratorio, buscándose en ambos casos la dependencia de los coeficientes que los describen con la temperatura de los reactantes y encontrándose nuevamente el resultado contradictorio de que los valores observados in situ discrepan de los medidos en laboratorio (Torr, 1979).

Teniéndose en cuenta que si las condiciones de laboratorio fueran las mismas que las ionosféricas, los resultados deberían concordar, y dado que el experimento "controlado" en el laboratorio permite la medición directa y simultánea de todos los parámetros involucrados, debe analizarse si esta situación se da en la ionósfera.

En este sentido se encontró que:

a) Casi todos los modelos se basan en la hipótesis previa ya establecida de que los electrones se encuentran en equilibrio tér-

mico con el gas neutro en la región E. Esta hipótesis fue revisada por Duhau y Azpiazu, 1981, quienes encontraron que las mediciones de T_e con radar de dispersión de Thomson indican que $T_e = T_n$, concordante este resultado con los que se obtiene de las teorías en boga sobre la energética de los electrones (ver p. ej. Schunk y Walker, 1973b), mientras que las mediciones in situ de T_e con sonda de Langmuir y mediciones de la frecuencia de colisión entre electrón y neutro (fuertemente dependiente de T_e) indican un fuerte desequilibrio térmico. Habiendo dos métodos distintos que dan resultados coincidentes, uno de ellos una medición directa, la medición in situ, se dudó de la teoría de interpretación del espectro medido por el radar. Louro y Duhau, 1985, encontraron que ésta no sería adecuada en una amplia zona de la región E donde la longitud de onda del radar es del orden de la distancia media entre colisiones (entre los 95 y 120 km de altura). En consecuencia, la hipótesis de que $T_e = T_n$ es dudosa.

b) Algunos de los coeficientes de reacción dependen del estado de excitación de los reactantes, estado que actualmente no es accesible en la ionósfera al conocimiento directo.

c) Al no existir mediciones simultáneas de todos los parámetros intervinientes, en los modelos se utilizan datos de los mismos sin que se haya tenido en cuenta con precisión cuáles son las condiciones ionosféricas en las cuales éstos se han medido. Por ejemplo, Keneshea y otros, 1970, utilizan un perfil de concentración de monóxido de nitrógeno medido a baja actividad solar en horas cercanas al mediodía como dato para calcular las densidades ionos-

féricas en un día de actividad solar moderada y para analizar la variación durante todo el día.

Teniendo en cuenta estos antecedentes, en el presente trabajo se elabora un modelo de la región E diurna en el cual: a) se comienza por simplificar las ecuaciones básicas, minimizando, mediante un proceso iterativo, el número de reacciones químicas intervinientes; b) se considera el desequilibrio térmico entre los electrones y el gas neutro; c) se estudia la posible influencia de la presencia de reactantes excitados, y d) se seleccionan los datos de manera que correspondan a condiciones ionosféricas equivalentes.

En el Capítulo 2 se resume la nomenclatura utilizada en ionósfera y se describe la composición de la ionósfera y atmósfera neutra, cómo se ioniza la atmósfera, y se muestran perfiles típicos de concentraciones y temperaturas.

En el Capítulo 3 se sintetizan los modelos teóricos y empíricos de formación de región E más citados en la literatura.

En el Capítulo 4 se describe el modelo propuesto y se analizan los parámetros intervinientes en el cálculo de las densidades iónicas.

Finalmente, en el Capítulo 5 se aplica el modelo a algunos casos concretos.

C A P I T U L O 2

La atmósfera terrestre

En lo que sigue se hará un resumen de la nomenclatura usual de la Física de la alta atmósfera y de las características principales de cada una de las zonas en las que se divide la atmósfera (ver p. ej. Rishbeth y Garriott, 1969; Banks y Kockarts, 1983).

2.1. Atmósfera neutra:

La descripción de la atmósfera neutra puede realizarse teniendo en cuenta la composición, la temperatura o los procesos físicos dominantes.

De acuerdo con la composición química distinguimos: la zona comprendida entre los 10 y 80 km de altura llamada ozonosfera, con un máximo en la concentración de ozono alrededor de los 25 km de altura; la ionósfera en la que la concentración de electrones y de iones es suficiente como para alterar la propagación de ondas de radio, se extiende desde aproximadamente los 50 km hasta los 700 km y sobre la cual se darán más detalles en el inciso 2.2; en la heliosfera, hasta aproximadamente los 3000 km de altura, el helio ionizado y neutro son los constituyentes predominantes y por último la protonosfera cuyos límites no están bien definidos aún y que está compuesta principalmente por hidrógeno ionizado (ver figura 1).

La variación con la altura de la temperatura también

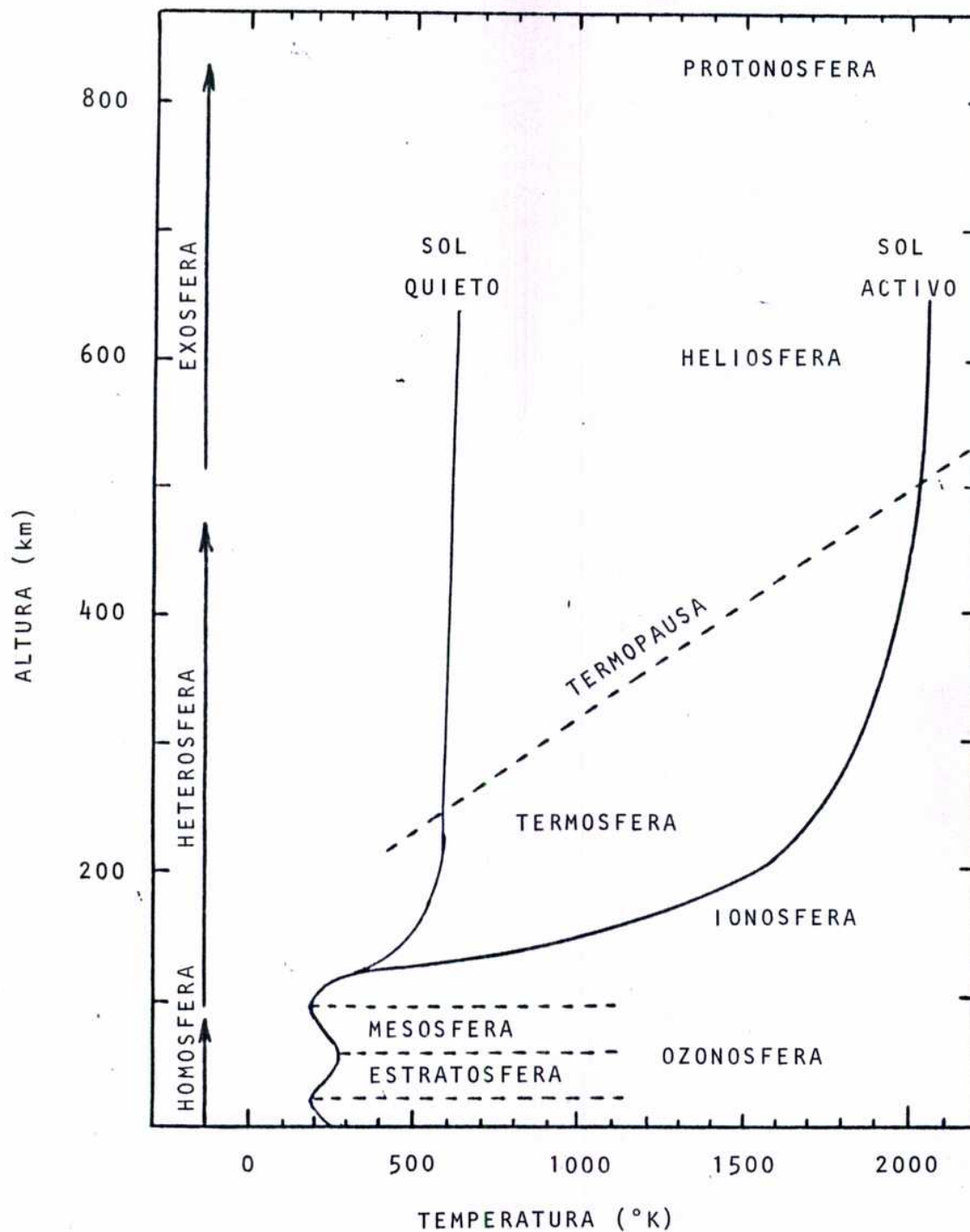


Figura 1: Variación de la temperatura del gas neutro con la altura y nomenclatura atmosférica (Banks y Kockarts, 1973).

permite delimitar algunas zonas. En la figura 1 se han graficado dos perfiles, de variación con la altura, de la temperatura neutra, uno para actividad solar alta y otro baja. Nótese que hasta una altura aproximada de 85 km el perfil de temperatura presenta tres inversiones en su gradiente, cada una de estas inversiones delimita una región: troposfera, estratosfera y mesosfera. Para alturas superiores a la mesopausa la temperatura del gas neutro aumenta monótonamente en la termosfera y en la región por encima de la termopausa se mantiene constante. La actividad solar altera sustancialmente el perfil de temperatura sólo a alturas superiores a aproximadamente 110 km y hace que la temopausa se eleve.

En cuanto a los procesos físicos dominantes se distinguen tres regiones la homosfera, la heterosfera y la exosfera. La homosfera se caracteriza por el régimen de mezcla en los constituyentes atmosféricos y en la heterosfera, en cambio, el régimen es difusivo. Por lo tanto la densidad relativa de los constituyentes atmosféricos predominantes a nivel del suelo, se mantiene en la homosfera y en cambio en la heterosfera las especies de mayor peso molecular son predominantes en la región inferior (N_2 y O_2) y los más livianos son dominantes en la región superior (O , H_e e H) (ver figura 2). La región de la cual los átomos de hidrógeno o helio pueden escapar se llama exosfera. En la figura 1 se han indicado estas tres regiones y sus límites aproximados.

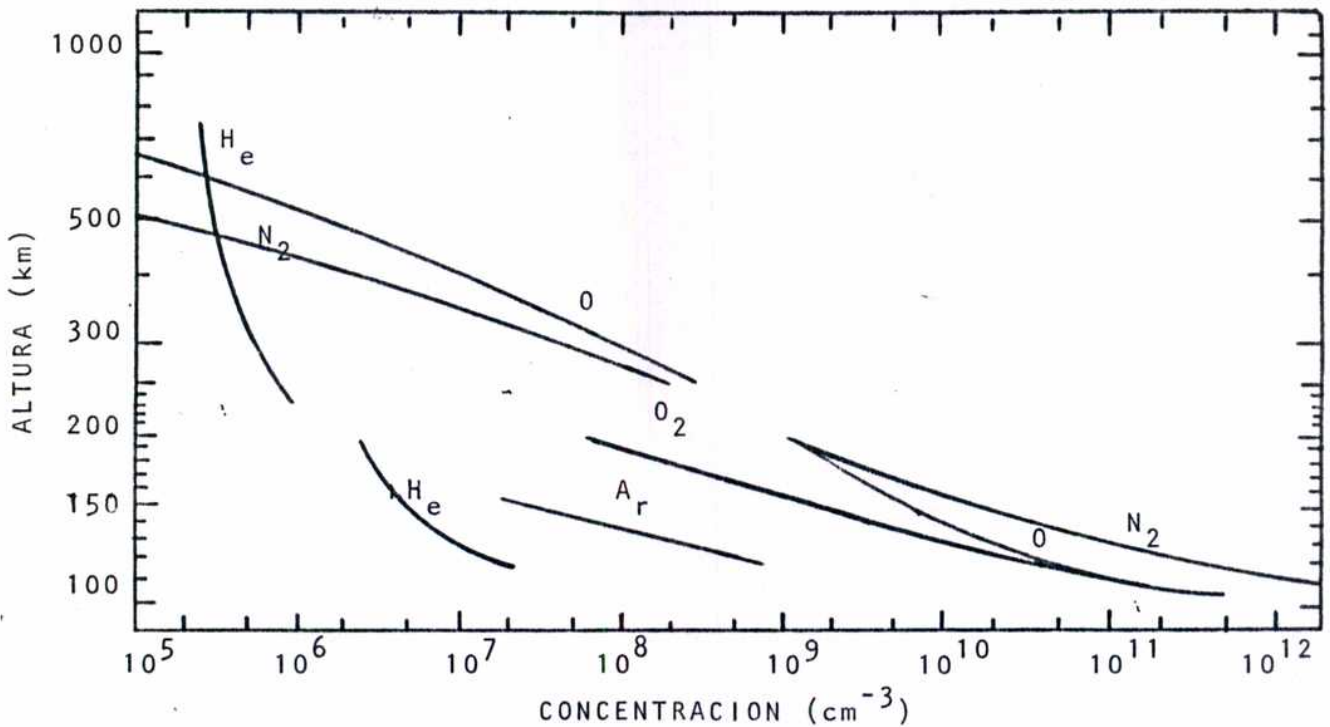


Figura 2: Variación con la altura de la concentración de los constituyentes atmosféricos (Rishbeth y Garriott, 1969).

2.2. La ionósfera

La absorción de radiación solar en el rango de rayos X y ultravioleta y el impacto de partículas de la radiación cósmica ionizan los componentes de la atmósfera neutra. Los iones así formados reaccionan con los constituyentes neutros y se recombinan con los electrones o con iones negativos y así se producen un gas de iones y uno de electrones junto con el gas neutro. La composición de la ionósfera y su variación con la altura depende así de la longitud de onda de la radiación solar o de la energía de las partículas incidentes en cada región y de las especies atmosféricas presentes.

Un perfil típico, correspondiente a latitud media, de densidad electrónica resultante es el graficado en la figura 3. Se distingue en él la existencia de capas o regiones denominadas D, E, F₁ y F₂. La densidad electrónica aumenta con la altura desde aproximadamente 10^9 m^{-3} en la región D hasta 10^{12} m^{-3} en el pico de la región F₂, a alturas superiores decrece monótonamente.

Los rayos X y la radiación correspondiente a la línea Lyman α del hidrógeno son las fuentes principales de ionización en la región D, los iones así formados se recombinan o forman "clusters" con moléculas de agua. Las especies ionizadas positivamente predominantes en la región D son $\text{H}^+ \cdot \text{H}_2\text{O}$; $\text{H}^+ \cdot (\text{H}_2\text{O})_2$; $\text{NO}^+ \cdot \text{H}_2\text{O}$, NO^+ y O_2^+ . En esa región se ha observado también la presencia de iones negativos producto de la adhesión de electrones a moléculas o átomos de oxígeno, estos iones reaccionan con los componentes atmosféricos dando lugar a O_3^- , CO_3^- , NO_2^- y NO_3^- y los "clusters" $\text{O}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O}$ y $\text{NO}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O}$ principalmente (ver figuras 2 y 3).

La región E está formada por la ionización de N_2 , O_2 y O en el rango UVL y rayos X "blandos", que origina los iones N_2^+ , O^+ y O_2^+ . Los dos primeros reaccionan rápidamente con los constituyentes atmosféricos de forma tal que las especies ionizadas predominantes son NO^+ y O_2^+ (ver figuras 2 y 3).

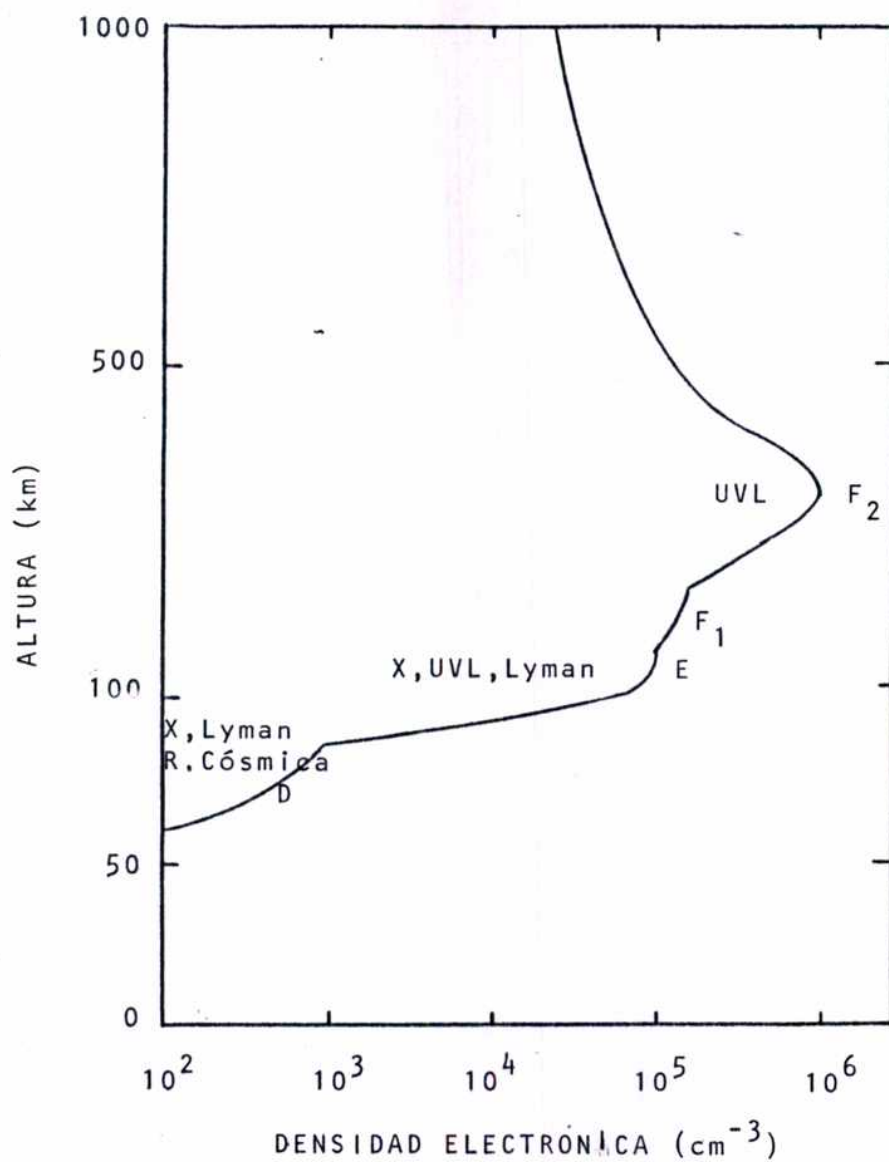


Figura 3: Perfil de densidad electrónica diurna a latitud media y fuentes de ionización en cada región (Banks y Kockarts, 1973).

El oxígeno atómico ionizado es la única especie iónica predominante en la región F_2 y la región F_1 es una zona de transición en la que las dos especies moleculares de la región E y el oxígeno atómico se encuentran en la misma proporción.

-

C A P I T U L O 3

Antecedentes

3.1. Introducción:

Como se ha mencionado en el capítulo anterior la región E está compuesta por tres gases, uno de electrones, uno de iones y un gas de constituyentes neutros. Estos gases satisfacen la ecuación de estado de gases ideales y se encuentran sometidos a la acción del campo gravitatorio terrestre; además las especies ionizadas y los electrones lo están también al geomagnético y al electromagnético autoconsistente. Por lo tanto las ecuaciones de transporte para cada una de las especies ionosféricas son (ver por ej. Schunk, 1973):

ec. de continuidad:

$$\frac{\partial n_s}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (n_s \bar{u}_s) = q_s - \ell_s \quad (1)$$

ec. de movimiento:

$$\begin{aligned} n_s m_s \frac{D_s \bar{u}_s}{Dt} + n_s k \bar{\nabla} T_s - n_s m_s \bar{G} - n_s e_s (\bar{E} + \bar{u}_s \times \bar{B}) = \\ = - \sum_j [n_s m_s \nu_{sj} (\bar{u}_s - \bar{u}_j) + \Delta \bar{M}_{sj}] \end{aligned} \quad (2)$$

ec. de la energía:

$$\begin{aligned} \frac{D_s}{Dt} \left(\frac{3}{2} n_s k T_s \right) + \frac{5}{2} n_s k T_s (\bar{\nabla} \cdot \bar{u}_s) = n_s m_s \sum_j \left[\frac{\nu_{sj} 3k(T_j - T_s)}{m_j + m_s} + \right. \\ \left. + (\bar{u}_j - \bar{u}_s)^2 + \Delta E_{sj} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

donde el subíndice s se refiere a cada especie cargada y j a las neutras, cuyas densidades numéricas, velocidades medias, masas y temperaturas son n , \bar{u} , m y T respectivamente; \bar{E} es el campo eléctrico, \bar{B} el magnético y \bar{G} es la aceleración de la gravedad; k es la constante de Boltzmann, ν_{sj} es la frecuencia de la colisión elástica de la partícula s con el gas j ; $\Delta\bar{M}_{sj}$ y ΔE_{sj} identifican a los términos de variación, debida a colisiones inelásticas con la especie j , de cantidad de movimiento y de energía de la especie s respectivamente (ver por ej. Ting Yi Li, 1966);

$$\frac{D_s}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \bar{u}_s \cdot \bar{\nabla}$$

es la derivada convectiva y q_s y t_s son los términos de producción y pérdida de partículas de la especie s respectivamente.

En la región E la producción primaria de iones y de electrones se realiza por fotoionización y se calcula a cada altura h_0 mediante la expresión (ver por ej. Rishbeth y Garriott, 1969):

$$q_s(h_0) = n_j(h_0) \int_0^{\infty} I(h_0, \lambda) \sigma_j(\lambda) \eta_j(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

donde σ_j es la sección eficaz de absorción y η_j la eficiencia de ionización de la especie neutra j correspondientes a la longitud de onda λ y el flujo $I(h_0)$ se calcula utilizando la ley de Beer-Lambert:

$$I(h_0, \lambda) = I_{\infty}(\lambda) \exp - \left[\sum_k \sigma_k(\lambda) \int_{h_0}^{\infty} n_k \sec \chi dh \right] \quad (5)$$

donde I_{∞} es el flujo solar incidente en la exósfera, el subíndice k indica la especie atmosférica que absorbe radiación de longitud de onda λ y χ es el ángulo cenital solar, que se calcula mediante:

$$\cos \chi = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos [2\pi (H-12)/24]$$

si δ es la declinación solar, ϕ la longitud y H el ángulo horario.

La pérdida de iones o electrones en la región E se produce por reacciones químicas con las especies neutras o con otras especies ionizadas. Si se denota con k al coeficiente de velocidad de reacción, el término de pérdida de iones (o electrones) de la especie s con partículas de la especie n se expresa:

$$L_s = k n_s n_n$$

Los coeficientes de velocidad de reacción dependen, en general, de las temperaturas de las especies reaccionantes. Por lo tanto, los términos de producción y pérdida de cada una de las especies ionizadas dependen de la constitución de la atmósfera neutra en y por encima de la región E hasta la exósfera, de las temperaturas de las especies intervinientes, de la intensidad de la radiación solar incidente y de su capacidad de ser absorbida por los constituyentes atmosféricos y de ionizarlos.

Entre los 90 y 130 km de altura, zona de interés en este trabajo, hay tres constituyentes atmosféricos predominantes, estos

Tabla 1

Reacción	Velocidad de reacción (cm ³ seg ⁻¹)	Referencia
$O^+ + O_2 \rightarrow O + O_2^+$	$10^{-9} T^{-0.7}$	Chakrabarty y otros, 1978
$O^+ + N_2 \rightarrow N + NO^+$	$1.2 \times 10^{-12} (300/T_i)^{0.8}$	Torr y otros, 1977
$O^+ + NO \rightarrow O + NO^+$	2×10^{-11}	Goldan y otros, 1966
$O^+ + NO \rightarrow N + O_2^+$	$\ll 1.3 \times 10^{-12}$	Banks y Kockarts, 1973
$O^+ + e \rightarrow O$	$4 \times 10^{-12} (T_e)^{-0.78}$	Chakrabarty y otros, 1978
$N_2^+ + NO \rightarrow N_2 + NO^+$	3.3×10^{-10}	Fehsenfeld y otros, 1970
$N_2^+ + O \rightarrow N + NO^+$	2.5×10^{-10}	Ferguson, 1967
$N_2^+ + O_2 \rightarrow N_2 + O_2^+$	10^{-10}	Fite, 1969
$N_2^+ + O \rightarrow N_2 + O^+$	10^{-12}	Ferguson, 1967
$N_2^+ + O_2 \rightarrow NO + NO^+$	$\ll 10^{-16}$	Banks y Kockarts, 1973
$N_2^+ + e \rightarrow N + N$	$2.9 \times 10^{-7} (300/T_e)^{1/3}$	Biondi, 1969

Tabla 1 (continuación)

Reacción	Velocidad de reacción (cm ³ seg ⁻¹)	Referencia
$O_2^+ + N + NO^+ + O()$	2.5×10^{-11}	Frederick y otros, 1976
$O_2^+ + NO + O_2 + NO^+$	8×10^{-10}	O'Malley, 1970
$O_2^+ + N_2 + NO + NO^+$	$< 2 \times 10^{-16}$	Nicole, 1965
$O_2^+ + e + O + O$	$2 \times 10^{-7} (300/T_e)$	Biondi, 1969
$NO^+ + e + N + O$	$4.6 \times 10^{-7} (300/T_e)^{1.2}$	Biondi, 1969

son: nitrógeno molecular, oxígeno molecular y oxígeno atómico y una especie que a pesar de ser minoritaria, interactúa fuertemente con los componentes ionosféricos, que es el monóxido de nitrógeno.

Teniendo en cuenta estos constituyentes atmosféricos y los ionosféricos todas las reacciones químicas posibles a alturas de región E han sido resumidas en la Tabla 1. Dependiendo de las velocidades relativas y de las concentraciones de los reactantes algunos resultarán poco eficientes en la región E.

Las densidades de los constituyentes atmosféricos principales, N_2 , O_2 y O han sido abundantemente medidas y son bien conocidas, no así la de la especie minoritaria, NO , del cual hay escasas mediciones y éstas muestran una gran variación en el perfil de este componente atmosférico que no ha sido aún bien predicha por los modelos (ver p.e. Kondo y Ogawa, 1977). Por lo tanto para calcular los perfiles de concentraciones iónicas y electrónica, ya sean diurnos o que incluyan las variaciones diarias, habrá que resolver las ecuaciones de transporte de este especie atmosférica o recurrir a algún método alternativo cuando no se cuente con una medición de la misma.

3.1.1. La ecuación de la energía

a) Iones:

Todas las mediciones y predicciones de la temperatura de los iones dan como resultado que los mismos se encuentran en equilibrio térmico con las especies neutras hasta aproximadamente los 250 km, este resultado empírico coincide con el que

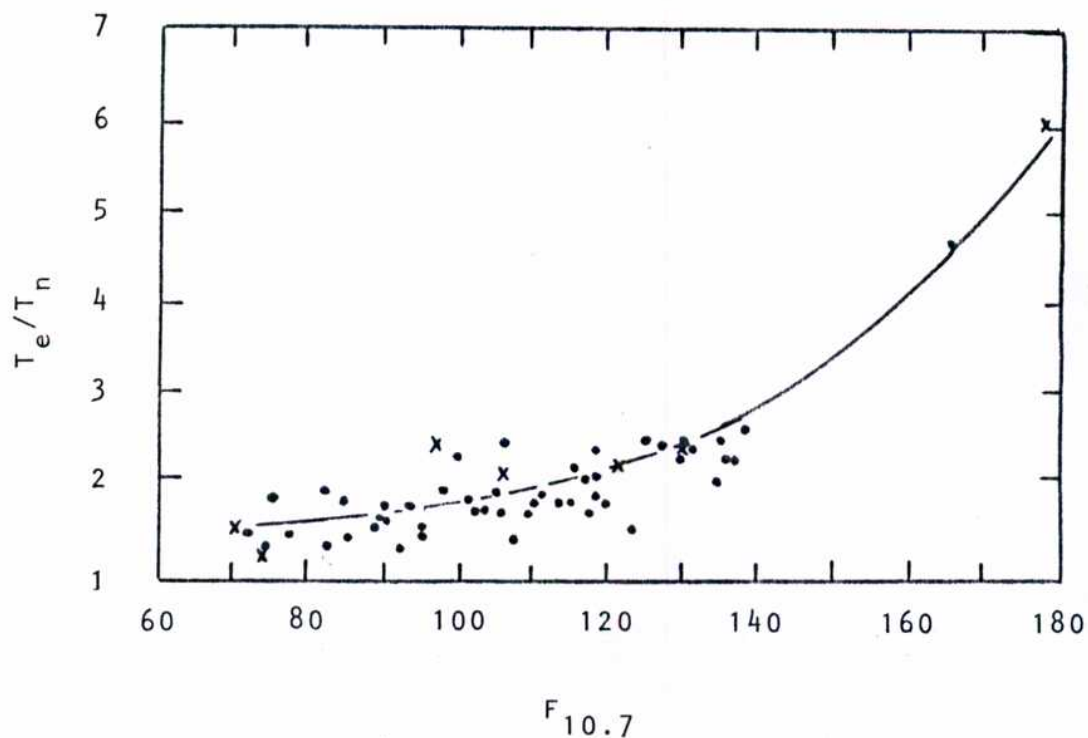


Figura 4: Variación de T_e/T_n con $F_{10.7}$ obtenida a partir de la medición de ν_e (puntos) y medida con sonda de Langmuir (cruces) junto a la exponencial que mejor ajusta el conjunto de datos (Duhau y Azpiazu, 1985).

se obtiene al resolver la ec. (3) (ver por ej. Banks, 1966). Por lo tanto la hipótesis habitual en la literatura es considerar que, en región E, $T_i = T_n$.

b) Electrones:

La temperatura de los electrones ha sido medida mediante dos métodos: con sondas de Langmuir "in situ" y con radares de dispersión incoherente.

Los resultados de estas mediciones son contradictorias, mientras las primeras dan una temperatura electrónica superior a la del gas neutro (ver por ej. Oyama e Hirao, 1979) la interpretación de los espectros de radar en la región E hasta aproximadamente los 120 km de altura muestran que hay equilibrio térmico entre ambos gases (ver por ej. Evans, 1969). Sin embargo Duhau y Azpiazu, 1981, mostraron que la medición de la frecuencia de colisión entre electrones y gas neutro por el método de absorción desviativa (ver por ej. Beynon y Owen Jones, 1965) constituye una medición indirecta de T_e a la altura del pico de densidad electrónica (aproximadamente 105 km) en días geomagnéticamente no perturbados y que los resultados promedio de estas mediciones concuerdan con las obtenidas "in situ" en días geomagnéticamente quietos. Además se observó que la variación de T_e , a esta altura, con la actividad solar es exponencial (ver fig. 4) y que el máximo desequilibrio térmico se encuentra alrededor de los 105 km (ver fig. 5) (Duhau y Azpiazu, 1985). El mecanismo de calentamiento de los electrones es, hasta el presente desconocido, la

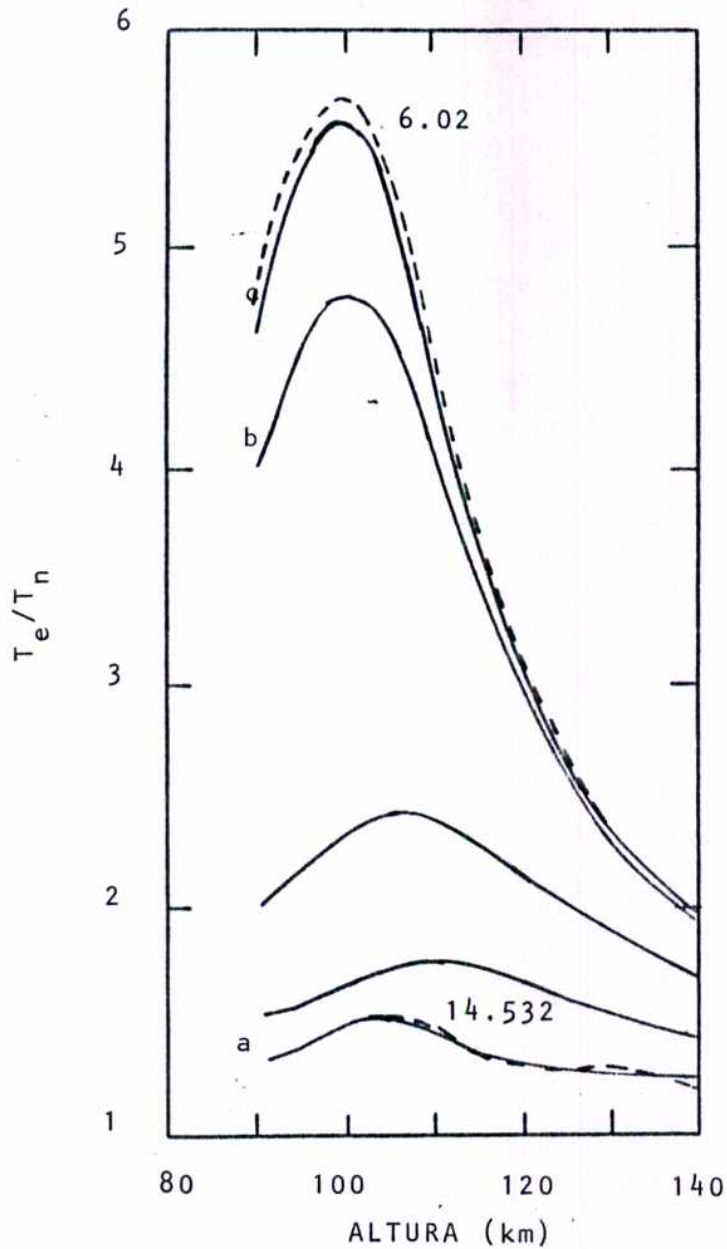


Figura 5: Variación de T_e/T_n con la altura para $F_{10.7}$ variando regularmente (cada 30 A.U.) desde $F_{10.7}=70$ (a) hasta $F_{10.7}=160$ (b) y para $F_{10.7}=166$ (c) junto con las mediciones realizadas en los vuelos 14.532 ($F_{10.7}=70$) y 6.02 ($F_{10.7}=166$) (líneas de trazos) (Duhau y Azpiazu, 1985).

energía provista por los fotoelectrones es insuficiente así como, aún a latitudes ecuatoriales, la que proveen las corrientes (efecto Joule). Se ha propuesto para zonas aurorales, que la inestabilidad de dos haces puede calentar los electrones por encima de la temperatura del gas neutro (ver por ej. St. Maurice y otros, 1981), sin embargo este mecanismo está siendo discutido (D'Angelo, 1986) y sólo explicaría el desequilibrio cuando los campos eléctricos fueran muy intensos ($> 40 \text{ mV}$).

En lo que sigue se verá cómo cada autor resuelve este inconveniente, ya que, aunque se limite a la situación de equilibrio fotoquímico, se debe conocer el perfil de T_e pues los coeficientes de recombinación electron-neutro dependen de esta temperatura.

3.2. Análisis de los modelos de formación de región E

3.2.1. Síntesis de los modelos teóricos

Para obtener el perfil de temperatura electrónica, necesario para calcular las densidades iónicas y electrónica, algunos autores plantean y resuelven la ecuación de la energía de los electrones, siendo el modelo más citado el elaborado por Timothy y otros, 1972.

Modelo de Timothy, Timothy, Willmore y Wager, 1972

Estos autores elaboran un modelo físico-química de las regiones E y F diurnas y resuelven la ecuación de la energía de los electrones ya que suponen que los iones se encuentran en equilibrio térmico con el gas neutro. Comparan la densidad y temperatura electrónicas calculadas con las mediciones realizadas sobre Woomera (Australia). Para ello suponen que

a) como hay equilibrio fotoquímico la ec. (1) se reduce a

$$q_i = l_i$$

b) en la ecuación de la energía de los electrones los únicos términos no despreciables son los de variación debida a colisiones. Para ello consideran que los electrones absorben energía por colisiones elásticas con fotoelectrones (Q) y que la pierden por colisiones elásticas (L_{ee}) e inelásticas (L_{ei}) con las especies neutras, la ec. (3) en condiciones cuasi-estacionarias se reduce entonces a:

$$Q + L_{ee} + L_{ei} = 0$$

Concluyen que, en región E, $L_{ei} \gg L_{ee}$ y que los electrones pierden energía principalmente excitando los niveles rotacionales de N_2 y O_2 y la estructura fina del O.

Por debajo de los 140 km los perfiles calculados predicen una convergencia rápida entre T_e y T_n a pesar de que la medi-

Tabla 2

Reacción	Coeficiente de velocidad ($\text{cm}^3 \text{seg}^{-1}$)
$\text{O}^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}_2^+$	$(2 \pm 1) \times 10^{-11}$
$\text{O}^+ + \text{NO} \rightarrow \text{N} + \text{O}_2^+$	3×10^{-12}
$\text{O}^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{N} + \text{NO}^+$	$(2 \pm 1) \times 10^{-12}$
$\text{O}^+ + \text{NO} \rightarrow \text{O} + \text{NO}^+$	$< 2.4 \times 10^{-11}$
$\text{N}_2^+ + \text{O} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}^+$	1×10^{-12}
$\text{N}_2^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_2^+$	1×10^{-10}
$\text{N}_2^+ + \text{NO} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{N}_2$	5×10^{-10}
$\text{N}_2^+ + \text{O} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{N}$	2.5×10^{-10}
$\text{N}_2^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}^+ + \text{NO}$	$< 3 \times 10^{-14}$
$\text{N}_2^+ + \text{O} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{N}$	2.5×10^{-10}
$\text{N}_2^+ + \text{e} \rightarrow \text{N} + \text{N}$	$1.94 \times 10^{-6} T_e^{-1/3}$
$\text{O}_2^+ + \text{NO} \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}^+$	7.2×10^{-10}
$\text{O}_2^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{NO}^+ + \text{NO}$	$1 \times 10^{-11} \exp(-\frac{300}{T})$
$\text{O}_2^+ + \text{N} \rightarrow \text{NO}^+$	1.8×10^{-10}
$\text{O}_2^+ + \text{e} \rightarrow \text{O} + \text{O}$	$0.99 \times 10^{-5} T_e^{-0.7}$
$\text{NO}^+ + \text{e} \rightarrow \text{N} + \text{O}$	$1.5 \times 10^{-4} T_e^{-1}$
	i) $1.5 \times 10^{-4} T_n^{-1}$
	ii) $4.5 \times 10^{-4} T_e^{-1}$

ción realizada mostrará que a los 120 km $T_e \cong 1.5 T_n$. Concluyen que la energía térmica necesaria para mantenerla es un orden de magnitud mayor que la suministrada por los fotoelectrones.

c) Las reacciones químicas son las resumidas en la tabla 2.

De acuerdo con este modelo, para computar las densidades iónicas es necesario conocer: las densidades y temperatura de los constituyentes neutros, el flujo solar incidente y su atenuación con la altura, y los coeficientes de las reacciones químicas consideradas.

Calculan los perfiles de densidades iónicas y de temperatura electrónica utilizando los siguientes datos o modelos.

A) Miden con un espectrómetro de barrido de UVL en el rango

$$100 \text{ \AA} < \lambda < 1050 \text{ \AA}$$

B) Con un policromador miden los perfiles de extensión de cinco líneas ($\lambda = 303,8; 584,3; 833-835, 865-885$ y $1025,7$) y de la ley de Beer-Lambert de atenuación:

$$I_\lambda(h) = I_\lambda(\infty) \exp \left[- \int_h^\infty n_J \sigma_{\text{abs}J}(\lambda) dh \right],$$

calculan las concentraciones de los constituyentes N_2 , O_2 y O de la atmósfera neutra.

C) Suponen tres modelos alternativos de concentración de los constituyentes minoritarios NO y N (ver tabla 3).

D) Determinan la temperatura del gas neutro a partir de la altura de escala del N_2 .

Tabla 3

Altura (km)		120	160	200	240	270
Concentración de NO(10^7 cm^{-3})	(i)	1	1	1	1	1
	(ii)	1	1	1	1	1
	(iii)	5	5	5	5	5
Concentración de N(10^7 cm^{-3})	(i)	7	6.5	11	2.5	2.8
	(ii)	0.7	0.65	1.1	0.25	0.28
	(iii)	0.7	0.65	1.1	0.25	0.28

- E) Las secciones eficaces de la absorción y eficiencias de ionización, al igual que en los demás modelos ionosféricos, son las medidas en laboratorio por Huffman, 1969.
- F) Los coeficientes de las reacciones químicas son los tabulados en la tabla 2. Obsérvese que, para la recombinación electrónica con NO^+ realizaron dos hipótesis alternativas.

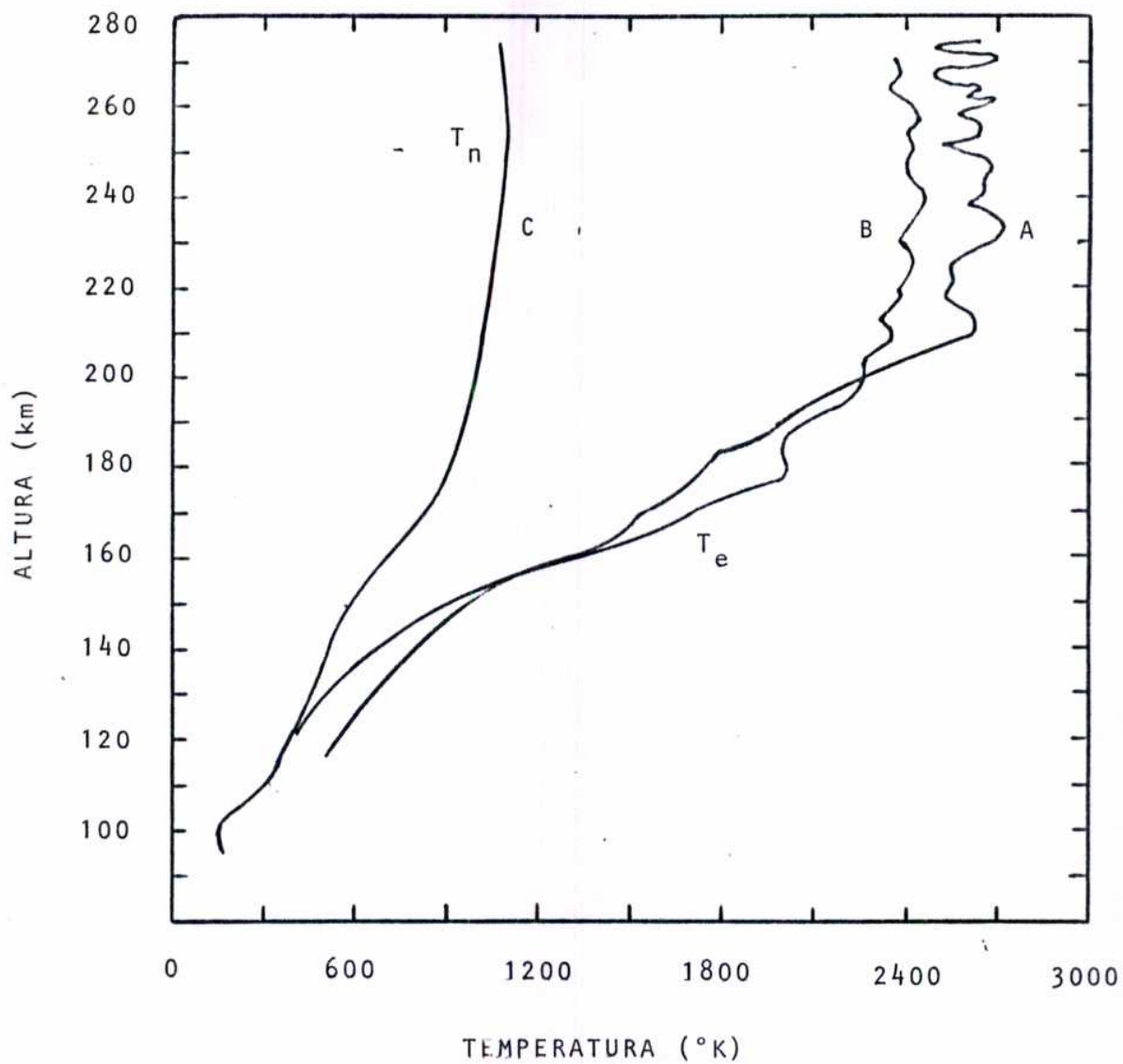


Figura 6a: Perfiles de temperatura electrónica: medido (A) y calculado (B) junto con el perfil de temperatura del gas neutro (C) (Timothy y otros, 1972).

- i) $T_e = T_n$, de acuerdo con el resultado que obtuvieron resolviendo la ecuación de la energía de los electrones.
- ii) Aumentaron el coeficiente en un 30% manteniendo la dependencia con la temperatura electrónica, y como dato de ésta utilizaron la medición simultánea realizada con una sonda de Langmuir ($T_e > T_n$).

En las figuras 6 a, b y c se observan los resultados obtenidos por estos autores. Se han graficado los perfiles de temperatura electrónica calculado y medido en la fig. 6 a.; obsérvese que, en la región E los resultados de T_e divergen entre sí y el perfil calculado coincide con el de T_n . Los perfiles de las densidades absolutas de los dos constituyentes ionosféricos principales en región E (esto es $n(\text{NO}^+)$ y $n(\text{O}_2^+)$), calculados utilizando el perfil de temperatura electrónica medida con la sonda de Langmuir, han sido graficados en la fig. 6 b. (curvas a) junto con la densidad electrónica medida (curva b). Como rige la cuasi-neutralidad eléctrica estos dos perfiles debieran coincidir. Sin embargo esto no es así y las mayores discrepancias se encuentran en la región E. Los autores, entonces, probaron dos alternativas: incisos (i) y (ii) en el cálculo de la recombinación de NO^+ . Los resultados están también graficados en la fig. 6b. Las curvas (c) corresponden a la suposición de equilibrio térmico y las (d) al cambio en el coeficiente de recombinación. Obsérvese que en ninguno de los dos casos en la región E la densidad iónica total

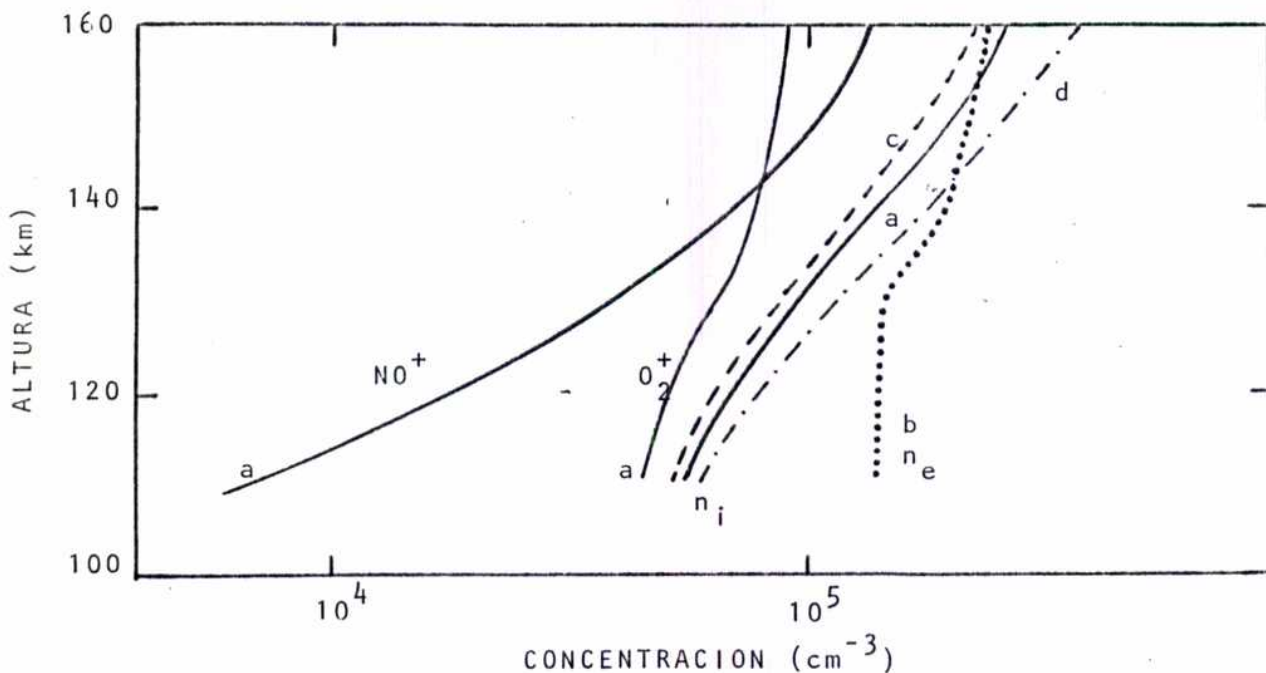


Figura 6b: Perfiles de concentraciones iónicas calculados: utilizando el perfil de T_e medido (curvas a), considerando $T_e = T_n$ (c), suponiendo que el coeficiente de recombinación de NO^+ es 30% mayor (d); junto con el perfil de n_e medido (b) (Timothy y otros, 1972).

alcanza densidad electrónica medida.

El perfil de densidades iónicas relativas calculadas junto con una medición del mismo realizada en condiciones equivalentes (alta actividad solar, día geomagnéticamente quieto, latitud media y hora cercana al mediodía) están graficados en la fig. 6 c, la discrepancia en la región E puede deberse al perfil de densidad de NO adoptado.

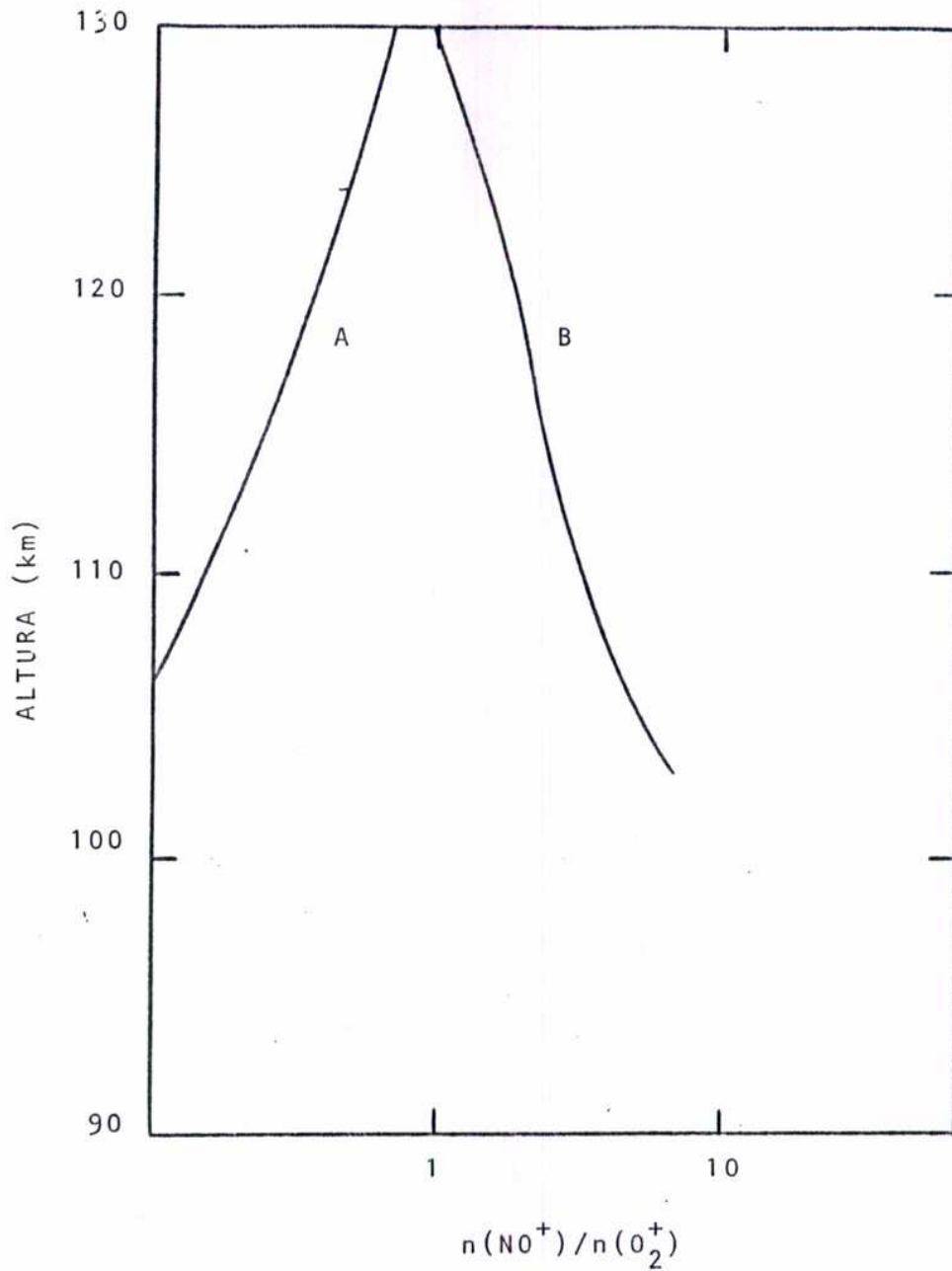


Figura 6c: Perfiles de densidad iónica relativa: calculado por Timothy y otros, 1972 (A), medido por Istomin y Pokhunkov, 1963 ($F_{10.7} = 166$) (B).

Como ya se vio en el modelo de Timothy y otros, 1972 (ver también por ej. Schunk y Walker, 1973 b), cuando se calcula la temperatura electrónica a partir de la ecuación de la energía el perfil resultante coincide con el de la temperatura del gas neutro por debajo de ~ 120 km de altura. Más aún, si se tiene en cuenta que las mediciones realizadas con sonda de Langmuir han sido puestas en cuestión (Duhau y Azpiazu, 1981, Oyama e Hirao, 1985) se explica el motivo por el cual casi todos los modelos de formación de región E no resuelven la ec. (3) y suponen que hay equilibrio térmico, $T_e = T_n$, y consideran el perfil de T_n como dato.

Modelo de Schunk y Walker, 1973

En este modelo se resuelven simultáneamente las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento de las cuatro especies ionizadas, N_2^+ , O^+ , NO^+ y O_2^+ , de los electrones y de los componentes atmosféricos principales y minoritarios en las regiones E y F y su variación diaria.

Para resolver el sistema de ecuaciones (1) y (2) se supone:

- a) Las especies neutras tienen todas la misma velocidad media.
- b) Únicamente las variaciones con la altura de las magnitudes físicas son apreciables: esta hipótesis limita la aplicación del modelo a latitudes medias ya que tanto en la zona ecuatorial como auroral las variaciones latitudinales y longitudina

Tabla 4

Reacción	Coficiente de velocidad (cm ³ seg ⁻¹)
$O^+ + N_2 \rightarrow NO^+ + N$	$1.2 \times 10^{-12} (300/T_i)$
$O^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + O$	$2 \times 10^{-11} (300/T_i)^{1/2}$
$O^+ + NO \rightarrow NO^+ + O$	2×10^{-11}
$N_2^+ + O \rightarrow NO^+ + N$	1.4×10^{-10}
$N_2^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + N_2$	1×10^{-10}
$N_2^+ + NO \rightarrow NO^+ + N_2$	3.3×10^{-10}
$N_2^+ + e \rightarrow N + N$	$2.9 \times 10^{-7} (300/T_e)^{1/3}$
$O_2^+ + N_2 \rightarrow NO^+ + NO$	5×10^{-16}
$O_2^+ + NO \rightarrow NO^+ + O_2$	6.3×10^{-10}
$O_2^+ + e \rightarrow O + O$	$2.2 \times 10^{-7} (300/T_e)^{1/2}$
$NO^+ + e \rightarrow N + O$	$4.6 \times 10^{-7} (300/T_e)^{1/2}$

les pueden ser del mismo orden que las radiales.

c) El campo magnético puede ignorarse en la ec. (2).

d) Las reacciones químicas consideradas son las indicadas en la Tabla 4.

e) Los términos no lineales de difusión térmica, viscosidad y aceleración son despreciables.

f) Sólo las colisiones elásticas son importantes en el cálculo de variación de cantidad de movimiento.

Con estas hipótesis para calcular las densidades iónicas y electrónica, habiendo supuesto equilibrio térmico y T_n como dato, las ecuaciones (1) y (2) se reducen a:

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} + \bar{v} \cdot (n_j \bar{u}_j) = q_j - \ell_j \quad (6)$$

$$\bar{v} P_j - n_j m_j \bar{G} - n_j e_j \bar{E} = n_j m_j \sum_{\ell} \nu_{j\ell} (\bar{u}_{\ell} - \bar{u}_j) \quad (7)$$

donde $P_j = n_j kT_j$ es la presión parcial del constituyente j y

$$\nu_{j\ell} = \frac{16}{3} \frac{n_{\ell} m_{\ell}}{m_{\ell} + m_j} \Omega_{j\ell}^{(1,1)} \quad (7.1)$$

es la frecuencia de colisión de la partícula j con el gas ℓ y $\Omega^{(1,1)}$ es la integral de colisión de Chapman y Cowling (ver por ej. Chapman y Cowling, 1970).

Para calcular el campo eléctrico se tiene en cuenta que cuando el campo \bar{B} es despreciable la movilidad de los electrones es mucho mayor que la de los iones y entonces \bar{E} está determinado por la ec. de movimiento de los electrones, es decir:

$$e\bar{E} = - \frac{1}{n_e} \bar{v} \rho_e + m_e \bar{G} - m_e \nu_{en} (\bar{u}_e - \bar{u}_n) \quad (8)$$

Nótese que, debido a la aproximación considerada en (d) el campo eléctrico no depende de la corriente, término que, a altu-

ras de región F es aún mayor que el de colisiones y en la región E es del mismo orden.

Usando la ec. (8) para el campo electrostático, recordando que los iones existentes tienen una sola carga positiva, despreciando los términos del orden m_e/m_i y recordando que asumen $T_e = T_i = T_n$, la velocidad de los iones, resulta:

$$\bar{u}_i = \bar{u}_n - D \left[\frac{1}{n_i} \bar{v} n_i - \frac{m_i \bar{G}}{kT} + \frac{2}{T} \bar{v}(T) + \frac{1}{n_e} \bar{v} n_e \right] \quad (9)$$

donde

$$D = \frac{kT}{m_i \gamma_{in}} \quad \text{es el coeficiente de difusión ión-neutro.}$$

El sistema de ecuaciones (9) está acoplado ya que rige la cuasineutralidad eléctrica, $\sum n_i = n_e$. Para simplificar los cálculos los autores consideran por separado las regiones E y F.

Para evaluar las concentraciones iónicas en la región E, se utilizan los siguientes datos:

- A) El flujo solar incidente medido por Hinteregger, 1970, dividido el espectro en once intervalos.
- B) Las secciones eficaces de absorción y ionización para estos intervalos obtenidas por Hinteregger y otros, 1965.
- C) El modelo de atmosfera neutra J71 (Jacchia, 1971) para determinar las concentraciones de los constituyentes principales y la temperatura del gas neutro.
- D) El perfil de concentración de NO utilizado por Keneshea y otros, 1970 y se supone que es estacionario.

E) Los coeficientes de las reacciones utilizadas son las indicadas en la Tabla 4.

Las ecuaciones de las densidades iónicas son obtenidas por estos autores sustituyendo la ec. (9) en las ecs. (6). Esto da lugar a un conjunto de 3 ecuaciones en derivadas parciales no lineales de segundo orden y acopladas. Se supone que el ión N_2^+ se encuentra en equilibrio fotoquímico durante todo el día.

El sistema de ecuaciones fue resuelto numéricamente. Supo-

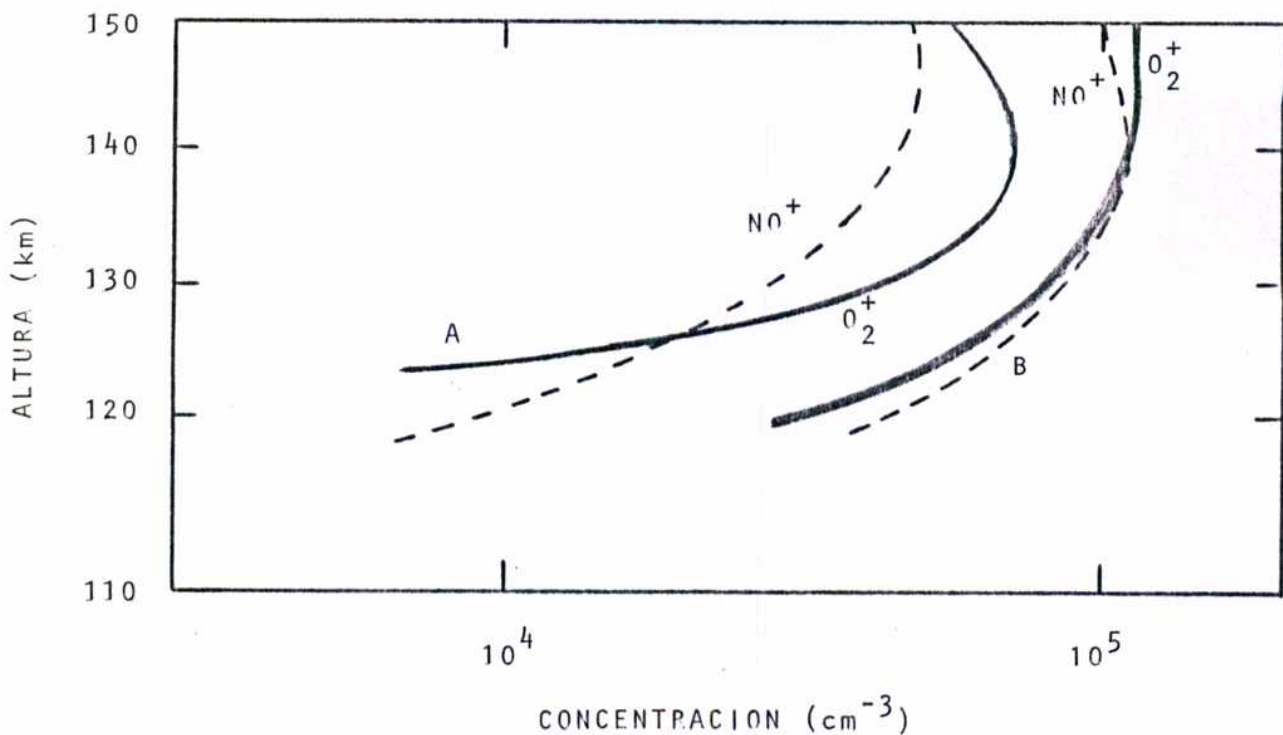


Figura 7a: Perfil de concentraciones iónicas: calculadas por Schunk y Walker, 1973a (A) y medidas por Zbinden y otros, 1975 ($F_{10,7} = 122$) (B).

que de acuerdo con el resultado de estos autores NO^+ es el ión predominante en la región E inferior y que, en cambio, por encima de ~ 115 km, $n(\text{O}_2^+) > n(\text{NO}^+)$. Este resultado no concuerda con las mediciones realizadas a la misma actividad solar ($F_{10.7} \sim 120$) por Zbinden y otros, 1975 (línea de trazos en la misma figura).

Modelo de Keneshea, Narcisi y Swider (1970)

Estos autores elaboran un modelo de densidades iónicas y electrónica considerando las reacciones químicas indicadas en la tabla 5. A diferencia de Schunk y Walker (1973 a) consideran la variación temporal de las densidades iónicas y desprecian el término de transporte en la ecuación de continuidad.

De acuerdo con estas hipótesis para calcular los perfiles de concentraciones ionosféricas habrá que resolver la ecuación (1) para cada especie ionizada, y neutra o usar mediciones o modelos para los componentes atmosféricos.

Estos autores utilizan los siguientes datos:

- A) El flujo solar incidente corresponde, para $\lambda > 110 \text{ \AA}$ al medido por Watanabe y Hinteregger, 1962, para $1 \text{ \AA} < \lambda < 10 \text{ \AA}$ las mediciones de Nicolet y Aitkin, 1960 para baja actividad solar, pero el flujo fue aumentando 4 veces en el rango 1-170 \AA para que la densidad electrónica calculada coincidiera con las mediciones realizadas por Narcisi y otros, 1970.

Tabla 5

Reacción	Coeficiente de velocidad ($\text{cm}^3 \text{seg}^{-1}$)
$\text{O}^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2^+ + \text{O}$	2×10^{-11}
$\text{O}^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{NO}^+ + \text{N}$	1×10^{-12}
$\text{N}_2^+ + \text{O} \rightarrow \text{O}^+ + \text{N}_2$	1×10^{-12}
$\text{N}_2^+ + \text{O} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{N}$	2.5×10^{-10}
$\text{N}_2^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2^+ + \text{N}_2$	5×10^{-11}
$\text{N}_2^+ + \text{e} \rightarrow \text{N} + \text{N}$	$2.8 \times 10^{-7} (300/T)$
$\text{O}_2^+ + \text{NO} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{O}_2$	6×10^{-10}
$\text{O}_2^+ + \text{N} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{O}$	1.8×10^{-10}
$\text{O}_2^+ + \text{e} \rightarrow \text{O} + \text{O}$	$2 \times 10^{-7} (300/T)$
$\text{NO}^+ + \text{e} \rightarrow \text{N} + \text{O}$	$4 \times 10^{-7} (300/T)$

- B) Las secciones eficaces de absorción son las provistas por Watanabe y Hinteregger, 1962.
- C) El modelo atmosférico CIRA 1965 (Cospar International Reference Atmosphere).
- D) El perfil de NO medido por Barth, 1966 a baja actividad solar fue modificado en la región E inferior para que el cociente $n(\text{NO}^+)/n(\text{O}_2^+)$ calculado para $x < 50^\circ$, es decir en horas cercanas al mediodía, coincidiera con las mediciones.
- E) Los coeficientes de las reacciones químicas tabulados en la Tabla 5.

En las figs. 8 a y b se han graficado los resultados de este modelo de densidades iónicas absolutas y el perfil de $n(\text{NO})$ utilizado junto con las mediciones realizadas por C.Y. Johnson, 1966 (fig. 8 a) y de Barth, 1966 respectivamente (fig. 8 b) para la misma actividad solar. Nótese que los valores absolutos de las densidades iónicas calculadas son de 2 a 4 veces superiores a los valores medidos. Esta diferencia podría deberse a que el flujo solar incidente fue aumentado para que coincidiera la densidad electrónica resultante con las mediciones realizadas por Narcisi y otros, 1970 (ver punto (A) de los datos utilizados); pero estas mediciones corresponden a un día de actividad solar moderada ($F_{10.7} = 130$) y no baja con el resto de los datos utilizados.

Obsérvese además en la fig. (8 b) que el perfil adoptado para $n(\text{NO})$ difiere del medido por Barth, 1966 principalmente en la región E inferior.

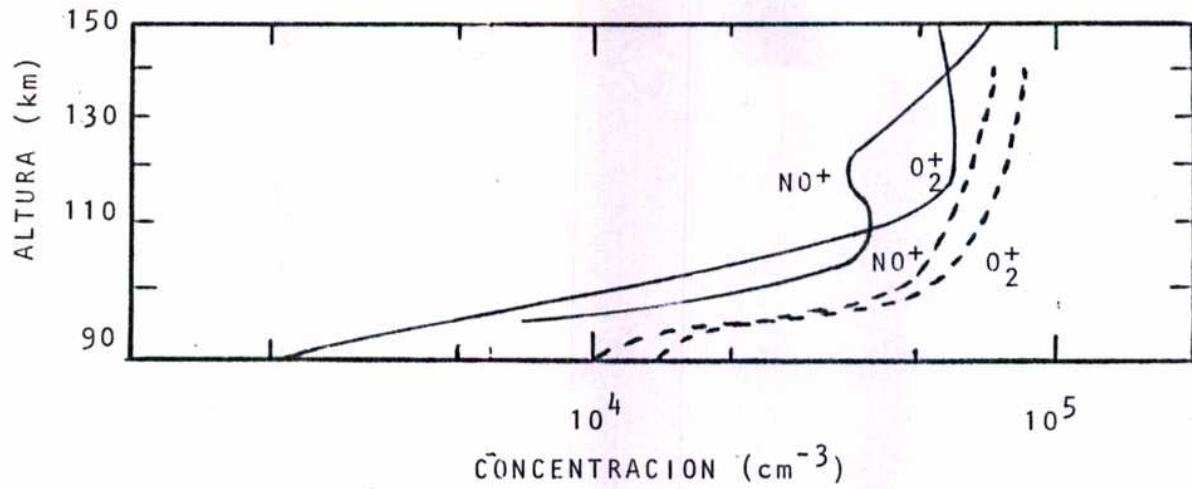


Figura 8a: Perfiles de concentraciones iónicas: calculados por Keneshea y otros, 1970 (líneas de trazos) y medidos por Johnson, 1966 ($F_{10.7}=73$) (líneas llenas).

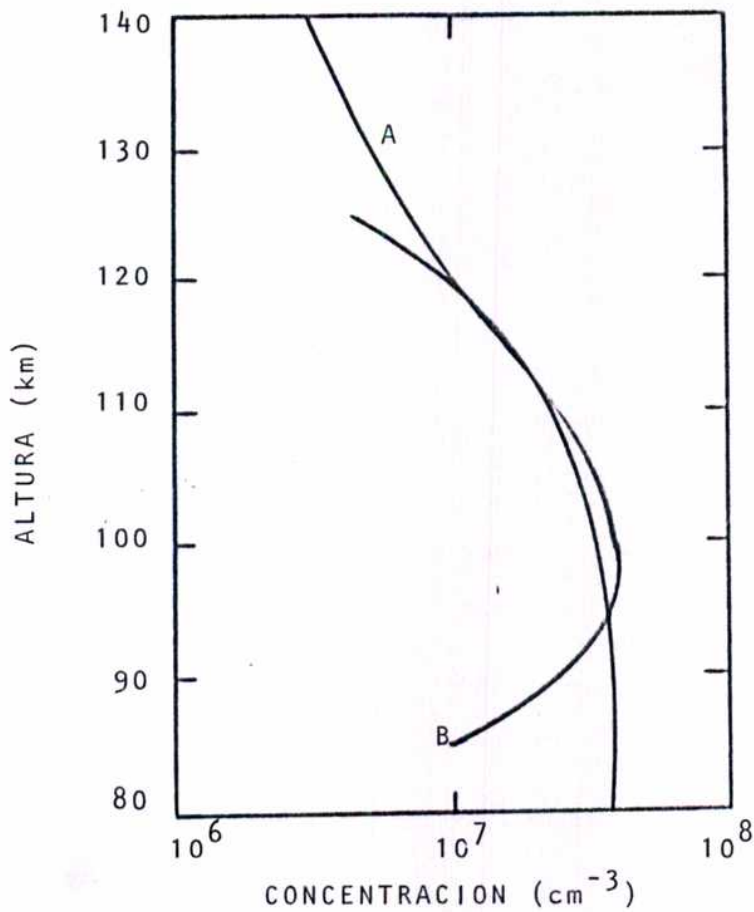


Figura 8b: Perfiles de NO: adoptado por Keneshea y otros, 1970 (A) y medido por Barth, 1966 ($F_{10.7}=80$) (B).

Modelo de Chakrabarty, Chakrabarty y Björn (1977)

Estos autores elaboran un modelo diurno de formación de región E en el cual se invierte la ecuación de continuidad de los electrones y de los iones de manera de calcular mediante la misma el perfil de concentración del monóxido de nitrógeno utilizando como dato el de electrones.

Para calcular el sistema de ecuaciones se realizan las siguientes hipótesis.

- a) Las reacciones involucradas se resumen en la tabla 6 a.
- b) Se supone que $n(\text{NO})$ y $n(\text{N}^4\text{S})$ no varían con la hora del día.
- c) En aquellas reacciones cuyo resultado sea N se suponen 3 modelos distintos que atribuyen distinta proporción de $\text{N}(\text{S}^4)$ y $\text{N}(\text{D}^2)$ (ver tabla 6 b).

Para calcular las densidades iónicas se utilizan los siguientes modelos y/o mediciones:

- A) Flujo solar incidente medido por Schmidtke, 1976 y Manson, 1976 para baja actividad solar; las mediciones de Heroux y otros, 1974 y de Taylor, 1972 para UVL a actividad solar moderada y alta y en el rango de rayos X se duplicaron y cuatruplicaron los datos obtenidos por Manson, 1976 según la actividad solar fuera moderada o alta respectivamente.
- B) Las concentraciones y temperatura de los constituyentes atmosféricos fueron obtenidos del modelo CIRA, 1972.
- C) Los coeficientes de las reacciones involucradas se resumen en la tabla 6 a.

Tabla 6 a

Reacción	Coefficiente de velocidad ($\text{cm}^3 \text{seg}^{-1}$)
$\text{O}^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{NO}^+ + \text{N}$	5×10^{-13}
$\text{O}^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}_2^+$	$1 \times 10^{-9} T^{-0.7}$
$\text{N}_2^+ + \text{O} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{N}$	2.5×10^{-10}
$\text{N}_2^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2^+ + \text{N}_2$	1×10^{-10}
$\text{N}_2^+ + e \rightarrow \text{N} + \text{N}$	$3.1 \times 10^{-6} (T_e)^{-0.39}$
$\text{O}_2^+ + \text{N} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{O}$	2×10^{-10}
$\text{O}_2^+ + \text{NO} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{O}_2$	8×10^{-10}
$\text{O}_2^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{NO}^+$	1×10^{-16}
$\text{O}_2^+ + e \rightarrow \text{O} + \text{O}$	$2 \times 10^{-7} (300/T_e)$
$\text{NO}^+ + e \rightarrow \text{N} + \text{O}$	$5 \times 10^{-7} (300/T_e)$

Tabla 6 b

Reacciones	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	%N(^2D)	%N(^4S)	%N(^2D)	%N(^4S)	%N(^2D)	%N(^4S)
$\text{N}_2^+ + \text{O} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{N}$	100	0	20	80	100	0
$\text{NO}^+ + e \rightarrow \text{O} + \text{N}$	100	0	20	80	100	0
$\text{N}_2 + \text{fotoelectrones} \rightarrow \text{N} + \text{N}$	50	50	100	0	100	0

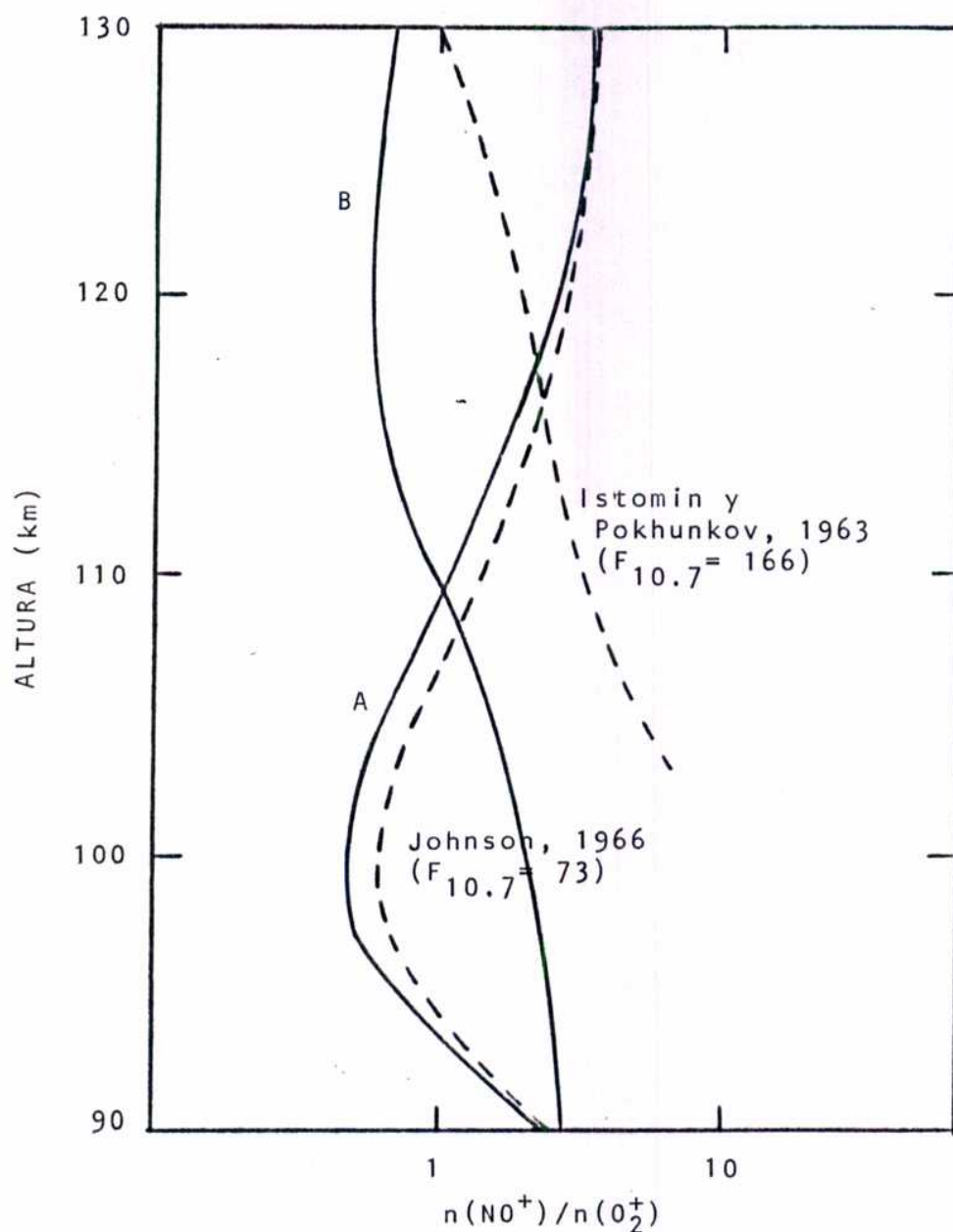


Figura 9a: Perfiles de densidades iónicas relativas: calculados por Chakrabarty y otros, 1978 para baja y alta actividad solar (curvas A y B respectivamente) utilizando el modelo 1 de $n(N)$ (ver Tabla 6b) y medidos para las mismas condiciones solares (líneas de trazos).

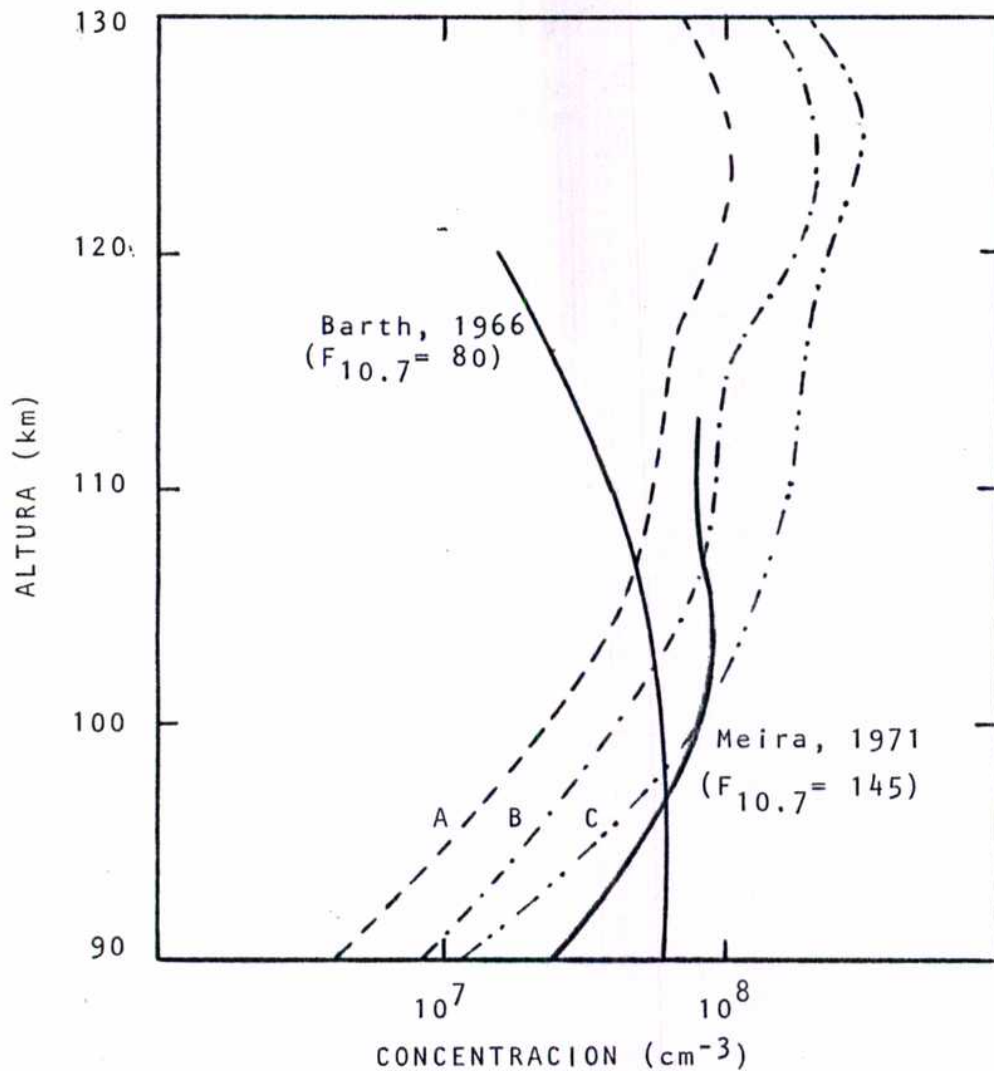


Figura 9b: Perfiles de concentración de NO: calculados por Chakrabarty y otros, 1978 utilizando el modelo 1 de $n(N)$ (ver tabla 6b) para actividades solares baja, moderada y alta (curvas A, B y C respectivamente) y medidos por Barth, 1966 y Meira, 1971 (líneas llenas).

- D) Secciones eficaces de absorción y eficiencias de ionización provistas por Huffman, 1969.
- E) Disociación de N_2 por impacto de electrones calculada de acuerdo con Golshan y Sechrist, 1974.

En las figs. 9 a y b se han graficado los resultados de este modelo junto con las mediciones correspondientes. Obsérvese en la fig. 9 a que este modelo no reproduce el comportamiento del cociente $n(NO^+)/n(O_2^+)$ a ninguna actividad solar en la región E inferior y que el modelo predice que $n(NO^+)/n(O_2^+) > 1$ en la zona cercana a los 130 km para alta actividad solar como lo indican las mediciones pero no reproduce el comportamiento a baja actividad solar. En la fig. 9 b se han graficado los perfiles calculados y medidos de $n(NO)$. Obsérvese nuevamente que las discrepancias son más notorias para baja actividad solar.

3.2.2. Síntesis de los modelos empíricos

Además de los modelos teóricos de formación de región E que, en general, han sido aplicados a una única actividad solar (excepto al de Chakrabarty y otros, 1977) se han elaborado modelos empíricos de variación de las densidades iónicas con la actividad solar. Los dos más citados en la literatura son los de Mitra y Banerjee, 1972 y de Danilov y Semenov, 1978, éste último, además, considera la variación con el ángulo cenital solar.

Modelo de Mitra y Banerjee (1972)

Estos autores recopilan las mediciones de densidades iónicas

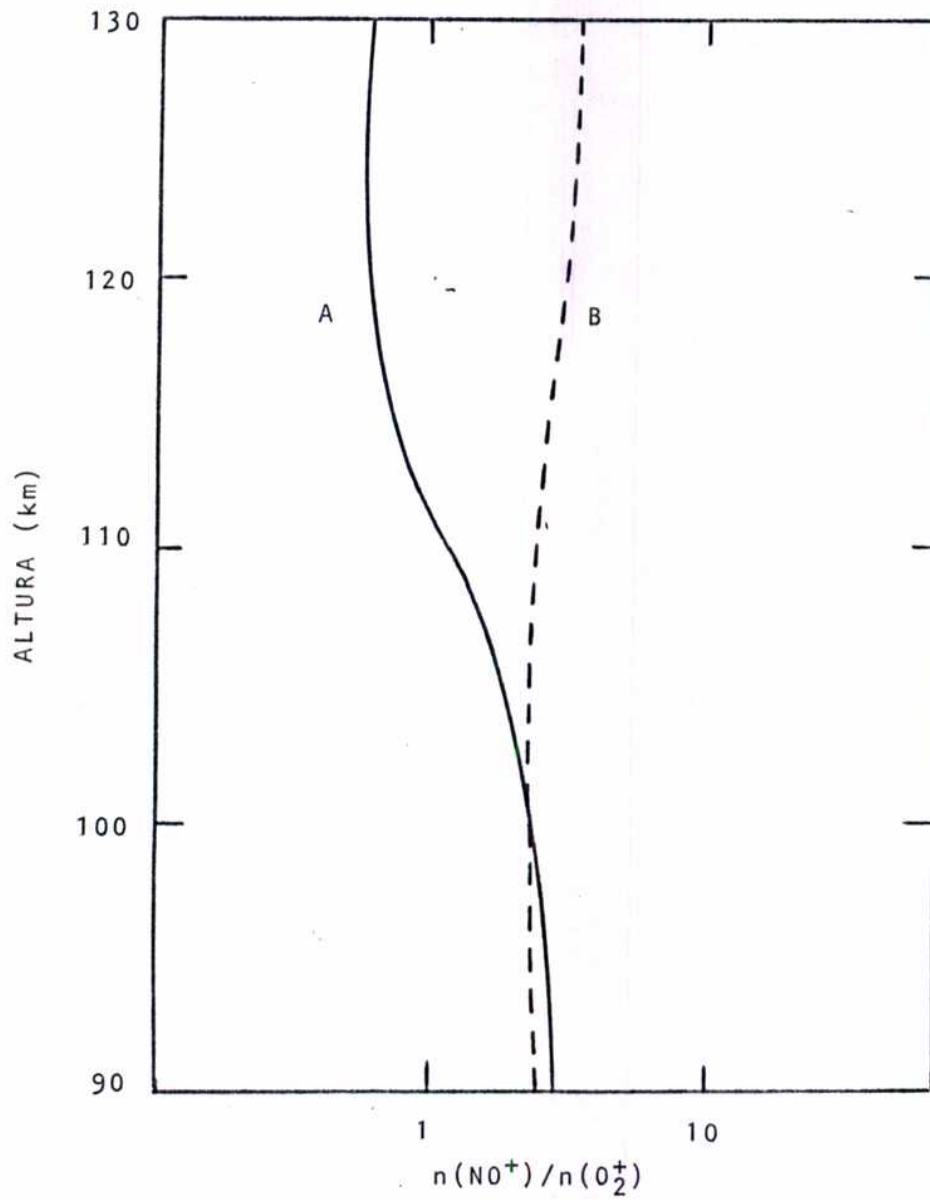


Figura 10: Perfiles de densidades iónicas relativas promedio calculados por Mitra y Banerjee, 1972 para baja y alta actividad solar (curvas A y B respectivamente).

y calculan los perfiles de $n(\text{NO}^+)/n(\text{O}_2^+)$; para las mismas, agrupan estos perfiles de acuerdo con la actividad solar (baja y alta) y estudian las tendencias de los perfiles promedios así obtenidos. En las fig. 10 se han graficado estos perfiles promedio. Se observa que a alta actividad solar predomina el oxígeno molecular a alturas superiores a ~ 110 km. Los autores realizan una estimación de las densidades iónicas utilizando la condición de equilibrio fotoquímico y concluyen que a alturas inferiores a los 150 km la combinación de densidades $4n(\text{NO}) + n(\text{N})$ debe aumentar con la actividad solar.

Modelo de Danilov y Semenov (1978)

Estudian mediciones de densidades iónicas realizadas a distintas latitudes, horas del día y época del año y principalmente, la variación de las densidades iónicas relativas con el ángulo cenital solar. Sólo 2 de las mediciones corresponden a alta actividad solar y estos autores concluyen que las densidades iónicas relativas dependen sólo a 2° orden de la actividad solar y a 1° orden del ángulo cenital solar.

En la fig. 11 se han graficado los resultados de estos autores para intervalos regulares de x .

3.3. Conclusiones

De lo anteriormente expuesto se concluye que los modelos de formación de región E son dispares y variados entre sí pero que, en general, sus resultados no son satisfactorios. En lo que sigue

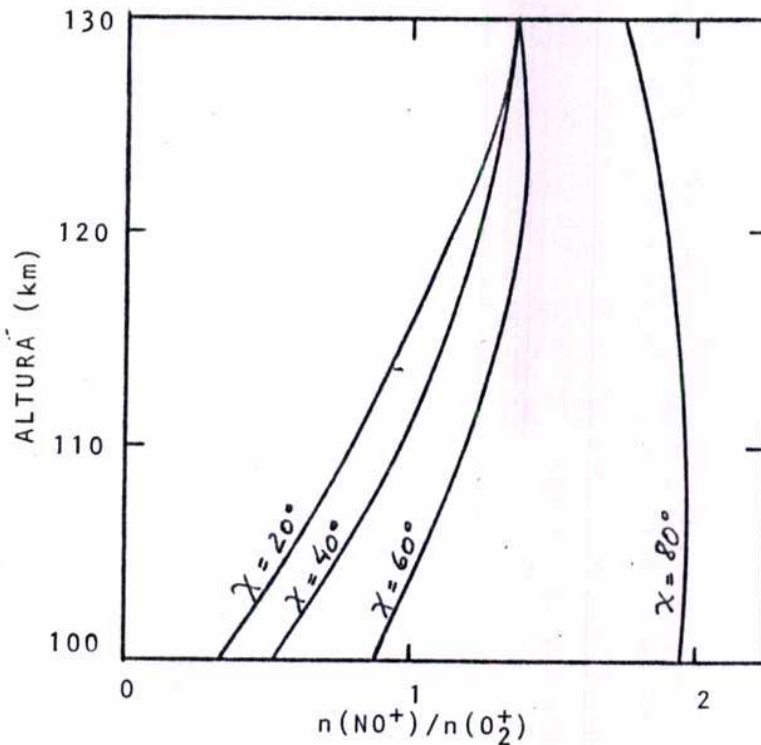


Figura 11: Perfiles de densidades iónicas relativas de acuerdo con el modelo de Danilov y Semenov, 1978, para distintos valores de ángulo cenital solar.

se comentan las posibles causas de discrepancias con las mediciones.

Para los modelos teóricos éstas podrían ser:

- a) En la resolución de la ecuación de movimiento ninguno de los autores consideran la variación de la misma debida a colisiones inelásticas, además, de despreciar el campo magnético, por lo que los perfiles de velocidades calculadas no corresponden a las condiciones ionosféricas de la región E.
- b) En cuanto a la ecuación de la energía de los electrones, con

excepción del modelo de Timothy y otros, 1972, con el cual resulta $T_e = T_n$, los demás autores no la resuelven y utilizan a priori esta condición. Sin embargo, como ya se mencionó anteriormente, las mediciones realizadas "in situ" con sondas de Langmuir indican que $T_e > T_n$. Este problema ya ha sido analizado por Duhau y Azpiazu, 1981 quienes encontraron que $T_e > T_n$ en toda la región E.

- c) Ninguno de los autores de modelos de formación de región E analiza la posibilidad de que, en esta zona, hubiera un porcentaje de especies neutras o ionizadas en estados excitados, así como tampoco las variaciones de los coeficientes de velocidad de reacción que ello produciría.
- d) Cabe señalar además que en los modelos teóricos no se ha realizado un análisis sobre la compatibilidad de los datos de los parámetros y no se han tenido en cuenta las variaciones de los perfiles de concentración del monóxido de nitrógeno con la actividad solar o la hora del día.

En cuanto a los modelos empíricos, proveen de un análisis de la variación del perfil de $n(\text{NO}^+)/(\text{O}_2^+)$ con el ángulo cenital solar (Danilov y Semenov, 1978) y con la actividad solar (Mitra y Banerjee, 1972) pero en ambos casos no se han parametrizado las otras variables que influyen sobre las condiciones ionosféricas como la latitud y actividad geomagnética, siendo esta última de suma importancia ya que la temperatura electrónica depende fuertemente de la misma.

C A P I T U L O 4

Modelo de formación de la región E

De acuerdo con lo discutido en el capítulo anterior, se elabora un modelo de formación de región E diurna (Azpiazu y Duhau, 1982) a fin de analizar los problemas pendientes en el que:

- a) teniendo en cuenta los valores de los coeficientes de velocidad de las reacciones y las órdenes de magnitud de las densidades de los reactantes se eliminan aquellas reacciones que no afecten significativamente las densidades iónicas resultantes.
- b) teniendo en cuenta la incerteza en la validez de la ecuación de la energía de los electrones y de acuerdo con los resultados de Duhau y Azpiazu, 1981, se elimina la hipótesis $T_e = T_n$ y como dato de perfil de temperatura electrónica se utiliza el modelo empírico de variación de T_e/T_n con la actividad solar de Duhau y Azpiazu, 1985.
- c) se analizan los parámetros necesarios para calcular las densidades iónicas y, en el caso de haber discrepancias entre distintas mediciones o con la teoría se estudian críticamente los métodos de medición y se determina qué resultado corresponde utilizar o, en el caso en que dos o más mediciones fueran equivalentes la incerteza que esto provocar.
- d) se prefieren mediciones simultáneas de todos los parámetros, en caso de no haberla, se determina qué mediciones y/o modelos utilizar.

e) se analiza la variación de los coeficientes de velocidad de reacción con el estado de excitación de los reactantes y su efecto en el cálculo de las densidades iónicas.

4.1. Sistema de ecuaciones

Dado todos los problemas pendientes se elige la situación más simple, esto es: latitud media, horas cercanas al mediodía de días geomagnéticamente quietos. En esta situación rige el equilibrio fotoquímico para las cuatro especies ionizadas de región E. Es decir, para cada especie i (N_2^+ , O^+ , NO^+ y O_2^+) vale la ec. (2). Para calcular los términos de producción y de pérdida de iones se tienen en cuenta las reacciones químicas posibles en región E (ver tabla 1) y la fotoionización.

Considerando los valores de los coeficientes de reacción y las densidades de ambos reactivos las reacciones 4,5,9,10, 14, resultan despreciables. Con las reacciones restantes se evalúan los órdenes de magnitud de los constituyentes minoritarios O^+ y N_2^+ y con estos resultados se estiman las velocidades correspondientes a las reacciones 3,6,11,12 encontrándose que éstas también despreciables y así las reacciones eficientes son las numeradas: 1,2,7,8,13,15,16 a las que renumeraremos 1,2,3...7.

El esquema de formación de región E resultante es el representado en la fig. 12. De acuerdo con este esquema, las ecuaciones de continuidad de las especies ionizadas son:

$$n(O^+) = \frac{q(O^+)}{k_1 n(O_2) + k_2 n(N_2)} \quad (10)$$

$$n(N_2^+) = \frac{q(N_2^+)}{k_3 n(O) + k_4 n(O_2)} \quad (11)$$

$$n(O_2^+) = \frac{q(O_2^+) + k_4 n(O_2) n(N_2^+) + k_3 n(O_2) n(O^+)}{k_6 n_e + k_5 n(NO)} \quad (12)$$

$$n(NO^+) = \frac{k_5 n(NO) n(O_2^+) + k_2 n(N_2) n(O^+) + k_3 n(O) n(N_2^+)}{k_7 n_e} \quad (13)$$

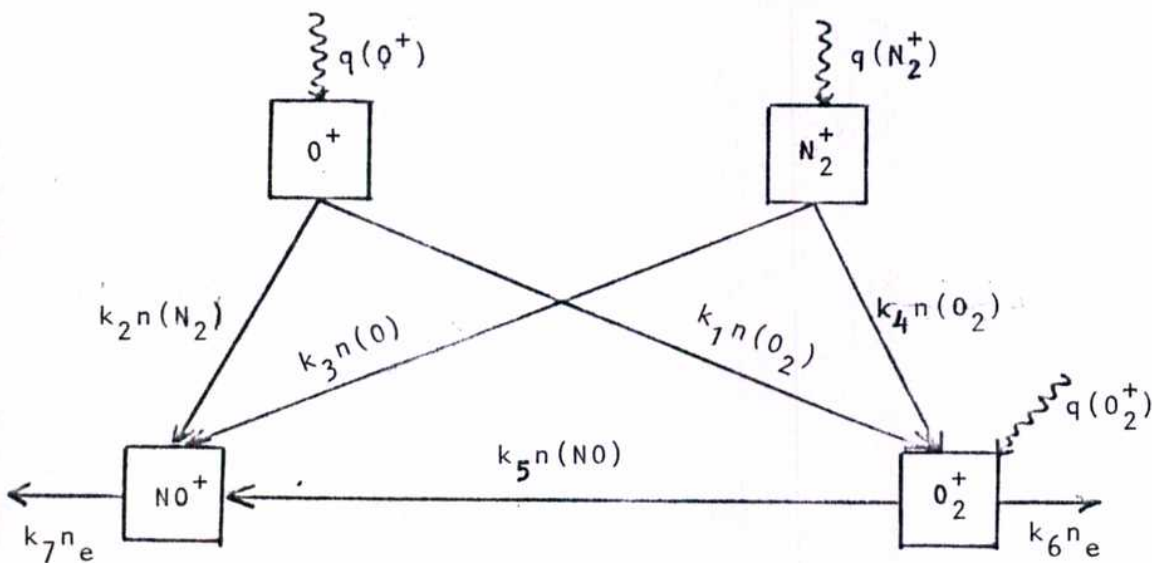


Figura 12: Esquema de formación de la región E.

Nótese que, mientras las concentraciones de N_2^+ y O^+ pueden ser evaluadas si se conocen las densidades de los constituyentes atmosféricos predominantes, el flujo solar incidente y las temperaturas, para calcular las densidades de NO^+ y O_2^+ es necesario conocer además la densidad electrónica y la del constituyente atmosférico minoritario NO.

La condición de cuasi-neutralidad eléctrica, $\sum_i n_i = n_e$, es en general utilizada en los modelos para verificar los resultados obtenidos (ver por ej. Timothy y otros, 1972; Chakrabarty y otros, 1978). En el presente modelo se la utiliza "a priori" para reducir el número de variables y para desacoplar las ecs. (12) y (13). Las densidades de NO^+ , O_2^+ y NO resultan:

$$n(NO^+) = \left(\frac{[q(O_2^+) + A + B] k_7 n_e + [C + D - k_7 n_e^2] k_6 n_e}{[k_7 n_e^2 - q(O_2^+) + A + B + C + D]} \right) \frac{n(O_2^+)}{k_7 n_e} + C + D \quad (14)$$

$$n(O_2^+) = \frac{q(O_2^+) + A + B}{k_6 n_e + \left\{ \frac{[q(O_2^+) + A + B] k_7 n_e + [C + D - k_7 n_e^2] k_6 n_e}{k_7 n_e^2 - [q(O_2^+) + A + B + C + D]} \right\}} \quad (15)$$

y

$$n(NO) = \left\{ \frac{[q(O_2^+) + A + B] k_7 n_e - [k_7 n_e^2 - (C + D)] k_6 n_e}{k_7 n_e^2 - [q(O_2^+) + A + B + C + D]} \right\} k_5^{-1} \quad (16)$$

donde A, B, C y D son funciones de las concentraciones relativas de los constituyentes atmosféricos predominantes:

$$A = \frac{q(O^+)}{(k_2/k_1)^{\alpha+1}}$$

$$B = \frac{q(N_2^+)}{(k_3/k_4)^{\beta+1}}$$

$$C = \frac{k_3}{k_4} \alpha \beta B$$

$$D = \frac{k_2}{k_1} \alpha A \quad -$$

si α y β se definen como

$$\alpha = n(N_2)/n(O_2), \quad \beta = n(O)/n(N_2)$$

La ec. (16) es una relación biunívoca entre n_e y $n(NO)$. Con el valor experimental o prescripto por algún modelo de una de estas densidades se puede calcular la otra y por medio de las ecs. (14) y (15) evaluar las densidades de los constituyentes ionosféricos predominantes.

4.2. Análisis de los parámetros a utilizar

Para calcular las densidades iónicas y la densidad de monóxido de nitrógeno es necesario conocer:

- a) el perfil de temperatura electrónica.
- b) el perfil de densidad electrónica.
- c) el flujo solar incidente.
- d) las secciones eficaces de absorción y eficiencias de ionización.

- e) los perfiles de densidad de las especies atmosféricas predominantes.
- f) el perfil de temperatura del gas neutro.
- g) el perfil de temperatura del gas de iones.
- h) las expresiones de los coeficientes de reacción.
- i) el estado de excitación de las especies atmosféricas y ionosféricas.

En los parágrafos que siguen se analizarán cada uno de estos parámetros y se justificarán las distintas elecciones.

a) Perfil de temperatura electrónica

En la región E, como ya se vió en el capítulo anterior, la temperatura electrónica es superior a la del gas neutro a cualquier latitud y fuertemente variable con las condiciones ionosféricas como actividades solar y geomagnética, hora del día, vórtices de corrientes, etc. (ver por ej. Brace y otros, 1965, Oyama e Hirao, 1979). Duhau y Azpiazu, 1985, encontraron que el comportamiento al azar de la temperatura electrónica con la actividad solar no era tal cuando se seleccionaban días geomagnéticamente quietos y se vio que las mediciones son predecibles por modelos empíricos en esta situación. Este concepto ha sido generalizado por las autoras a todos los parámetros para hallar mediciones realizadas en condiciones ionosféricas equivalentes. Teniendo en cuenta el criterio de baja actividad

magnética Duhau y Azpiazu, 1985 elaboraron un modelo empírico de T_e/T_n para horas cercanas al mediodía que puede ser utilizado al aplicar el modelo de densidades iónicas a distintas actividades solares incluso interpolando a actividades solares no medidas.

b) Perfil de densidad electrónica

La densidad electrónica y su variación con la altura se mide sistemáticamente en varias estaciones ionosféricas a distintas latitudes con ionosondadores. Además los radares de dispersión incoherente proveen no sólo de perfiles de densidad electrónica sino también su estructura espacial (o gradiente transversal).

Por consiguiente siempre que se trate de un día geomagnéticamente quieto al igual que con la temperatura electrónica, es posible hallar un perfil de densidad electrónica medido en condiciones ionosféricas equivalentes las que se desea predecir las densidades iónicas, esto es la misma latitud, hora del día, época del año y actividad solar.

c) Flujo solar incidente

El grupo del Air Force Cambridge Research Laboratories dirigido por H.E. Heinteregger ha medido, desde fines de la década del 60, el flujo solar incidente a distintas actividades solares en el rango de UVL y rayos X. Por otra parte Schmidtke, 1978, 1979 ha estudiado la variabilidad del flujo

de radiación solar en UVL con la actividad solar y específicamente con el índice $F_{10.7}$ de manera que, aún en el caso de no haber una medición del flujo solar para una determinada actividad solar (caracterizada por el índice $F_{10.7}$) se puede recurrir a las interpolaciones propuestas por este autor en el rango UVL y a las propuestas por Kreplin, 1970 para rayos X.

d) Secciones eficaces de absorción y eficiencias de ionización

Se han medido en laboratorio las secciones eficaces de absorción y eficiencias de ionización de los constituyentes atmosféricos y en el rango de UVL y rayos X. Estos resultados que han sido publicados en el trabajo de Huffmam, 1969 y que son los utilizados habitualmente en modelos de formación de la ionosfera, son también utilizados en el presente modelo.

e) Concentraciones de los constituyentes de la atmósfera

La gran cantidad de mediciones de densidad de los constituyentes atmosféricos mayoritarios ha permitido la elaboración de modelos semi empíricos de los mismos que contemplan las variaciones con la actividad solar, el ángulo cenital solar, la latitud, época del año y hora del día. Los más usados son los modelos CIRA (1972) y Jacchia (1971,1977). Para alturas superiores a aproximadamente los 150 km los resultados son iguales pero difieren a alturas de región E. Esta diferencia se basa principalmente en que en el modelo CIRA (1972) el límite entre

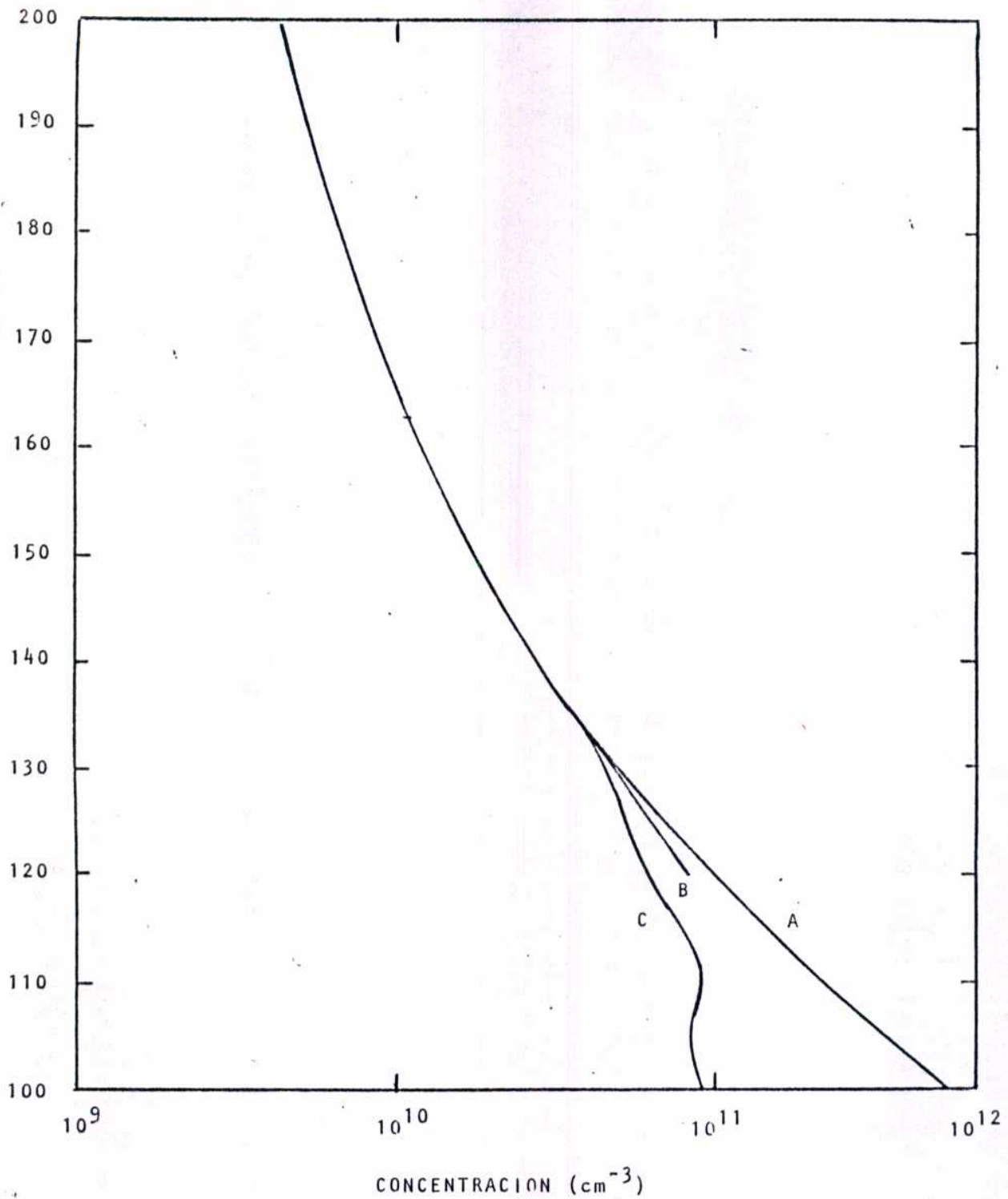


Figura 13: Perfiles de concentración de oxígeno atómico para actividad solar moderada de acuerdo con los modelos de atmósfera neutra Jacchia 1977 y MSIS (curvas A y B respectivamente) y la medición de Sharp 1980 (curva C).

el régimen de mezcla y el difusivo está a los 120 km y en cambio en el Jacchia (71 ó 77) éste está a los 100 km de altura.

Recientemente (ver por ej. Sharp, 1980; se ha encontrado que las mediciones de concentración de oxígeno atómico están afectadas por la onda de choque que produce el cohete y estos autores han mejorado el diseño de los espectrómetros de masa para corregir este problema. En la fig. 13 se han graficado los perfiles de $n(O)$ medido por Sharp, 1980 y los que proveen MSIS y Jacchia 77 para la misma actividad solar y hora del día.

f) Temperatura del gas neutro

En la región E hay equilibrio térmico entre las diversas especies neutras y se mide por lo tanto una sola, en particular T_{N_2} , para determinar T_n .

Con respecto a esto, Kayser y otros, 1979 encontraron un buen acuerdo entre los perfiles de T_n y los que resultan de calcular las temperaturas a partir de la altura de escala de los perfiles de $n(N_2)$, suponiendo que la atmósfera se encuentra en equilibrio hidrostático, siendo ambos perfiles medidos simultáneamente e "in situ". Al igual que con las densidades de las especies neutras, se han elaborado modelos semiempíricos (por ej. CIRA 72, Jacchia 71 y 77, MSIS) que tienen en cuenta no sólo la variación con la actividad solar (ver fig. 14 a) sino también con

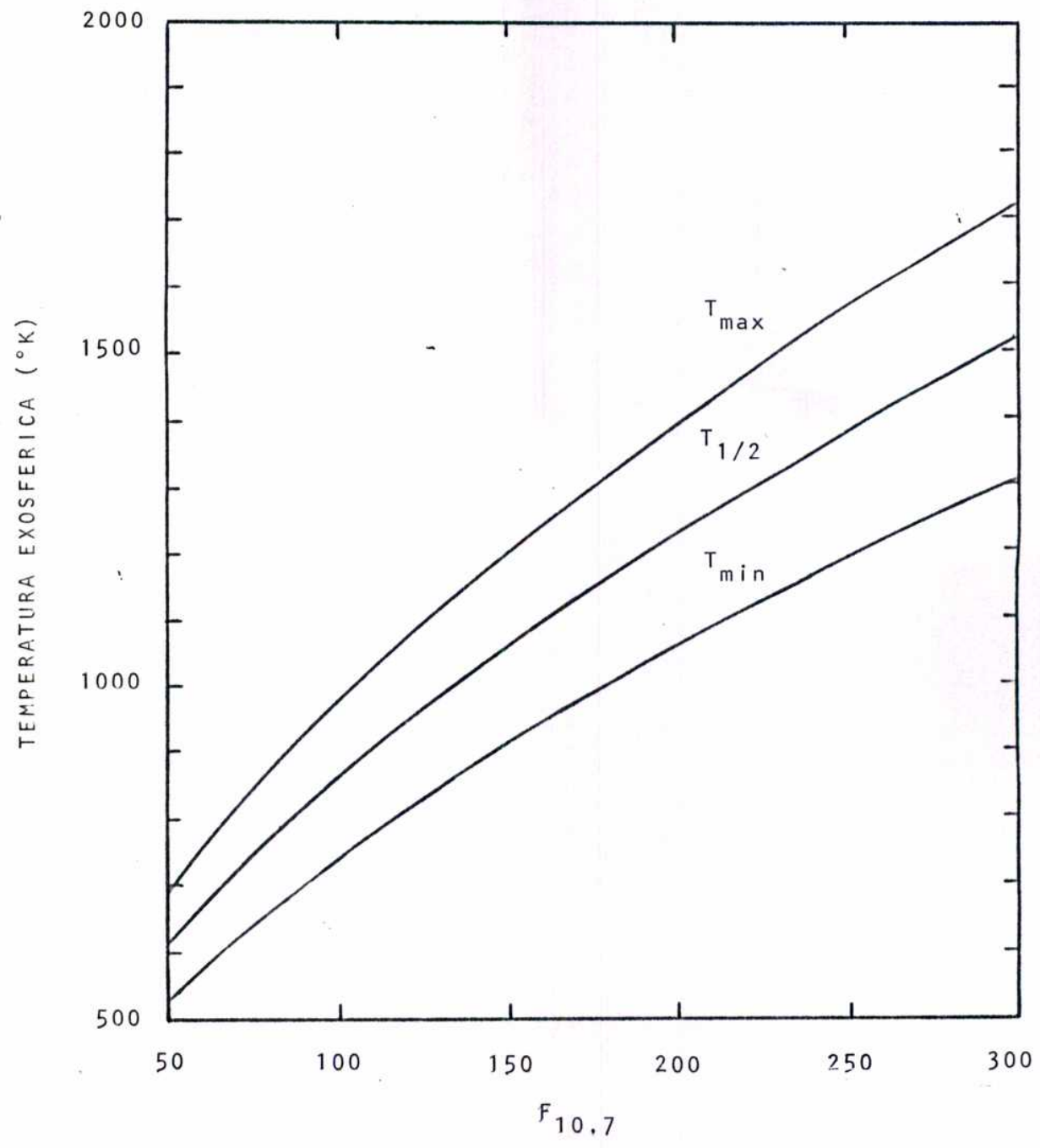


Figura 14a: Variación de las temperaturas exosféricas media, máxima y mínima con la actividad solar en condiciones geomagnéticamente quietas.

la hora del día, época del año y actividad magnética. En la fig. 14b se ha graficado como ejemplo la variación de la temperatura neutra en región E con el ángulo cenital solar de acuerdo con el modelo de Jacchia, 1977.

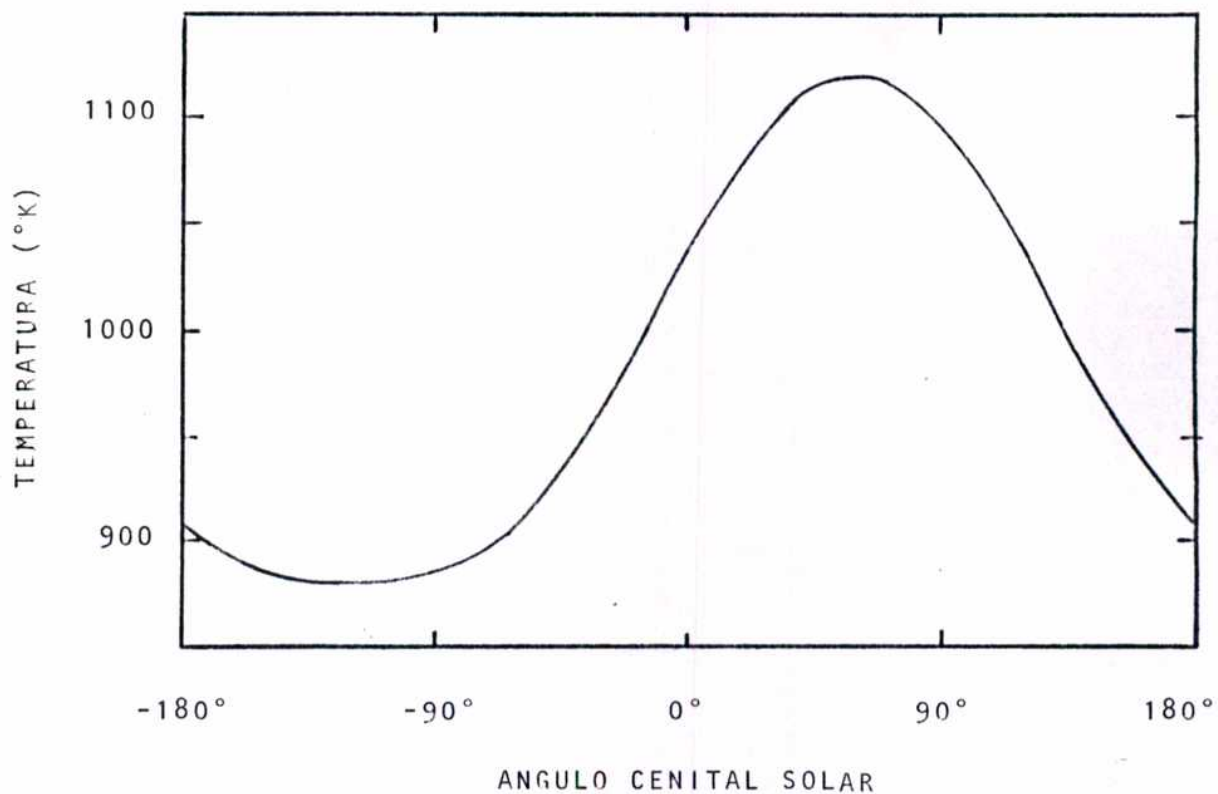


Figura 14b: Variación de la temperatura exosférica en el ecuador (equinoccio) con el ángulo cenital solar para la temperatura media $T_{1/2} = 1000^{\circ}\text{K}$ (Jacchia, 1977).

Un análisis de la incerteza en T_n fué realizado por Alcaydé y otros, 1974 quienes compararon los resultados obtenidos de los distintos modelos: entre Jacchia, 1977 (J77) y MSIS ("Mass Spectrometer and Incoherent Scatter", Hedin y otros, 1972) es menor al 15% en todos los casos calculados, y entre los resultados obtenidos con el radar de dispersión incoherente y de J71-la diferencia oscila entre $\sim 7\%$ a los 100 km y 14% a los 130 km.

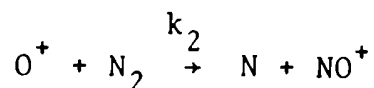
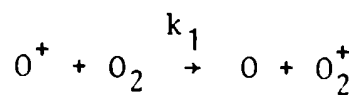
g) Temperatura iónica

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, a alturas de región tanto los resultados empíricos como los teóricos indican que $T_i = T_n$. Esta es la hipótesis habitual que también se usa en el presente modelo.

h) Coeficientes de reacción

La velocidad de una reacción depende no sólo de la temperatura a la que se encuentra cada una de las especies reactantes sino también del estado de excitación de las mismas. Dado que al presente se desconoce el estado de excitación de las especies ionosféricas o atmosféricas en la región E existe cierta confusión sobre las expresiones de los coeficientes que deben ser utilizados. En este trabajo se analizan las distintas mediciones realizadas de los 7 coeficientes utilizados en el presente modelo y el error que podrían introducir en los resultados.

Reacciones de O^+ con O_2 y N_2



Los resultados obtenidos por los diversos autores son:

$$k_1 = 2 \times 10^{-11} \left(\frac{300}{T_i}\right)^{1/2} \quad (17.1)$$

Ferguson, 1967, Dunkin, 1968

$$k_1 = 3.3 \times 10^{-11} \exp(-1.69 \times 10^{-3} T_n) \quad (17.2)$$

Ferguson y otros, 1969

$$k_1 = 2.82 \times 10^{-11} - 7.74 \times 10^{-12} \left(\frac{T_{efec}}{300}\right) + 1.073 \times 10^{-12} \left(\frac{T_{efec}}{300}\right)^2 \\ - 5.17 \times 10^{-14} \left(\frac{T_{efec}}{300}\right)^3 + 9.65 \times 10^{-16} \left(\frac{T_{efec}}{300}\right)^4 \quad (17.3)$$

para $300 \leq T_{efec} \leq 6000$ °K

St. Maurice y Torr, 1978

y

$$k_2 = 2 \times 10^{-11} \left(\frac{300}{T_i}\right)^{1/2} \quad (18.1)$$

Dunkin, 1968

$$k_2 = 3 \times 10^{-12} \exp(-3.11 \times 10^{-3} T_n) \quad (18.2)$$

Ferguson y otros, 1969

$$k_2 = 1.533 \times 10^{-12} - 5.92 \times 10^{-13} \left(\frac{T_{efec}}{300}\right) + 8.6 \times 10^{-14} \left(\frac{T_{efec}}{300}\right)^2$$

para: $300 \leq T_{efec} \leq 1700 \text{ } ^\circ\text{K} \quad (18.3)$

St Maurice y Torr, 1978

si T_{efec} se define a partir de:

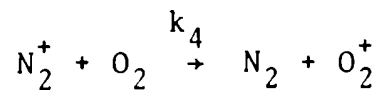
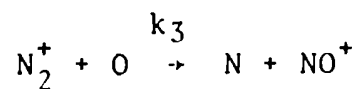
$$\frac{3}{2} k T_{efec} = \frac{m_n}{m_i + m_n} \left(\frac{m_i u^2}{2} + \frac{3k T_i}{2} - \frac{3k T_n}{2} \right) + \frac{3k T_n}{2}$$

donde u es la velocidad de deriva relativa entre las dos especies, la neutra y la ionizada, k es la constante de Boltzmann y $m_{n,i}$ las masas del reactivo neutro y del ionizado respectivamente.

A alturas de región E, donde $T_i = T_n$ es fácil mostrar que los valores obtenidos para k_1 y k_2 de las distintas expresiones no difieren en más de un 10% entre sí y por lo tanto son equivalentes en esta zona.

Estos valores de k_2 han sido obtenidos habiendo permitido que el N_2 estuviera en el nivel fundamental. En el caso de que N_2 estuviera vibracionalmente excitado el coeficiente k_2 variaría con la temperatura vibracional (ver por ej. Schmeltekopf, 1967). Aún cuando k_2 aumentara en un orden de magnitud afectaría el resultado de la concentración de O^+ pero no las concentraciones iónicas relativas o la del monóxido de nitrógeno.

Reacciones de N_2^+ con O y O_2



con

$$k_3 = 2.5 \times 10^{-10} \quad (19.1)$$

Ferguson, 1967

$$k_3 = 1.4 \times 10^{-10} \quad (19.2)$$

Fehsenfeld y otros, 1970

$$k_3 = 1.4 \times 10^{-10} \left(\frac{300}{T_i} \right) \quad (19.3)$$

Mc Farland y otros, 1974

y

$$k_4 = 1 \times 10^{-10} \quad (20.1)$$

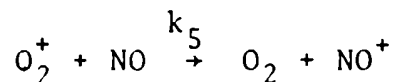
Fite, 1969

$$k_4 = 0.6 \times 10^{-10} \left(\frac{300}{T_n} \right)^{0.6} \quad (20.2)$$

Johnsen y otros, 1970

A pesar de que las discrepancias entre los distintos valores obtenidos de las expresiones de k_3 y k_4 son del orden del 50%, se ha evaluado para distintas actividades solares que el efecto de esta diferencia en las concentraciones iónicas relativas y del monóxido de nitrógeno no supera el 5% y por lo tanto a los efectos del modelo todas las expresiones son equivalentes.

Intercambio de carga de O_2^+ con NO



$$k_5 = 6.3 \times 10^{-10} \quad (21.1)$$

Fehsenfeld, 1970

$$k_5 = 8 \times 10^{-10} \quad (21.2)$$

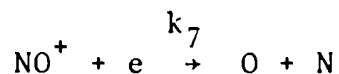
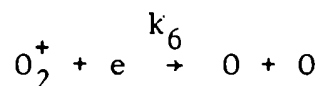
O'Malley, 1970

$$k_5 = 7.2 \times 10^{-10} \quad (21.3)$$

Johnsen y otros, 1970

Las diferencias entre las diversas mediciones se encuentran dentro del error, de cada una de ellas. La concentración iónica relativa no es sensible a estas diferencias, en cambio el valor de $n(\text{NO})$ varía en un 25% cuando se adoptan los valores extremos de k_5 .

Recombinación de O_2^+ y NO^+



Las mediciones de k_6 realizadas "in situ" a alturas superiores a los 135 km coinciden con las obtenidas en laboratorio para distintas condiciones de excitación, de este resultado se concluye que o bien k_6 es independiente de la temperatura vibracional de O_2^+ o que este ión no se encuentra vibracionalmente excitado. Los resultados obtenidos son:

$$k_6 = 2.2 \times 10^{-7} \left(\frac{300}{T_e} \right) \quad (22.1)$$

Biondi, 1969

$$k_6 = 1.6 \times 10^{-7} \left(\frac{300}{T_e}\right)^{0.85} \quad (22.2)$$

Torr y otros, 1976

y

$$k_7 = 4 \times 10^{-7} \left(\frac{300}{T_e}\right) \quad (23.1)$$

Biondi, 1969

$$k_7 = (4.3 \pm 1) \times 10^{-7} \left(\frac{300}{T_e}\right)^{0.86 \pm 0.16} \quad (23.2)$$

Walls y Dunn, 1974

$$k_7 = (4.3 \pm 0.3) \times 10^{-7} \left(\frac{300}{T_e}\right)^{0.37 \pm 0.03} \quad (23.3)$$

Huang y otros, 1975

$$k_7 = (4.2 \pm 1) \times 10^{-7} \left(\frac{300}{T_e}\right)^{0.85 \pm 0.15} \quad (23.4)$$

Torr, 1979

$$k_7 = 2.3 \times 10^{-7} \left(\frac{300}{T_e}\right)^{0.5 \pm 15\%} \quad (23.5)$$

Mull y Mc Gowan, 1979

La expresión obtenida por Walls y Dunn, 1974 corresponde a la medición realizada en laboratorio y en la que se esperó que el NO^+ relajara a su estado fundamental; en cambio el NO^+ se encontraba vibracionalmente excitado ($0 \leq v \leq 3$) en la medición realizada también en laboratorio por Huang y otros, 1975. Nótese que k_7 es muy sensible al estado de excitación del NO^+ cuando $T_e \neq 300^\circ\text{K}$ y que la medición realizada por Torr, 1979, "in situ", en un satélite ($h \geq 135$ km) coincide con la realizada por Walls y Dunn, 1974. Por lo tanto se puede concluir que en la región F_1 NO^+ se encuentra en su estado fundamental. Sin embargo no hay mediciones "in situ" para alturas inferiores por lo tanto no se conoce el estado de excitación del NO^+ en la región E.

i. Estado de excitación de las especies ionosféricas

Como no hay mediciones de la población de especies en niveles excitados pero hay indicios de que algunos componentes ionosféricos y atmosféricos, en región E, se encontrarían excitados (ver por ej. Walker, 1969; Vlasov, 1972, Duhau y Azpiazu, 1981) este parámetro es incierto. En el capítulo siguiente se verá qué criterio se ha adoptado al aplicar el modelo a distintas condiciones.

-

C A P I T U L O 5

Cálculo de las densidades iónicas a distintas condiciones
ionosféricas

En este capítulo se muestran y discuten los resultados de la aplicación del modelo de región E propuesto al estudio de la formación de esa región de la ionósfera para tres actividades solares distintas: baja, moderada y alta, a latitud media, y a baja actividad solar, a latitud ecuatorial.

Estos resultados son comparados con las mediciones de densidades realizadas en condiciones ionosféricas equivalentes.

Es necesario en todas las aplicaciones calcular la velocidad de fotoionización y las velocidades de formación y pérdida por reacciones químicas con el gas ambiente y los electrones. Para evaluar la velocidad de fotoionización (ver ecs. (4) y (5)) el intervalo de integración se divide en 23 bandas de longitud de onda, de acuerdo con Richmond, 1972 quien también provee las secciones eficaces de absorción y eficiencias de ionización promedio en cada una de ellas utilizando los datos de Huffman, 1969.

En todas las aplicaciones la temperatura atmosférica y las concentraciones de los constituyentes neutros predominantes corresponden al modelo de Jacchia, 1977 (J 77).

Finalmente, para determinar los perfiles de temperatura electrónica se utiliza el modelo empírico de Duhau y Azpiazu, 1985, que provee la variación de T_e/T_n con la altura para días geomagnéticamente quietos y en horas cercanas al mediodía en función de $F_{10.7}$.

5.1. Cálculo de las densidades iónicas y del monóxido de nitrógeno a latitud media

5.1.1. Baja actividad solar

El modelo de formación de región E propuesto se aplica a la predicción del perfil de densidades iónicas relativas y de concentración de monóxido de nitrógeno a baja actividad solar y latitud media al mediodía (Azpiazu y Duhau, 1982 a y b).

Datos utilizados:

Se realizó el cálculo de las densidades iónicas relativas para un día geomagnéticamente quieto ($A_p = 5$ y $K_p = 1$) con $F_{10.7} = 76$ en el cual existen mediciones simultáneas de la temperatura y la concentración electrónicas, esta última por medio de una sonda de Langmuir, realizadas por Brace y otros, 1969 (vuelo 18.01 del 19 de marzo de 1965) quienes verificaron el perfil de n_e medido "in situ" con el obtenido mediante un ionosondador desde tierra (ver fig. 15).

De acuerdo con las condiciones en las que se realizaron estas mediciones se seleccionaron los parámetros del modelo como sigue:

- a) T_e del modelo de T_e/T_n para $F_{10.7} = 76$.
- b) El espectro de radiación solar incidente medido por Manson, 1976 durante 1974 ($\langle F_{10.7} \rangle = 74$). Este espectro resulta adecuado porque el flujo solar incidente no depende de la actividad magnética.

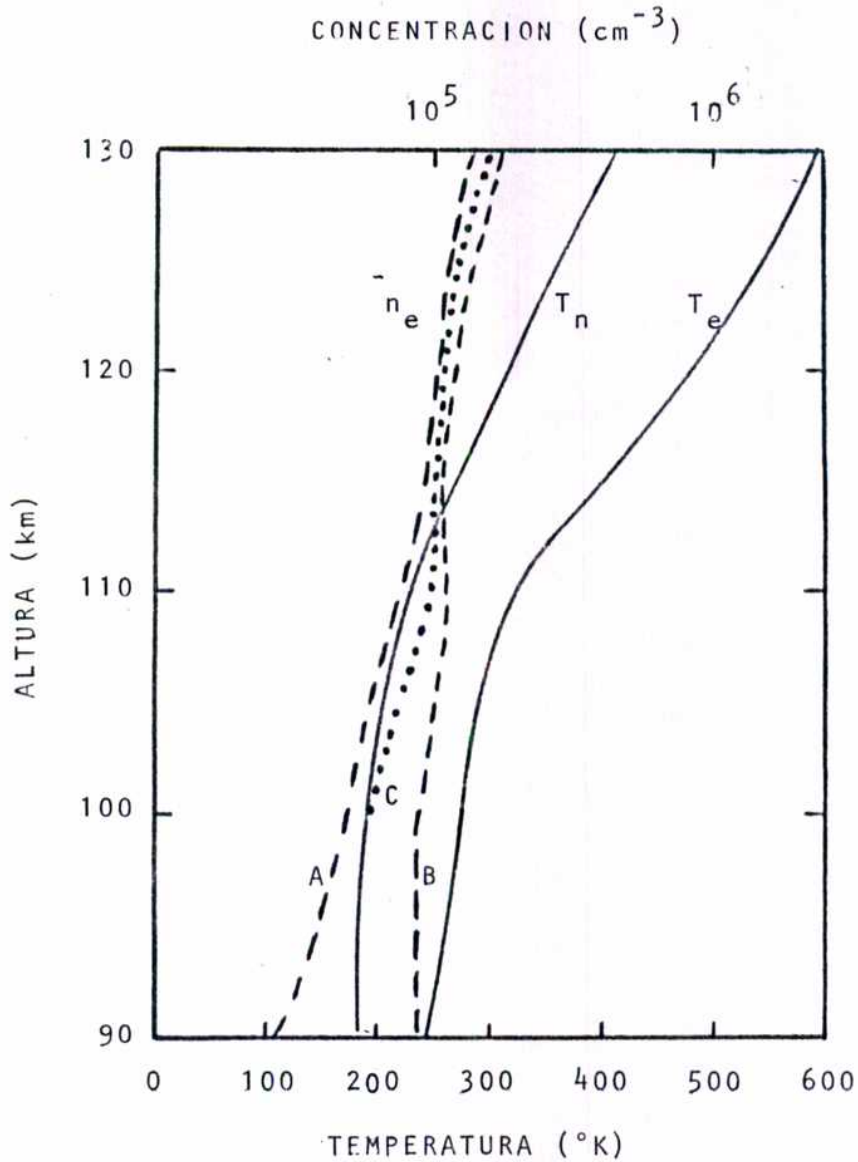


Figura 15: Perfiles de concentración electrónica medidos por Brace y otros, 1969, con sonda de Langmuir "in situ" (curva A) y con ionosondador (B) junto con el perfil adoptado (C) y perfiles de temperaturas electrónica y neutra utilizados ($F_{10.7} = 76$).

Tabla 8

Parámetros y datos utilizados a actividad solar baja, latitud media.

Parámetro	Referencia	F _{10.7}	A _p	K _p	Latitud	Hora local
Densidad electrónica	Vuelo 18.01 Brace y otros, 1969	76	5	1 ⁺	Media (Wallops Island)	13.09
Temperatura electrónica	Modelo de Duhau y Azpiazu, 1985	76				
Temperatura neutra y concen- tración de O ₂ , N ₂ y O	Modelo J77	76		1	Media	Mediodía
Flujo solar incidente	Manson, 1976	74				

- c) Las densidades de las especies neutras predominantes así como la temperatura del gas neutro calculados del modelo J77 para una temperatura exosférica $T_{\infty} = 700$ °K.
- d) Los coeficientes de reacción correspondientes al caso en que los reaccionantes se encuentran en su nivel fundamental. Esta suposición es adecuada por tratarse de una actividad solar baja, situación en la que es de esperar que el porcentaje de constituyentes atmosféricos y/o ionosféricos excitados sea mínimo.

En la tabla 8 se resumen los datos utilizados y las condiciones a las que corresponden.

Resultados y discusión:

En las figuras 16 a y b se han graficado las concentraciones iónicas relativas medidas (16a) y las que resultan de los distintos modelos teóricos propuestos para baja actividad solar (16b). En ambas figuras se ha superpuesto también el resultado del presente modelo (curvas en línea llena). La medición (A) en la figura 16a es la realizada por Johnson (1966) el 15 de febrero de 1963 ($K_p = 2$; $A_p = 8$ y $F_{10.7} = 76$). En la figura también se ha graficado el perfil medio provisto por Mitra y Banerjee, 1972 (curva B). Nótese que el acuerdo del modelo con las mediciones es notorio y que la medición realizada a actividad magnética baja casi coincide con el comportamiento promedio para toda actividad geomagnética. Se ha

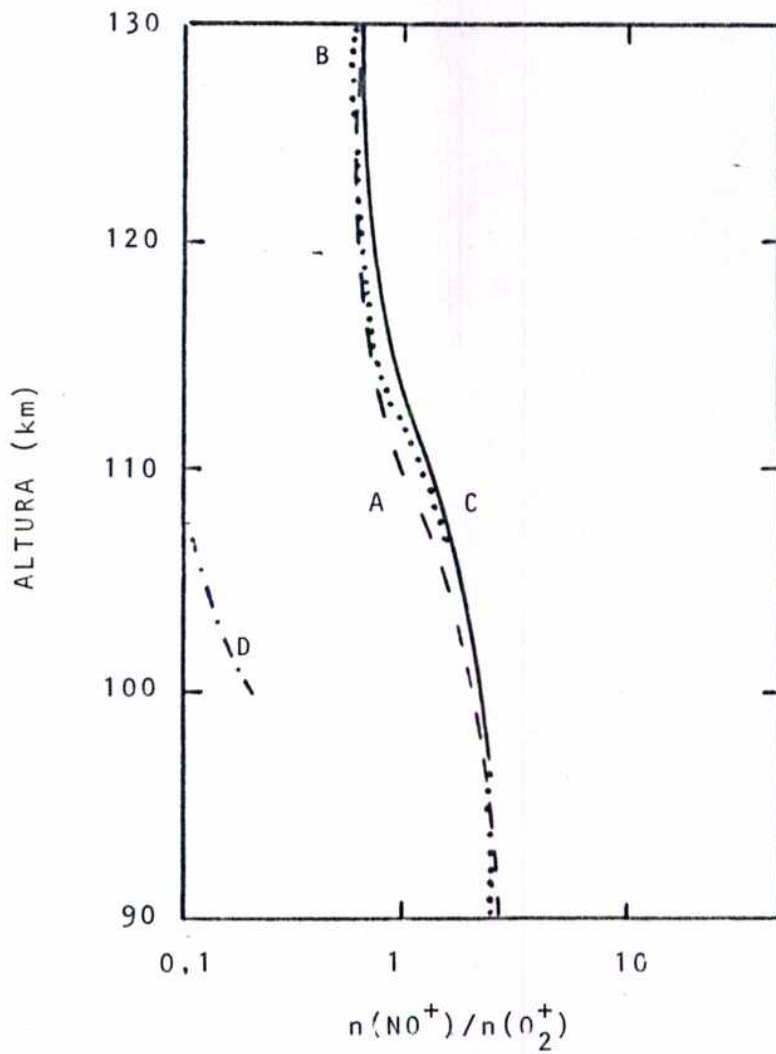


Figura 16a: Perfiles de concentración iónica relativa a baja actividad solar: medido por Johnson, 1966, (A), promedio suministrado por Mitra y Banerjee, 1972, (B) y calculado con el presente modelo (C) junto con el calculado suponiendo $T_e = T_n$ (D).

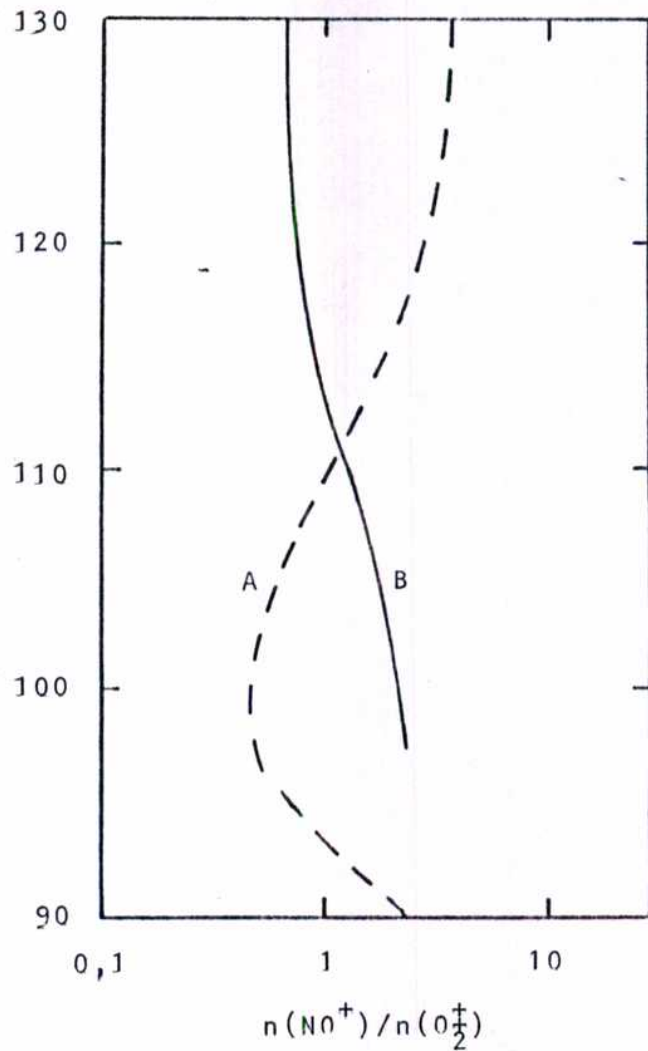


Figura 16b: Perfiles de concentración iónica relativa a baja actividad solar de acuerdo con el modelo de Chakrabarty y otros, 1978 (A) y el resultado del presente modelo (B).

superpuesto el resultado que se obtiene con el presente mo
delo, pero suponiendo $T_e = T_n$ (curva D), obsérvese que no
reproduce ni aún cualitativamente la medición.

Como se puede observar en la fig. 16 b el resultado
del modelo de Chakrabarty y otros, 1978 (curva A) no coincide
con el obtenido utilizando el presente modelo y por lo tanto
tampoco reproduce el comportamiento de $n(\text{NO}^+)/n(\text{O}_2^+)$ medido.
Esta discrepancia se debe a que en ese modelo se ha supuesto
que el gas de electrones se encuentra en equilibrio térmico
con el gas neutro en región E y se han utilizado perfiles de
concentración de NO que difieren sustancialmente de los medi-
dos. En cambio en el presente modelo se ha predicho la concen-
tración de NO utilizando el perfil de n_e medido.

En la figura 17 a se resumen los resultados de $N(\text{NO})$
obtenidos en las mediciones de Barth (1966) ($F_{10.7} = 80$) y
Trinks y otros (1978) ($F_{10.7} = 89$) (curvas A y B respectivamen-
te) junto con el resultado del presente trabajo. Se puede ob-
servar que, en la región en que ambas mediciones dan resulta-
dos similares ($100 \text{ km} \leq h \leq 119 \text{ km}$) éstas coinciden con el re-
sultado teórico y que para alturas superiores el modelo predi-
ce un perfil de $n(\text{NO})$ que aparentemente seguiría la distribu-
ción de la medición de Barth que corresponde a menor actividad
solar. Es de notar, además, la gran variabilidad de $n(\text{NO})$ aún
para baja actividad solar. En la fig. 17 b se grafican los re-
sultados obtenidos por Kondo y Ogawa, 1977 quienes elaboraron

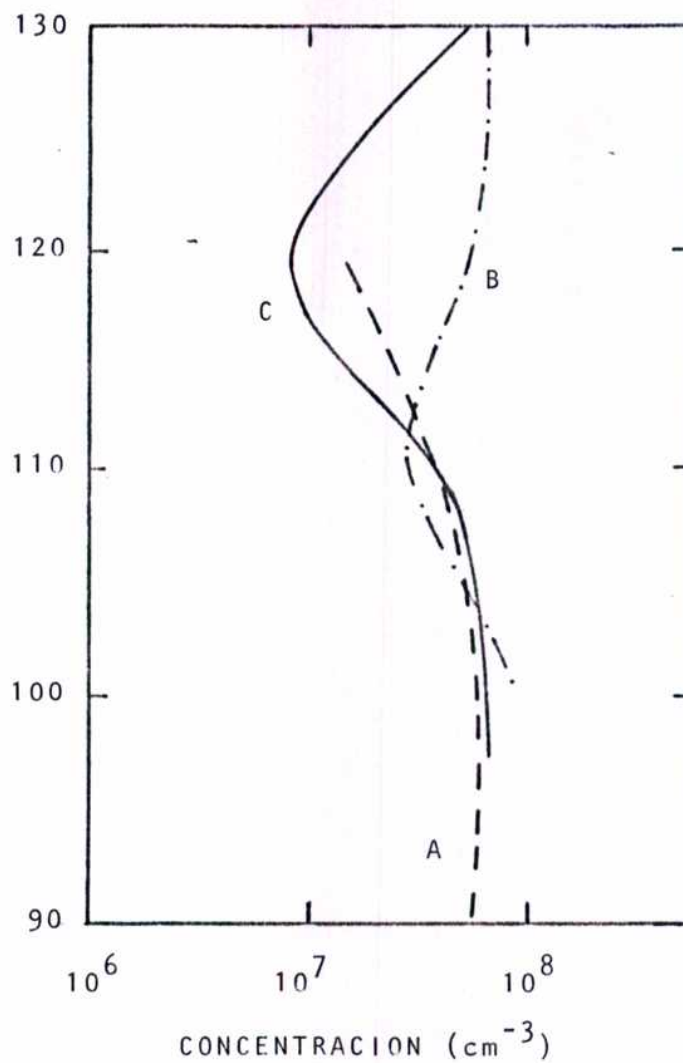


Figura 17a: Perfiles de concentración de monóxido de nitrógeno a baja actividad solar medidos por Barth, 1966, ($F_{10.7} = 80$) (curva A) y Trinks y otros, 1978 ($F_{10.7} = 89$) (B) junto con el resultado del presente modelo (C).

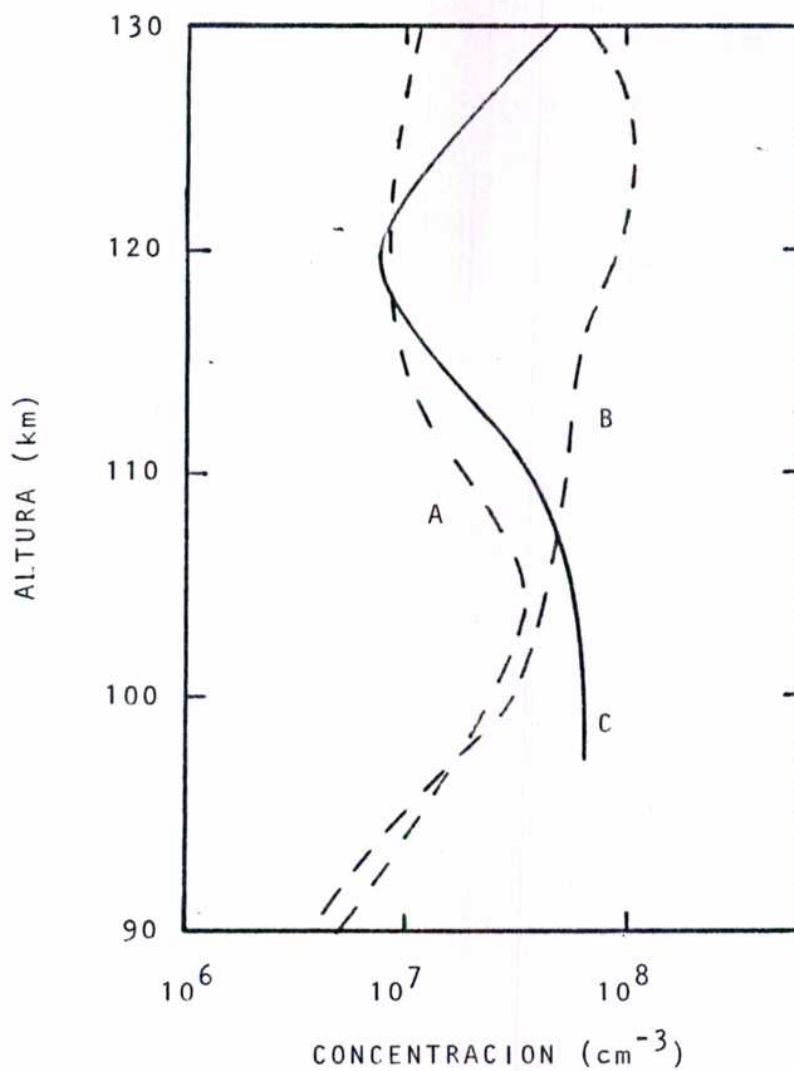


Figura 17b: Perfiles de concentración de monóxido de nitrógeno a baja actividad solar calculados utilizando los modelos de Kondo y Ogawa, 1977 (A), de Chakrabarty y otros, 1978 (B) y el presente modelo (C).

un modelo de formación de los "nitrógenos minoritarios" ("odd nitrogens") (curva A) junto con el perfil propuesto por Chakrabarty y otros, 1978, y el resultado del presente modelo (curva B y C respectivamente). Los resultados de Kondo y Ogawa, 1977 y de Chakrabarty y otros, 1978 coinciden en la región inferior mientras que en la región superiores las diferencias entre ambos son de casi un orden de magnitud.

5.1.2. Actividad solar moderada

El modelo propuesto se utilizó para calcular las densidades iónicas e inferir el estado de excitación del NO^+ a actividad solar moderada (Duhau y Azpiazu, 1986).

Datos utilizados:

Zbinden y otros, 1975 han medido las concentraciones iónicas, NO^+ , O_2^+ y O^+ así como la concentración electrónica a actividad solar moderada (14/12/71, $F_{10.7} = 122$) en un día geomagnéticamente quieto ($A_p = 7$, $K_p = 1^+$) a latitud media (Cerdeña, $39^\circ 36' \text{ N}$, $9^\circ 26' \text{ E}$) cerca del mediodía (12.11 hora local). Por consiguiente se aplicó el modelo de formación de región E para calcular la densidad iónica relativa correspondiente a estas condiciones, como sigue:

a) El perfil de densidad electrónica correspondiente a la medi

Tabla 9

Parámetros y datos utilizados a actividad solar moderada, latitud media.

Parámetro	Referencia	F _{10.7}	A _p	K _p	Latitud	Hora local
Concentración electrónica	Dickinson y otros, 1972	120	6	1 ⁺	Media (Cerdeña)	13.06
Temperatura electrónica	Zbinden y otros	122	7	1 ⁺	Media (Cerdeña)	12.11
Temperatura neutra y concentración de N ₂ y O ₂	Modelo de Duhau y Azpiazu, 1985	122	,			
Concentración de O	Modelo J 77	122		1	Media	Mediodía
Flujo solar incidente	Heroux y otros, 1974 Interpolación de Kreplin, 1970	122	15	2	Media (White Sands)	18.21
		122				

ción realizada por Dickinson y otros, 1972, sobre Cerdeña en la región E inferior, $90 \text{ km} < h \leq 100 \text{ km}$ y en la región superior ($110 \text{ km} \leq h \leq 130 \text{ km}$) la medición realizada simultáneamente por Zbinden y otros, 1975 con la sonda de doble plasma .

- b) El perfil de temperatura electrónica del modelo de T_e/T_n para $F_{10.7} = 120$.
- c) El flujo solar incidente medido para $F_{10.7} = 122$ por Heroux y otros, 1974 en el rango UVL y las leyes de interpolación de Kreplin, 1977 para el rango de rayos X.
- d) La temperatura exosférica correspondiente $T_\infty = 1000^\circ\text{K}$ para evaluar, los perfiles de densidad de N_2 y O_2 y de T_n (J77). En cuanto a la concentración del oxígeno atómico se utilizó la medición de Sharp (1980) ($F_{10.7} = 120$) que tiene en cuenta el efecto de la onda de choque producida delante del cohete en la densidad.

En la tabla 9 se resumen las condiciones correspondientes a cada uno de los datos utilizados.

Finalmente, es de esperar que el estado de excitación de los constituyentes atmosféricos y ionosféricos aumente con $F_{10.7}$ y el coeficiente de recombinación de NO^+ con los electrones (k_7), como ya se vio en el capítulo anterior, es sensible al mismo. Obsérvese que de la expresión (16), si se conoce k_7 puede calcularse $n(NO)$ y viceversa, de tal forma que para

superar este escollo se adoptó la siguiente metodología: Para alturas inferiores a los 120 km se utilizó la medición de $n(\text{NO})$ de Meira, 1971 ($F_{10.7} = 145$, $A_p = 6$, $K_p = 1^+$) para predecir k_7 . La expresión dada por Torr y otros, 1979 de k_7 medida en región F hasta el límite inferior de 135 km se extrapoló

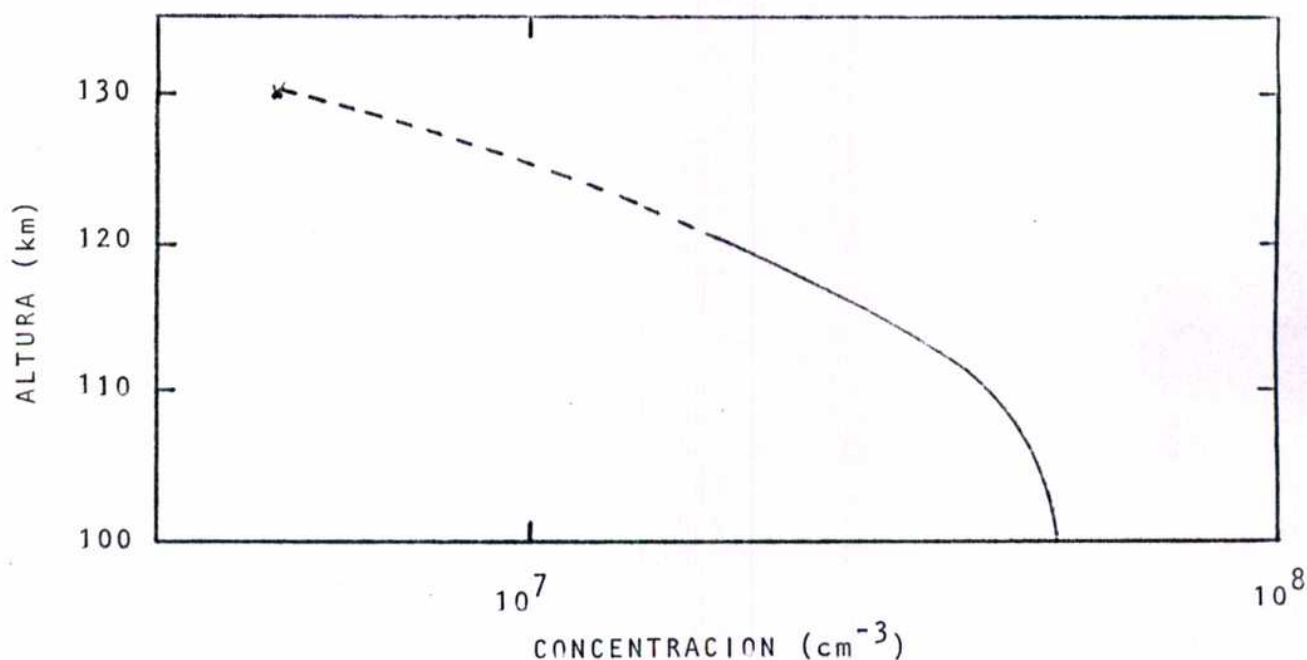


Figura 18: Perfil de concentración de monóxido de nitrógeno: medido por Meira, 1971 ($F_{10.7} = 145$) (línea llena), calculado utilizando la ecuación (16) y la expresión (23.4) para k_7 (cruz) y la interpolación adoptada (línea cortada).

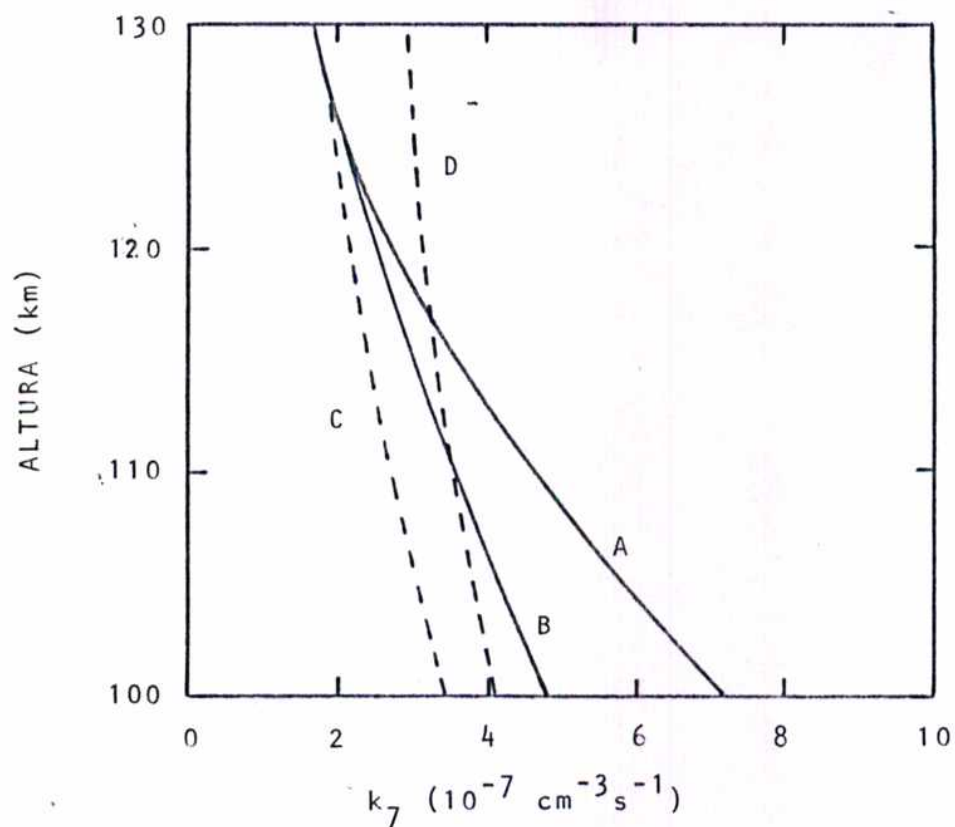


Figura 19: Variación con la altura del coeficiente de velocidad de recombinación de NO^+ con electrones calculado utilizando: el perfil de $n(\text{NO})$ de la figura 18 (A) y el perfil de $n(\text{NO}^+)/n(\text{O}_2^+)$ medido por Zbinden y otros, 1975 (ver Fig. 20) (B) junto con los calculados utilizando las expresiones dadas por Walls y Dunn, 1974 (curva C) y por Huang y otros, 1975 (curva D).

para determinar k_7 a los 130 km y a partir de este valor calcular $n(\text{NO})$ a esa altura. Con este valor se interpoló mediante una curva suave el perfil de este constituyente para $120 < h < 130$ km (ver fig. 18) y se utilizó para calcular k_7 en ese rango de alturas.

Resultados y discusión:

En la fig. 19 se ha graficado el perfil de k_7 obtenido. Se puede observar que éste corresponde a una transición paulatina desde los 130 km, altura en la cual el NO^+ se encuentra en su estado fundamental, hasta los 100 km en que su estado de excitación vibracional supera el de la mezcla medida por Huang y otros, 1975. (ec. 23.3).

Con este perfil de k_7 se calcularon las densidades iónicas a actividad solar moderada. En la fig. 20 a se han graficado los perfiles de las concentraciones de los constituyentes NO^+ y O_2^+ calculados con el presente modelo (curva A) y los resultados de las mediciones de Zbinden y otros, 1975 renormalizadas con el perfil de densidad electrónica utilizado en el presente cálculo (curva B). Obsérvese que el acuerdo es satisfactorio en toda la región E.

En la fig. 20 b se ha graficado el resultado de este cálculo

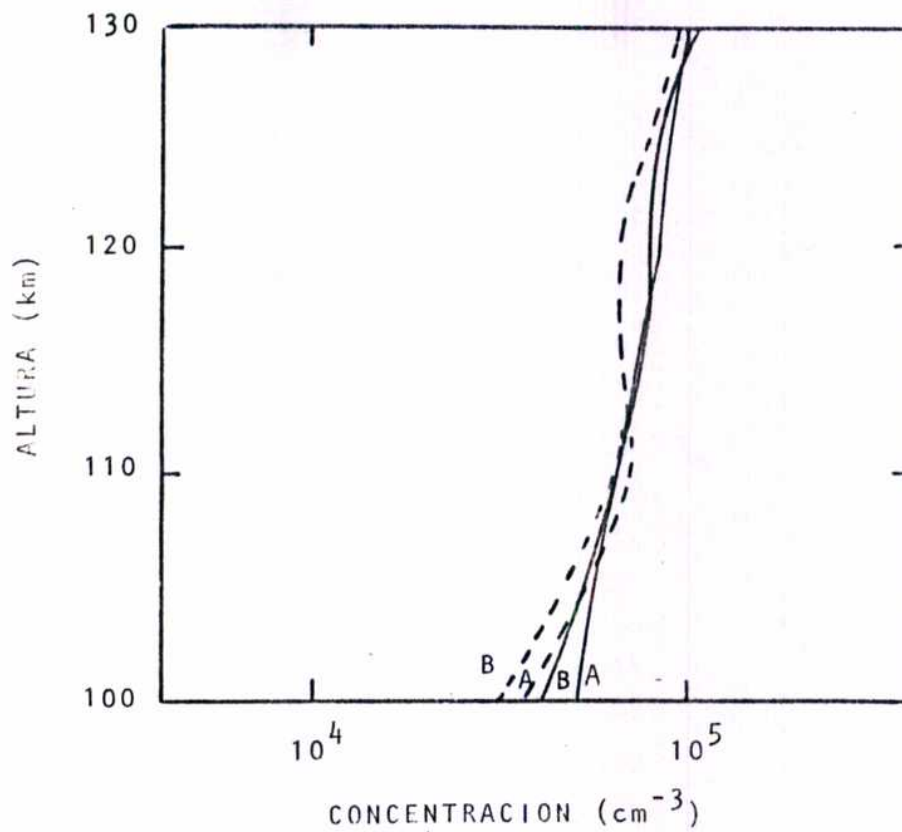


Figura 20a: Perfiles de concentración de NO^+ (línea llena) y de O_2^+ (línea de trazos) medidos por Zbinden y otros, 1975 (A) y resultados del presente modelo (B).

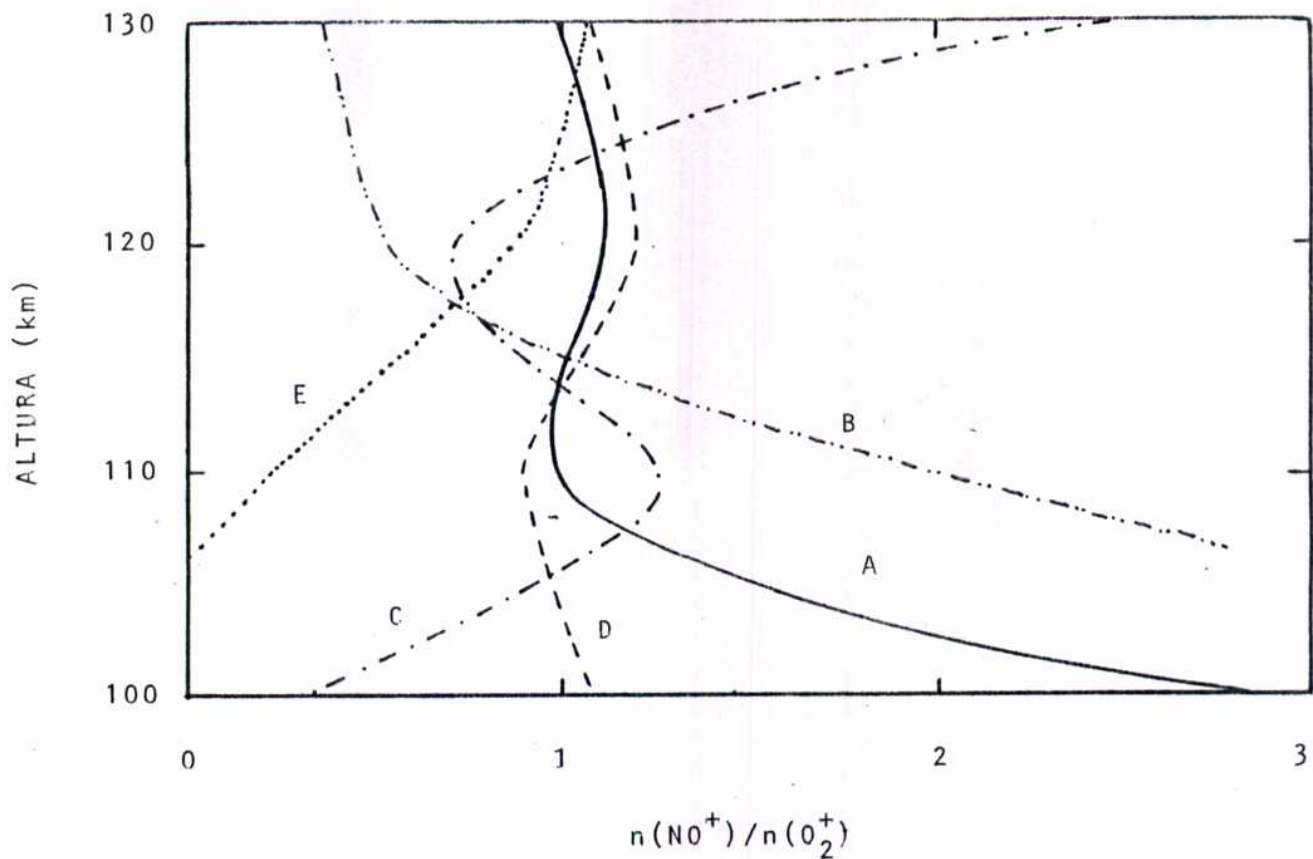


Figura 20b: Perfiles de concentración iónica relativa a actividad solar moderada: medida por Zbinden y otros, 1975 (A) y calculados de acuerdo con las condiciones que se detallan en la Tabla 9b.

Tabla 9b

Curva	T_e	k_7	Autor
B	$T_e = T_n$	Biondi, 1969	Schunk y Walker 1973
C	"	Perfil A, Fig. 19	Presente trabajo
D	Modelo de Duhau y Azpiazu 1985	"	"
E	"	Perfil C, Fig. 19	"

lo (curva D) así como también el de la medición de Zbinden y otros, 1975 (curva A). Se puede observar que, salvo en la región inferior donde la diferencia llega a ser del 100% el acuerdo es notable. La barra de error, a 100 km de altura, corresponde a la incerteza en $n(\text{NO}^+)/n(\text{O}_2^+)$ predicha debida al error experimental en la medición de $n(\text{NO})$ dado por Meira, 1971.

En esta figura se ha superpuesto el resultado obtenido por Schunk y Walker, 1973 para actividad solar media ($F_{10.7} = 130$) (curva B) al mediodía. Nótese que, de acuerdo con los mismos en la región superior el ión O_2^+ sería notablemente predominante, no concordando con las mediciones.

En esta misma figura se han graficado además los perfiles de concentraciones relativas que resultan de: i) considerar $T_e = T_n$ (curva C) y ii) k_7 obtenido con el ión NO^+ en su estado fundamental (Torr, 1979) en toda la región E (curva E). Obsérvese que, ambas suposiciones proporcionan resultados que difieren marcadamente con las mediciones. Incluso el caso ii) da un resultado absurdo en la región inferior.

Esto muestra que el perfil de densidades iónicas relativas es fuertemente dependiente del valor de k_7 . Teniendo en cuenta esto y el buen acuerdo obtenido en el cálculo de las densidades iónicas se intenta mejorar la predicción de k_7 en la región E inferior. Para ello se adopta la siguiente metodología: se invierte la ec. (13) para calcular k_7

usando los perfiles medidos de n_e (Dickinson y otros, 1972) y de $n(\text{NO}^+)/n(\text{O}_2^+)$ (Zbinden y otros, 1975). Esta elección de parámetros sería preferible a la anterior ya que la medición de $n(\text{NO})$ realizada por Meira, 1971 no corresponde exactamente a la misma actividad solar de los demás datos. La curva B de la fig. 19 corresponde al resultado así obtenido. Nótese que, a los 100 km, el valor de k_7 resulta menor que el evaluado utilizando la ec. (16) y los valores medidos de n_e y $n(\text{NO})$ (curva A en la misma figura), pero seguiría siendo mayor que el dado por Walls y Dunn, 1974 (curva D en fig. 19), es decir, en ambos casos nuestro resultado cualitativo es el mismo: la excitación crece monótonamente para alturas decrecientes.

5.1.3. Alta actividad solar

La aplicación del modelo a alta actividad solar fue realizada por Azpiazu y Duhau (1982 b).

Datos utilizados:

- a) El perfil de n_e medido por Spencer y otros, 1962 ($F_{10.7} = 166$; $K_p = 1^+$ $A_p = 7$).
- b) Como para esta actividad solar no hay mediciones del flujo solar incidente en todo el espectro de interés, se han utilizado las mediciones realizadas por Hall y otros, 1969,

Tabla 10

Parámetros y datos utilizados a actividad solar alta, latitud media.

Parámetro	Referencia	F _{10.7}	A _p	K _p	Latitud	Hora local
Concentración electrónica	Spencer y otros, 1962	166	7	1 ⁺	Media (Wallops Island)	Mediodía
Temperatura electrónica	Modelo de Duhau y Azpiazu, 1985	166				
Temperatura y concentración atmósfera neutra	Modelo J77	166		1	Media	Mediodía
Flujo solar incidente	Hall y otros, 1969 Heroux y otros, 1975 Manson, 1976a y b Interpolación de Schmidtke, 1976	166				

Heroux y otros, 1975, Manson, 1976 a y b, Higgins, 1976 y se ha completado el espectro mediante las leyes de interpolación que estos autores y Schmidtke, 1979 suministran.

- c) La temperatura del gas neutro y las concentraciones de los constituyentes del mismo son las calculadas para $T_{\infty} = 1100$ °K mediante el model J77.

No se han realizado mediciones de $n(O)$ a esta actividad solar que contempla el problema de la variación de densidad de este constituyente debida a la onda de choque del cohete, por lo tanto el valor utilizado es incierto.

- d) El perfil de k_7 calculado utilizando la expresión 23.3 con el perfil de T_e dado por el modelo de Duhau y Azpiazu, 1985, para $F_{10.7} = 166$.

En la tabla 10 se resumen las condiciones ionosféricas correspondientes a cada uno de los datos utilizados.

Resultados y discusión:

En la fig. 21 a se han graficado las mediciones realizadas por Istomin y Pokhunkov, 1963 ($F_{10.7} = 166$ y $F_{10.7} = 220$) en días geomagnéticamente no quietos ($K_p = 2$ y $K_p = 2^+$, respectivamente (curvas A y B). Junto con el perfil promedio calculado por Mitra y Banerjee, 1972 y el resultado del presente cálculo (curvas C y D respectivamente). Nótese que el acuerdo es sólo cualitativo, NO^+ es predominante en toda la región E.

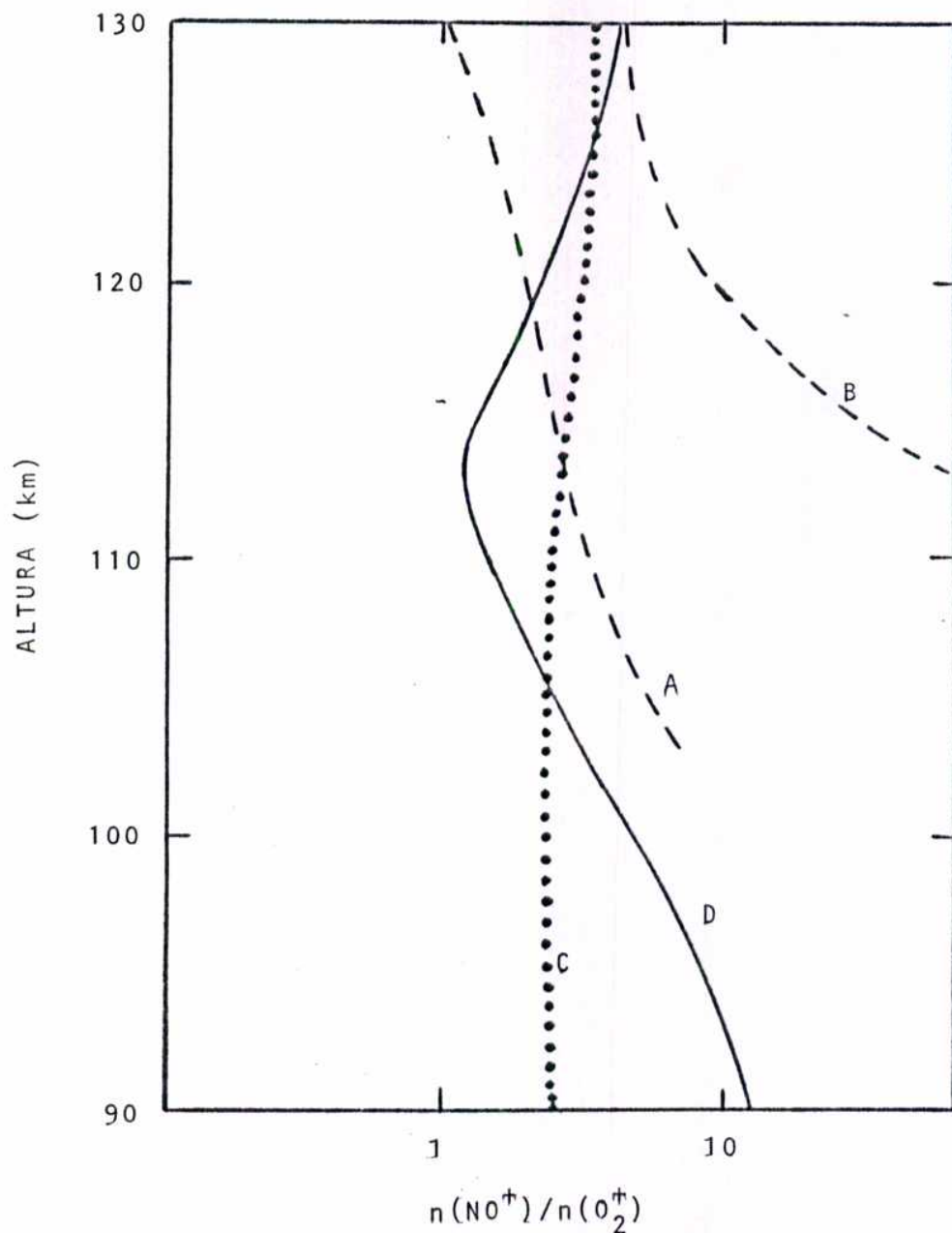


Figura 21a; Perfiles de concentración iónica relativa para actividad solar alta medidos por Istomin y Pokhunkov, 1963, para $F_{10.7} = 166$ y 220 (curvas A y B respectivamente), promedio de Mitra y Banerjee, 1972 (C) y resultado del presente modelo (D).

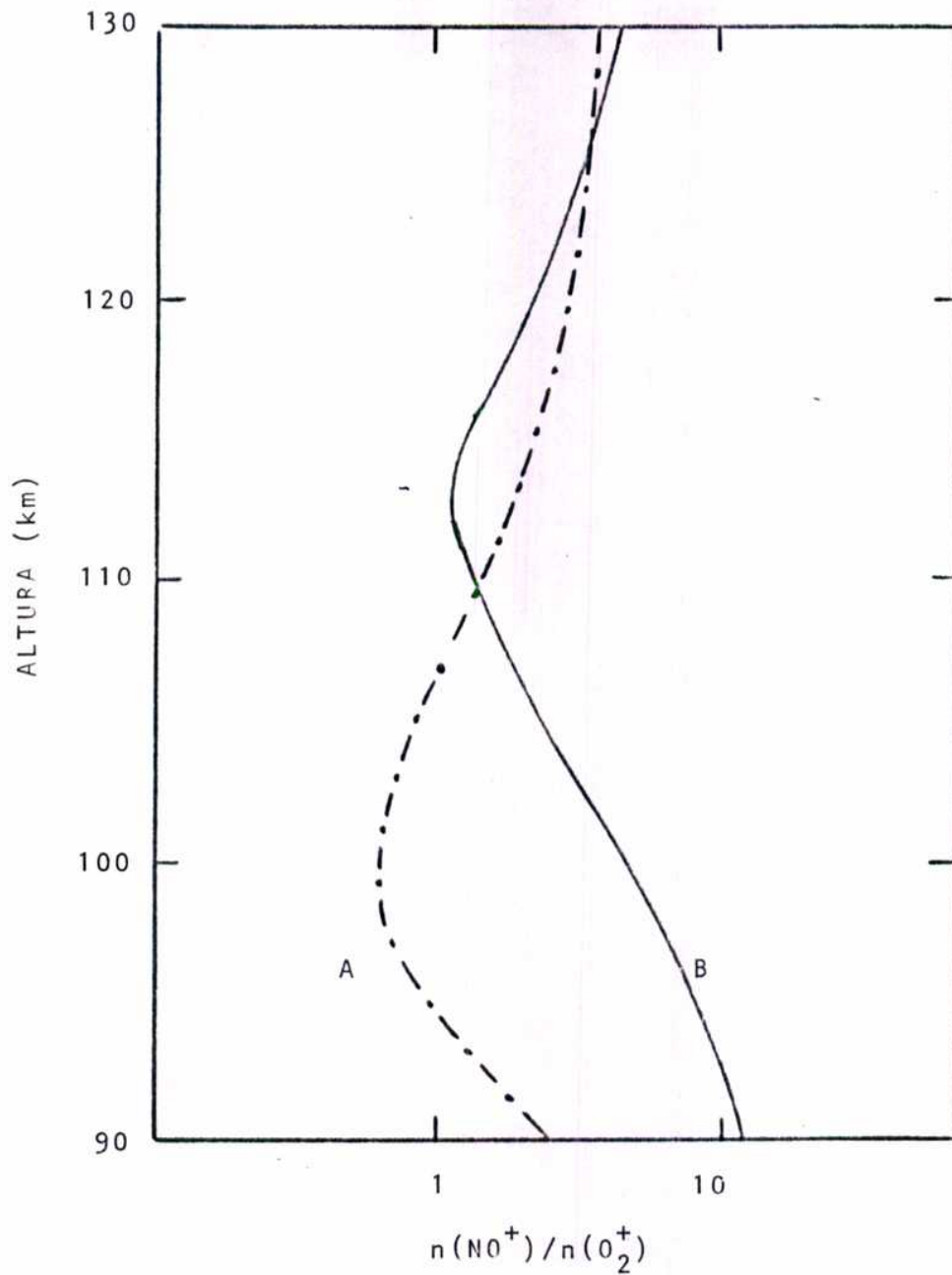


Figura 21b: Perfiles de concentración iónica relativa a actividad solar alta calculados: con el modelo de Chakrabarty y otros, 1978 (A) y con el presente model (B).

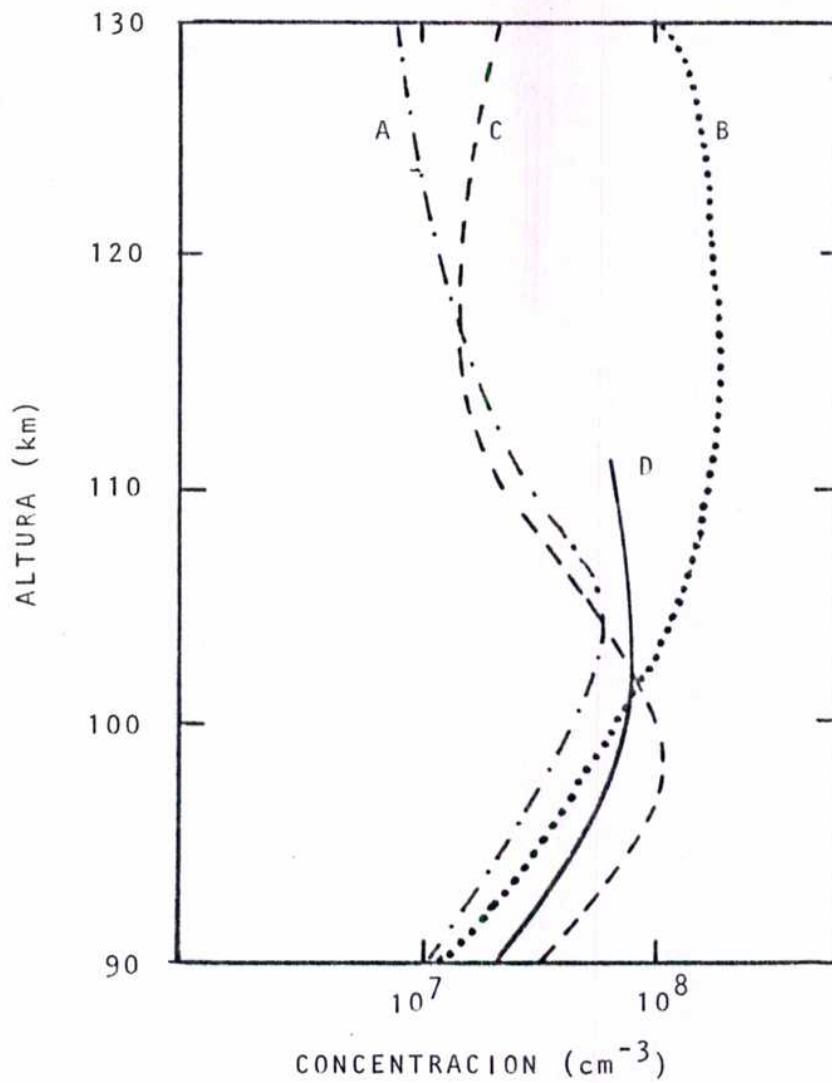


Figura 22: Perfiles de concentración de monóxido de nitrógeno a alta actividad solar calculados por: Kondo y Ogawa, 1977 (A), Chakrabarty y otros, 1978 (B), con el presente modelo (C), junto con la medición realizada por Meira, 1971 ($F_{10.7} = 145$) (D).

Tabla 11

Parámetros y datos utilizados a actividad solar baja, latitud ecuatorial.

Parámetro	Referencia	F _{10.7}	A _p	$\sum K_p$	Latitud	Hora local
Concentración de NO	Barth, 1966	80	1,6	20	Media	Mediodía
Temperatura y concentraciones atmósfera neutra	Trinks y otros, 1978 Modelo J77	89	19	27	Media	Mediodía
Temperatura electrónica	Modelo de Duhau y Azpiazu, 1985	70		24	Ecuat.	Mediodía
Flujo solar incidente	Manson, 1976	74				

Cuantitativamente hay diferencias pero éstas son de esperar puesto que las mediciones no corresponden a condiciones geomagnéticamente quietas situación que se ve agravada por el hecho de que, para alta actividad solar, las variaciones con las condiciones ionosféricas son más notorias.

En la fig. 21 b se ha graficado, junto con el resultado del presente trabajo, el resultado del modelo de Chakrabarty y otros, 1978. La diferencia se debe fundamentalmente a que en este último modelo se ha supuesto $T_e = T_n$.

En la fig. 22 se han graficado los perfiles $n(NO)$ obtenidos por Kondo y Ogawa, 1977 (curva A), el perfil supuesto por Chakrabarty y otros, 1978 (curva B) y el que resulta del presente modelo (curva C). A efectos de poder hacer alguna comparación se ha superpuesto el perfil medido por Meira, 1971 que es el obtenido a mayor actividad solar ($F_{10.7} = 145$). Todos los modelos reproducen el comportamiento de $n(NO)$ medido.

5.2. Cálculo de la densidad electrónica, latitudes ecuatoriales

Dado que, como ya se ha explicado, se ha supuesto que los términos convectivo y de variación temporal en la ecuación de continuidad (1) son despreciables, el modelo de formación aquí propuesto es de validez "a priori" sólo a latitudes medias, en horas cercanas al mediodía de días geomagnéticamente quietos.

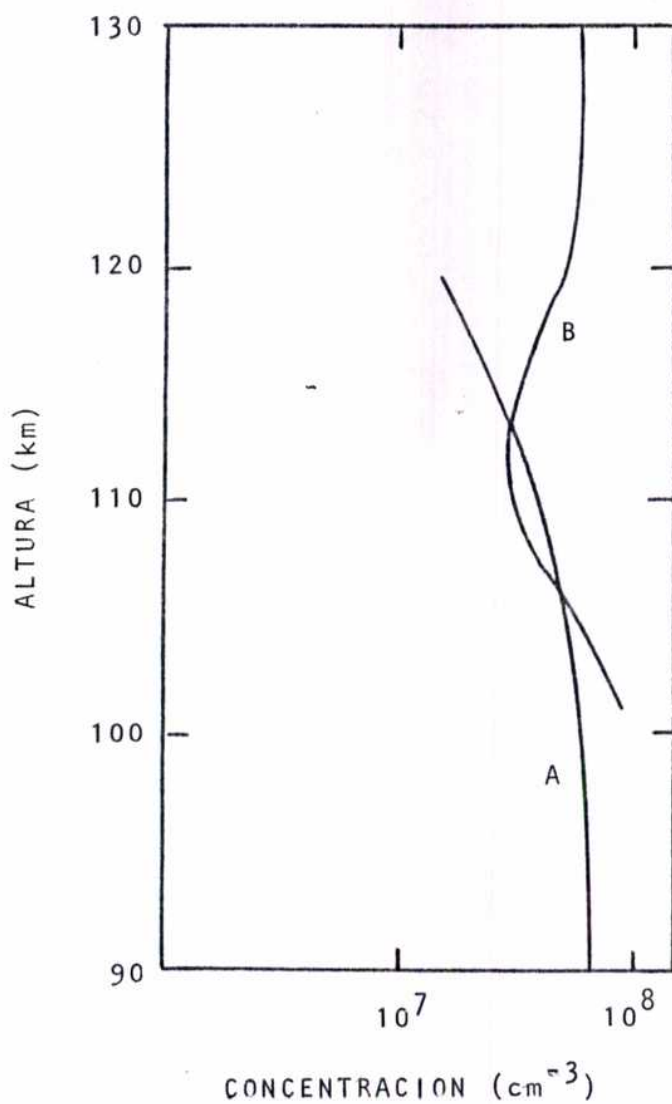


Figura 23: Perfiles de concentración de monóxido de nitrógeno a baja actividad solar medidos por Barth, 1966 ($F_{10,7} = 80$) (A) y por Trinks y otros, 1978 ($F_{10,7} = 84$) (B) a latitud media.

Sin embargo, se ha investigado la validez del mismo a latitudes ecuatoriales donde el término convectivo podría ser importante aún en las condiciones comentadas.

Se calculó la densidad electrónica utilizando las ecs. (10) a (13) y la condición de cuasi-neutralidad eléctrica para baja actividad solar ($F_{10.7} = 73$) (Duhau y otros, 1986).

Datos utilizados:

- a) Las dos únicas mediciones de $n(\text{NO})$ realizadas, en horas cercanas al mediodía a baja actividad solar son las correspondientes a Barth (1966) y Trinks y otros (1978) en las que $F_{10.7} = 80$, $\Sigma K_p = 20$ y $A_p = 16$, y $F_{10.7} = 89$, $\Sigma K_p = 27$ y $A_p = 19$ respectivamente. El perfil de Barth alcanza hasta los 120 km de altura y el de Trinks tiene su límite inferior en los 100 km y el superior en 200 km (ver fig. 23). Por consiguiente se ha utilizado el promedio de ambas mediciones en el intervalo común de ambas. Estos datos fueron obtenidos a latitudes medias y por lo tanto de los resultados del presente cálculo se podrá tener un indicio sobre la variabilidad o no de $n(\text{NO})$ con la latitud.
- b) Al igual que a latitud media se utilizó el flujo solar incidente medido por Manson, 1976: ($F_{10.7} = 74$).
- c) Como en las otras aplicaciones, se utilizó el modelo J77 de atmósfera neutra, con $T_\infty = 700$ °K.

- d) El perfil de temperatura electrónica utilizado es el que resulta del modelo de Duhau y Azpiazu, 1985 para $F_{10.7} = 70$.
- e) Al igual que a latitud media se adopta la expresión (23.2) para k_7 .

En la tabla 11 se resumen las condiciones ionosféricas correspondientes a cada uno de los datos utilizados.

Resultados y discusión

En la fig. 24 se ha graficado el perfil de n_e calculado (curva A) junto con la medición realizada por Maynard, 1967 (vuelo 65-5, 12/3/65, $F_{10.7} = 72,6$, $\Sigma K_p = 9^-$, $A_p = 4$). Obsérvese que hay un buen acuerdo entre ambos perfiles en toda la región E. Como el perfil de $n(\text{NO})$ utilizado corresponde a latitud media el acuerdo indica que la densidad de este constituyente no depende fuertemente de la latitud.

En la misma figura se ha graficado además el perfil de n_e calculado por Richmond (1972) para las mismas condiciones ($F_{10.7} = 70$, latitud ecuatorial). Como este autor supuso que $T_e = T_n$ por debajo de los 120 km de altura, el máximo que este perfil de n_e tiene a ~ 107 km es una consecuencia del pico de T_e/T_n a esa altura. La discrepancia aumenta por encima de los 120 km ya que ese autor asumió que los coeficientes de recombinación son menores que los medidos en laboratorio en fracciones constantes con la altura.

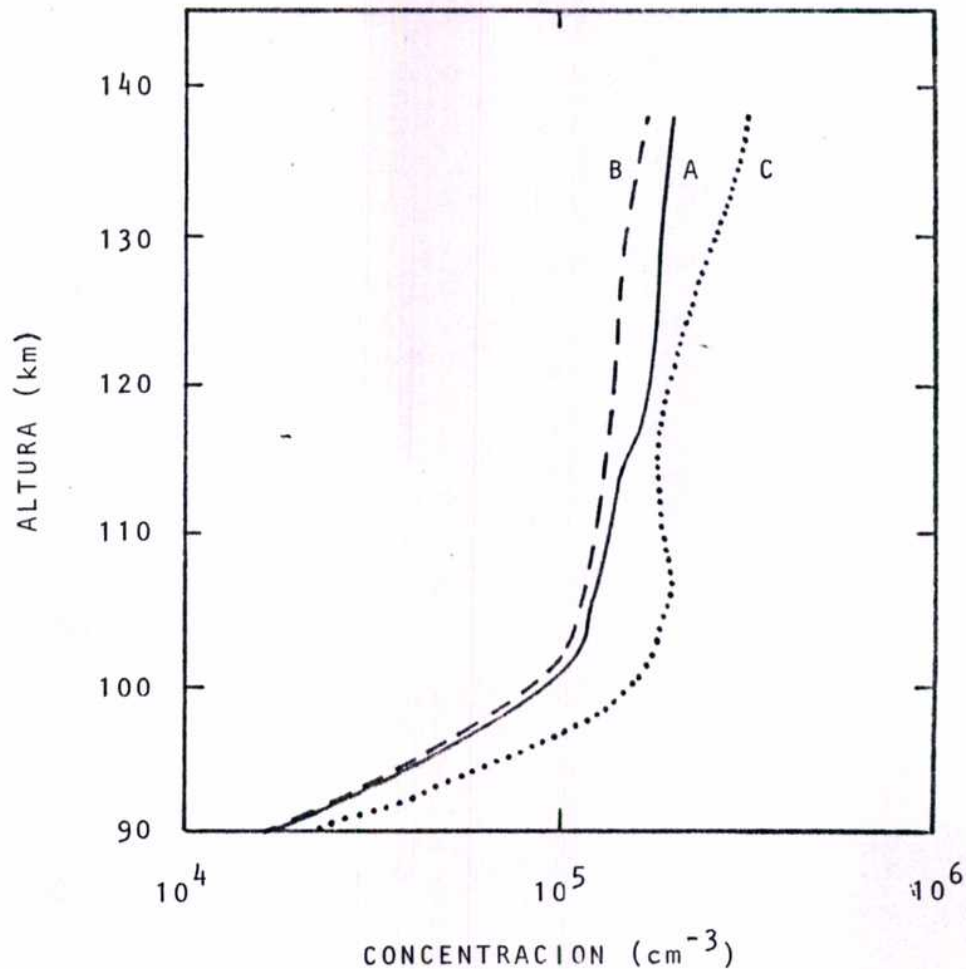


Figura 24: Perfiles de concentración electrónica a latitud ecuatorial y baja actividad solar: vuelo 65-5, Maynard, 1967 (A), presente modelo (B) y Richmond, 1973 (C).

Esto muestra que la hipótesis de equilibrio físico-químico en horas diurnas es válida también en el ecuador, es decir que allí también es despreciable el término de transporte. Nótese que una vez fijadas la hora y las actividades solar y magnética, sólo la composición de la atmósfera neutra depende, en este caso, de la posición geográfica, dependencia que está dada

en el modelo J77. El resultado muestra también la excelencia de este modelo. En cuanto a la temperatura electrónica, los resultados de Duhau y Azpiazu, 1981, 1985 indicarían, en coincidencia con el presente resultado, que T_e no depende fuertemente con la posición geográfica. Este hecho indicaría que el calentamiento anómalo de los electrones es o bien debido básicamente a un mecanismo físico-químico y, a lo sumo secundariamente dinámico, o a un mecanismo que combina este aspecto e inestabilidades de plasma.

-

C A P I T U L O 6

Conclusiones

Se elaboró un esquema sencillo de formación de región E en el que se considera la creación de dos iones intermedios, N_2^+ y O^+ y dos iones predominantes, NO^+ y O_2^+ .

Se ha aplicado este modelo y se encontró un excelente acuerdo entre los perfiles de densidad medidos en días geomagnéticamente quietos y los predichos por el mismo, así como la variación de estos perfiles con la actividad solar.

Por lo tanto, y dado que en el modelo se han despreciado los efectos dinámicos se puede afirmar que a horas diurnas rige el equilibrio fotoquímico en toda la región E, aún a latitudes ecuatoriales.

Por otra parte, un requisito fundamental para que el modelo sea predictivo es la metodología empleada en la selección de datos. Se encontró un criterio de selección : en días geomagnéticamente quietos, es decir $A_p < 7$ y $K_p < 1^+$ durante todo el día, las mediciones de los parámetros ionosféricos son reproducibles si éstas se realizan a la misma actividad solar, hora del día y latitud. Este criterio permitió definir el concepto de condición ionosférica equivalente.

Como las densidades iónicas dependen de la temperatura electrónica y se han utilizado perfiles de la misma en los que $T_e \neq T_n$, se encontró otra evidencia de que los electrones se encuentran en desequilibrio térmico con el gas neutro aún a latitudes medias .

La precisión del modelo permitió que éste pueda ser utilizado como un método indirecto de medición de parámetros poco accesibles. En particular, permitió medir el estado de excitación del NO^+ y sirvió para predecir la variación del perfil de concentración del monóxido de nitrógeno con la actividad solar.

De este trabajo de Tesis y utilizando la metodología empleada en la misma surgen las siguientes posibles líneas de investigación:

- Búsqueda de la cuantificación de la variable actividad magnética a través del estudio de las observaciones de la dependencia de T_e con la misma; siendo éste un parámetro muy sensible a la variable mencionada, es especialmente apto para ese fin.
- Modelo de formación de monóxido de nitrógeno y su variación con la actividad solar y la geomagnética.
- Estudio de las posibles mediciones indirectas del estado de excitación de los componentes atmosféricos y ionosféricos, como N_2 y NO^+ , y sus variaciones con la actividad solar y la geomagnética.
- Análisis de los posibles mecanismos de calentamiento de los electrones usando el modelo de la presente Tesis para el estudio de la energética, de lo cual el ítem anterior es un ejemplo.
- Como se ha adquirido el conocimiento de la físico-química de la región E, el modelo puede ser extendido con confiabilidad, para que tenga validez durante todo el día, resolviendo las ecuaciones dinámicas.

Alma Durhan

J. C. Aspiroz

REFERENCIAS

- Alcaydé, D., P. Bauer y J. Fontanari, 1974, *J. Geophys. Res.*, 79, 629.
- Azpiazu, M.C. y S. Duhau, 1982, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 15, 933.
- Banks, P.M. y G. Kockarts, 1973, *Aeronomy*, Academic Press, New York, London.
- Barth, C.A., 1966, *Ann. Géophys.*, 22, 198.
- Beynon, W.J.G. y E.S. Owen Jones, 1965, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 27, 761.
- Biondi, M.A., 1969, *Can. J. Chem.*, 47, 1711.
- Chakrabarty, P., D.K. Chakrabarty y L. Bjorn, 1978, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 40, 81.
- Chapman, S., 1956, *Nuovo Cim.*, 4, 1385.
- Chapman, S. y G. Cowling, 1970, *Mathematical Theory of Non-Uniform Gases*, Cambridge University Press.
- CIRA, 1965, *COSPAR International Reference Atmosphere*, Akademie-Verlag.
- CIRA, 1972, *COSPAR International Reference Atmosphere*, North-Holland, Amsterdam.
- D'Angelo, N. y R.L. Merlino, 1986, *Iowa Univ. Rep.* 86-7.
- Danilov, A.D. y V.K. Semenov, 1978, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 40, 1093.
- Dickinson, P.H.G., J.E. Hall y F.D.G. Bennett, 1972, *Comunicación privada*.
- Duhau, S. y M.C. Azpiazu, 1981, *Geophys. Res. Lett.*, 8, 819.
- Duhau, S. y M.C. Azpiazu, 1981, *Geoacta*, 11, 165.
- Duhau, S. y M.C. Azpiazu, 1985, *Planet. Space Sci.*, 33, 909.
- Duhau, S., M. de la Vega y M.C. Azpiazu, 1986, *Planet. Space Sci.* en prensa.
- Dunkin, D.D., 1968, *J. Chem. Phys.* 49, 1365.
- Evans, 1969, *Proc. IEEE*, 57, 495.
- Fehsenfeld, F.C., D.B. Dunkin y E.E. Ferguson, 1970, *Planet. Space Sci.* 18, 1267.
- Ferguson, E.E., 1967, *Rev. Geophys.*, 5, 305.
- Ferguson, E.E., F.C. Fehsenfeld y A.L. Schmeltekopf, 1969, *Advances in Atomic and Molecular Physics*, vol. 5, Ed. D.R. Bates y J. Esterman (Academic Press).
- Fite, W.L., 1969, *Can. J. Chem.*, 47, 1797.
- Golshan, N. y C.F. Sechrist, 1974, *Aeronomy Rep.* 61, University of

Illinois, Illinois.

Hall, H.A., J.E. Higgins, C.W. Chagnon y H.E. Hinteregger, 1969.

J. Geophys. Res. 74, 4:81.

Hedin, A.E., C.A. Reber, G.P. Newton, N.W. Spencer, H.C. Brinton,

H.G. Mayr y W.E. Potter, 1977, J. Geophys. Res., 82, 2148.

Heroux, L., M. Cohan y H.E. Higgins, 1974, J. Geophys. Res., 79, 5237.

Heroux, L., M. Cohan y H.E. Higgins, 1975, J. Geophys. Res., 80, 4732.

Hinteregger, H.E., L.A. Hall y G. Schmidtke, 1965, Space Res., 5, 1175.

Huang, C.M., M.A. Biondi y R. Johnsen, 1975, Phys. Rev A, 11, 901.

Huffman, R.E., 1969, Can. J. Chem., 47, 1823.

Istomin, V.G. y A.A. Pokhunkov, 1963, Space Res., 3, 117.

Jacchia, L.G., 1971, Smithsonian Astrophys. Observatory Special Rep.
332.

Jacchia, L.G., 1977, Smithsonian Astrophys. Observatory Special Rep.
375.

Johnsen, R. H.L. Brown y M.A. Biondi, 1970, J. Chem. Phys., 52, 5080.

Johnson, C.Y., 1966, J. Geophys. Res., 71, 330.

Keneshea, T.J., R.S. Narcisi y W. Swider, 1970, J. Geophys. Res., 75,
845.

Kondo, Y. y T. Ogawa, 1977, J. Geomagn. Geoelect., 29, 65.

Louro, A.A. y S. Duhau, 1986, Geoacta, 14, 159.

Kreplin, R.N., 1970, Ann. Géophys., 26, 567.

Mitra, A.P. y P. Banerjee, 1972, Space Res., 12, 1315.

Manson, J.E., 1976, J. Geophys. Res., 81, 1629.

Manson, J.E., 1976, Air Force Cambridge Res. Lab. Environmental Re-
search Papers No. 546.

Maynard, N.C., 1967, J. Geophys. Res., 72, 1863.

McFarland, M., D.L. Albritton, F.C. Fehsenfeld, E.E. Ferguson y A.L.
Schmeltekopf, 1974, J. Geophys. Res., 79, 2925.

Meira, L.G., 1971, J. Geophys. Res., 76, 202.

Mull, P.M. y J.W. McGowan, 1979, J. Phys. B, 1591.

Nicolet, M. y A.C. Aitkin, 1960, J. Geophys. Res., 65, 1469.

O'Malley, T.F., 1970, J. Chem. Phys., 52, 3269.

Oyama, K. y K. Hirao, 1979, Planet. Space Sci., 27, 183.

Oyama, K. y K. Hirao, 1979, J. Geomagn. Geoelect. 37, 913.

Richmond, A.D., 1972, Air Force Cambridge Research Laboratories

- AFCRL-72-0668, Environmental Res. Papers, No. 421.
- Rishbeth, H. y K.G. Garriott, 1969, Introduction to Ionospheric Physics, Academic Press, New York, Londres.
- Schmeltekopf, A.L., A.L. Fehsenfeld, G.J. Gilman y E.E. Ferguson, 1967, Planet. Space Sci., 15, 401.
- Schmidtke, G., 1976, Geophys. Res. Lett., 3, 573.
- Schunk, R.W., 1973, Planet. Space Sci., 25, 437.
- Schunk, R.W. y J.C.G. Walker, 1973a, Planet. Space Sci., 21, 1875.
- Schunk, R.W. y J.C.G. Walker, 1973b, Progress in High Temperature Physics and Chemistry, vol. 5, Ed. C.A. Rouse, Pergamon Press.
- Sharp, W.E., 1980, Geophys. Res. Lett., 7, 485.
- Spencer, N.W., L.H. Brace y G.R. Carignan, 1962, J. Geophys. Res., 67, 157.
- St. Maurice, J.P., K. Schlegel y P.M. Banks, 1981, J. Geophys. Res., 86, 1453.
- St. Maurice, J.P. y D.G. Torr, 1978, J. Geophys. Res., 83, 969.
- Taylor, H.A., 1972, Space Res. XII, 1275.
- Timothy, A.F., J.G. Timothy, A.P. Willmore y J.H. Wager, 1972, J. Atmos. Terr. Phys., 34, 969.
- Ting Yi Li, 1966, Gas Kinetic Equations and Their Applications to Non-Equilibrium Flows with Diffusion and Chemical Reaction, Ed. F. Pan, Addison-Wesley, Reading, Mass.
- Torr, D.G., 1979, Rev. Geophys. Space Phys., 17, 510.
- Torr, D.G., M.R. Torr, J.C.G. Walker, L.H. Brace, H.C. Brinton, W.B. Hanson, J.H. Hoffman, A.O. Nier y M. Oppenheimer, Geophys. Res. Lett., 3, 209.
- Trinks, H., U. von Zahn, C. Barth y K.K. Kelly, 1978, J. Geophys. Res., 83(A), 203.
- Vlasov, M.N., 1972, J. Atmos. Terr. Phys., 38, 807.
- Walker, J.C.G., 1968, Planet. Space Sci., 16, 321.
- Walls, F.L. y G.H. Dunn, 1974, J. Geophys. Res., 79, 1911.
- Watanabe, K. y H.E. Hinteregger, 1962, J. Geophys. Res., 67, 999.
- Zbinden, P.P., M.A. Hidalgo, P. Eberhardt y J. Geiss, 1975, Planet. Space Sci., 23, 1621.