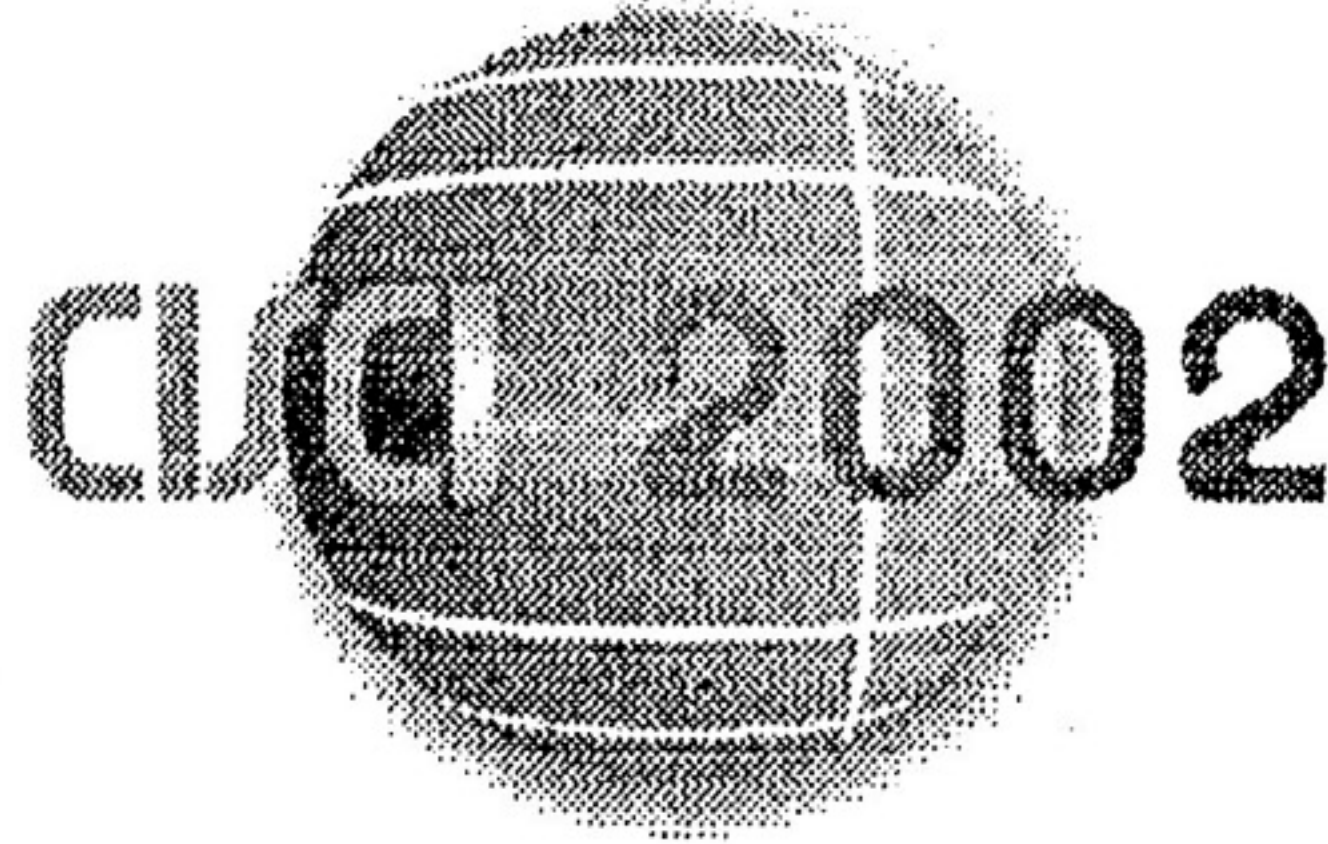


*Inciso A. 2, 11*



***Conferencia Iberoamericana en***  
**SISTEMAS, CIBERNÉTICA E INFORMÁTICA**

del 18 al 21 de Julio de 2002  
Orlando, Florida, EE.UU.

# Memorias

**Volumen II**



**Organizada por**  
International Institute of Informatics and  
Systemics IIS

Member of the International  
Federation of Systems Research IFSR

Editores:  
Jorge Baralt  
Belkis Sánchez  
Emilio García Moreno



# Erosión del ozono antártico durante la obscuridad polar.

M. Alvarez-Madrigal y J. Pérez-Peraza

Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México,  
Ciudad Universitaria, Delegación de Coyoacán, 04510, México D.F., México

## RESUMEN

El ozono estratosférico ha tenido un decrecimiento significativo desde la década de los 1980's a la fecha. (1,2). La mayor parte de esta disminución se atribuye a la actividad humana (3). Sin embargo las variaciones naturales también afectan su abundancia.

Dentro de las causas naturales de variación se han identificado las siguientes: El Ciclo Solar de radiación ultravioleta (4,5) las erupciones volcánicas (6), los cambios interanuales de temperatura y la dinámica atmosférica (7), los grandes Eventos de Protones Solares (8,9), los Rayos Cósmicos galácticos (10) y la precipitación de electrones relativistas (11).

Los mapas de abundancia global de ozono muestran que el "Hoyo de ozono" se manifiesta en latitudes donde la precipitación de partículas es intensa ya que se encuentra ubicado geográficamente donde se encuentran los óvalos aurales. Esto hace pensar que es posible encontrar una conexión entre ambos fenómenos.

El presente trabajo propone una explicación de como las partículas aurales pueden influir sobre la abundancia del ozono estratosférico, contribuyendo así como otro factor a tomar en cuenta en el fenómeno llamado "hoyo de ozono". También se muestra evidencia de una relación entre la actividad auroral y el tamaño del "hoyo de ozono", con base en los datos de satélite para la abundancia de ozono y los índices  $A_p$  de actividad geomagnética en los óvalos aurales.

## 1. INTRODUCCION

La influencia de las partículas rápidas sobre la atmósfera se puede dar por la interacción directa o indirecta, dependiendo de la energía de las partículas. Por ejemplo los rayos cósmicos galácticos y las partículas solares de alta energía tienen el suficiente "momentum" como para penetrar en las capas inferiores de la atmósfera provocando "chubascos" de partículas en un efecto cascada que les permite alterar por colisión directa a las moléculas atmosféricas en las capas bajas, incluso el efecto puede llegar a la superficie, como en el caso de los GLE's (del inglés Ground Level Events) que pueden influir las abundancias de ozono estratosférico durante

los eventos. Su efecto permanece durante varios meses después. Un estudio profundo del impacto de estas partículas energéticas se puede encontrar por ejemplo en Jackman et al. 1995 (8).

En el caso de las partículas aurales, en su mayoría no pueden penetrar profundo en la atmósfera ya que poseen un momento menor (en el orden de los KeV's) y por ello

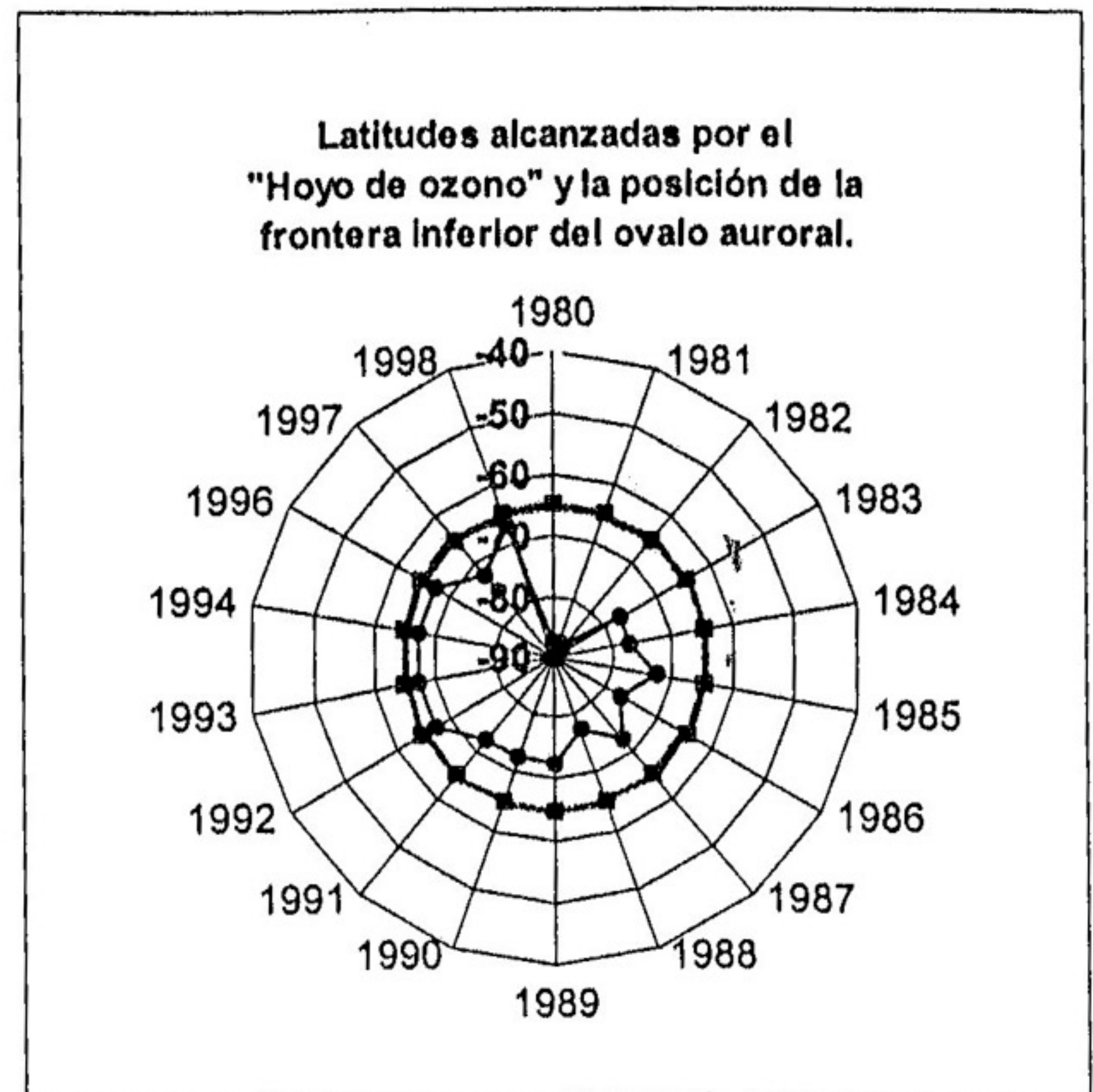
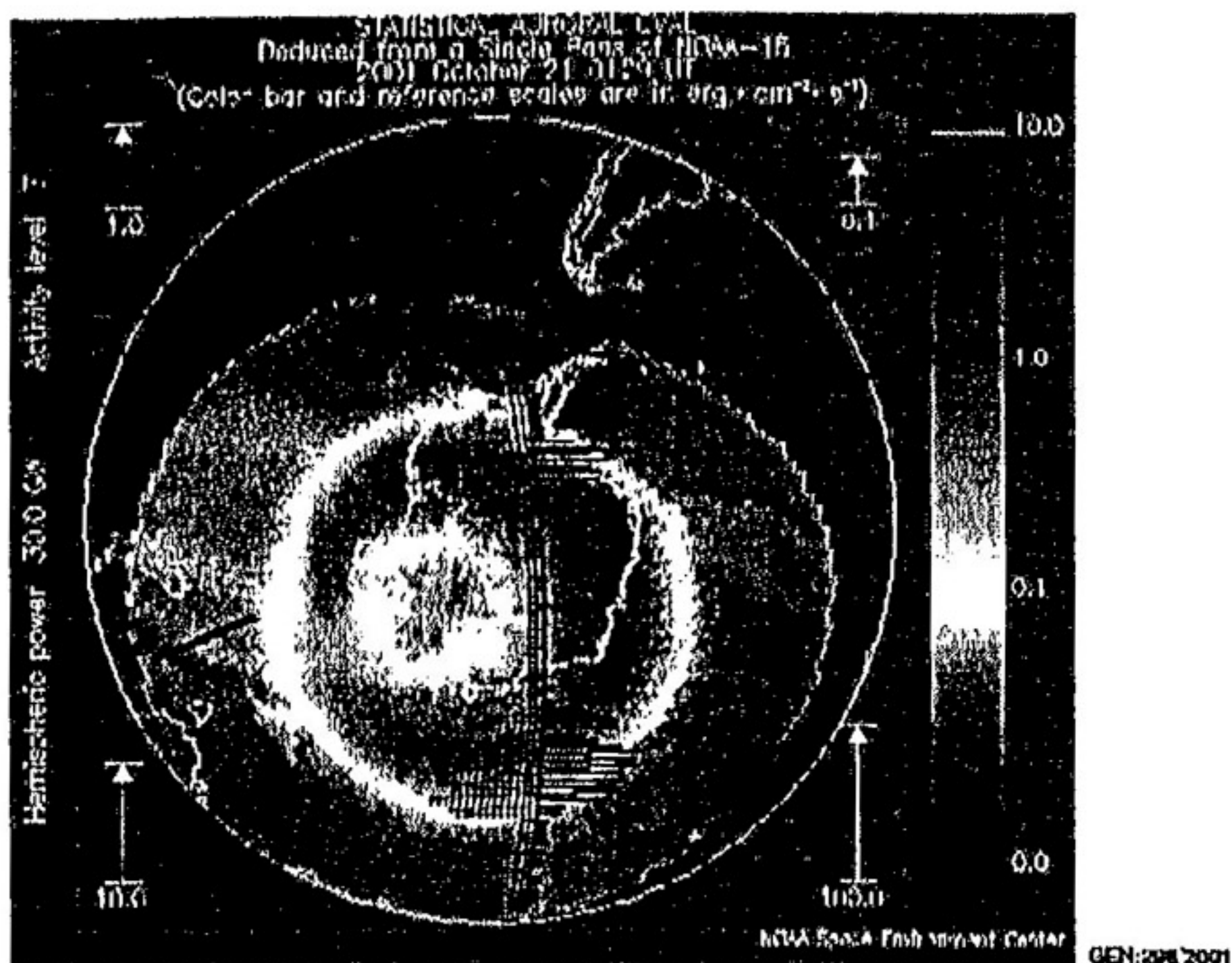


Figura 1. Máxima latitud alcanzada por el "hoyo de ozono" para los años 1980-1998 (la curva más interna) y la posición aproximada de la frontera baja para el óvalo auroral sur (el círculo con marcas cuadradas). Datos obtenidos de la página internet TOMS (12).

llegan a penetrar sólo hasta alturas de unos 60 Km, en periodos de mucha actividad geomagnética. Estas partículas son muy numerosas y se precipitan prácticamente de manera continua, por lo que su influencia sobre la atmósfera terrestre es de largo plazo. Esto conduce a investigar ¿qué



(a)



(b)

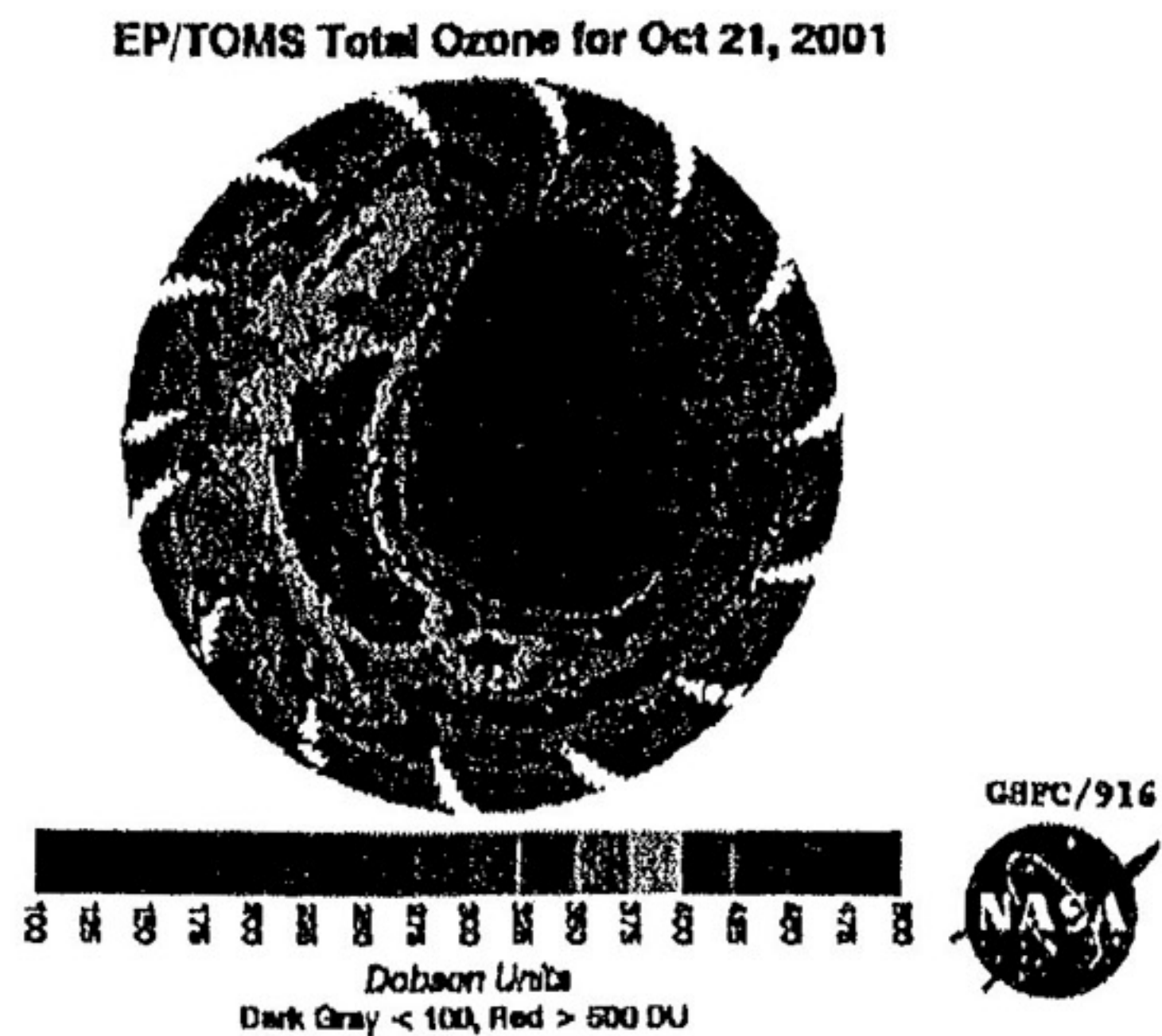


Figura 2. A la Izquierda (a) se ilustra la precipitación de partículas en la zona auroral sur para el 21 de octubre de 2001; a la derecha (b), la posición del "hoyo de ozono" en el hemisferio sur para la misma fecha. En esta figura se aprecia como la precipitación de partículas aurorales se manifiesta justo por encima del "hoyo de ozono". Fotografía y mapa obtenidos de internet en las páginas de POES Energetic Particles (13) y TOMS (12) respectivamente.

tan importante es su influencia en la atmósfera? ¿Cuáles son los mecanismos físicos de interacción involucrados a tales alturas?

Aquí se propone la existencia de una conexión entre la precipitación de las partículas aurorales y la erosión del ozono estratosférico antártico, que se establece por vías tales como: La inyección de cargas eléctricas al circuito global a causa de los electrones aurorales, la emisión de radiación UV en las auroras y el calentamiento de la atmósfera neutra por parte de las partículas aurorales. Se muestran evidencias, con base en los datos satelitales de ozono (12), que apoyan la idea de una conexión física entre la precipitación auroral y un aumento en la talla del "hoyo de ozono" antártico.

Se considera que hay "hoyo de ozono" si la cantidad de ozono es de 220 DU o menor en una localidad geográfica específica (12). La razón para proponer una conexión, entre la actividad auroral y el "hoyo de ozono", es que ambos fenómenos se manifiestan en áreas geográficas semejantes (fig. 1), coinciden, en general, en latitud y longitud fig. (2) pero se manifiestan a distintas alturas. Mientras que el "hoyo de ozono" se encuentra en la estratosfera (entre los 20-30 km. de altura), las auroras son un fenómeno de la atmósfera alta, cuyas partículas penetran aproximadamente hasta unos 90-95 km. de altura. Véase por ejemplo un perfil vertical típico de la densidad de electrones durante una aurora fig. (3).

Adicionalmente encontramos un patrón de variación en el área del "hoyo de ozono", que es compatible con la amplitud y comportamiento del ciclo de variación auroral de 11 años.

## 2. MODELO DE LA INTERACCION

El escenario general propuesto en este trabajo es el siguiente: Las partículas se precipitan en una zona donde la geometría del campo magnético favorece su propagación hacia la atmósfera baja, dado que las líneas son aproximadamente perpendiculares a la superficie terrestre. Esto propicia el ingreso de cargas positivas y negativas a la atmósfera (altura <100Km) ya que las partículas aurorales se precipitan y chocan con los átomos y moléculas locales en las capas atmosféricas superiores, provocando ionización, disociación, excitación, iones y electrones secundarios que penetran aun más bajo. Estas cargas se asimilan, en su mayoría, en la ionosfera baja, produciendo una alteración en el circuito global, la cual lleva a una modificación del campo eléctrico y las corrientes que circulan en la estratosfera.

También se tiene un calentamiento de la atmósfera neutra, debajo de la aurora lo cual produce vientos ascendentes (14). Adicionalmente, existe en ocasiones la emisión de UV a causa de la interacción de los electrones aurorales con la atmósfera. Esta radiación llega incluso hasta la superficie.

En este escenario general es de esperarse que se produzca un perfil vertical de cargas positivas y un perfil de cargas negativas que dependerán de la altura, los cuales deberían ser cualitativamente semejantes y ligeramente distintos en altura, a causa de la diferencia en movilidad (son más móviles los electrones) y en sección eficaz de colisión con los constituyentes atmosféricos.



Los perfiles verticales de densidad de electrones en las regiones aurales son como el que se ilustra esquemáticamente en la (fig.3), donde se aprecia que un máximo de partículas entre los 90-95 km., con densidades del orden de  $10^5$  partículas por  $\text{cm}^3$  (14). Puesto que las partículas aurales se precipitan a la atmósfera impulsadas por algún mecanismo de aceleración originado en la magnetosfera, se espera que el perfil correspondiente de cargas positivas y negativas para el mismo evento sea semejante para no romper con las condiciones de cuasi-neutralidad de la capa (ionosfera), sin embargo, en principio se tienen tres opciones que son: primera, que las cargas positivas sean menos abundantes que las cargas negativas. Segunda que las distribuciones de carga sean

pueden tener influencia local significativa en la atmósfera baja. Véase por ejemplo Michnowsky (15). Las mediciones aun no han aportado una visión definitiva en cuanto a las relaciones causa-efecto, dado que el fenómeno implica relaciones complejas con las condiciones locales donde se mide y no ha sido sencillo determinar de manera unívoca las causas de las variaciones medidas en los campos eléctricos que al nivel de la superficie alcanzan hasta unos 3000 V/m en la zona Antártica, de acuerdo a Burns et al. 1995 (16), pero su origen no es necesariamente auroral. Sin embargo en la misma referencia se reportan variaciones en el campo eléctrico "de buen tiempo" que se pueden asociar con la actividad geomagnética y se menciona que los campos aumentan de su valor normal (que es del

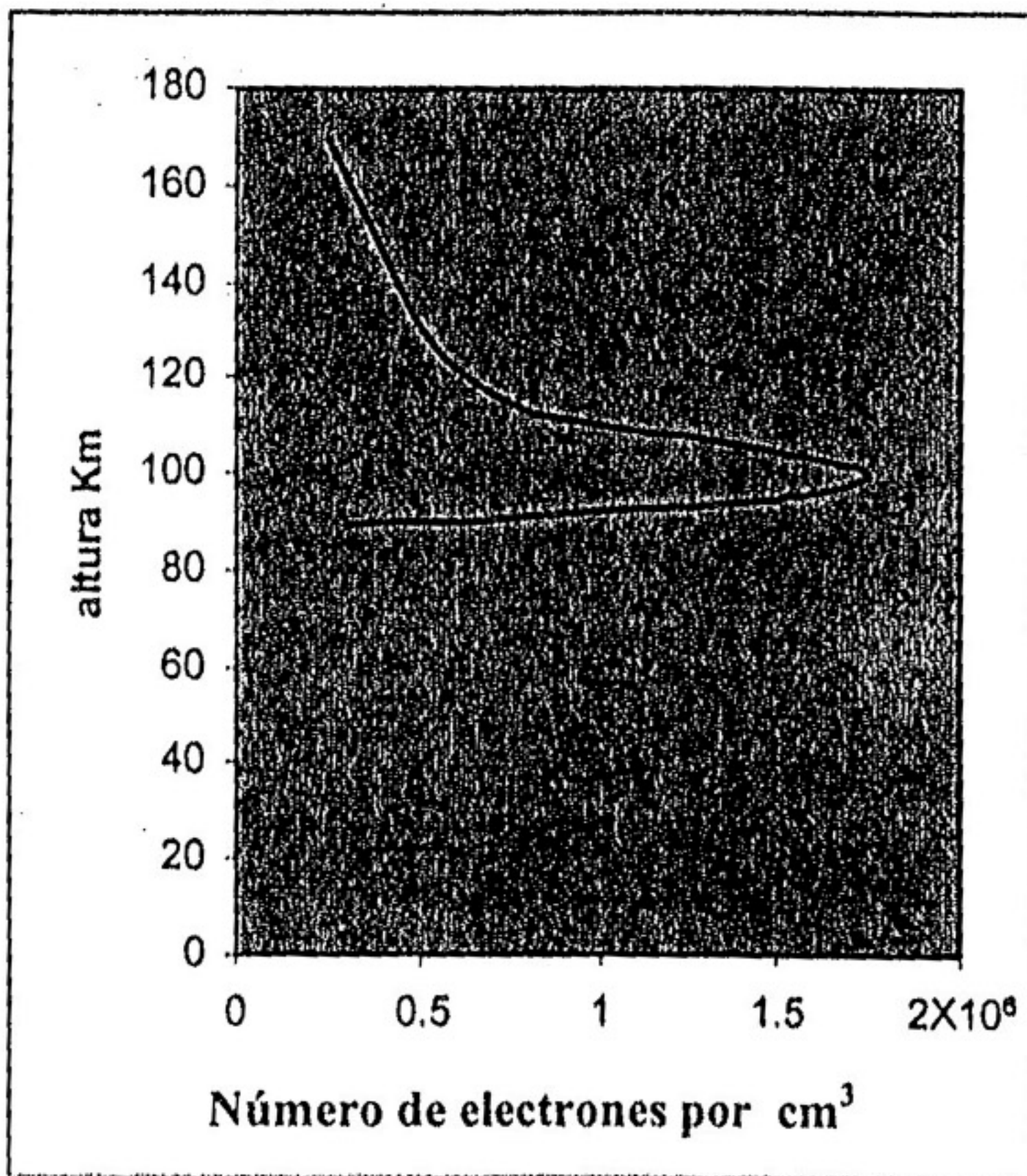


Figura 3. Forma general de los perfiles verticales de la concentración de electrones en una aurora. Véase por ejemplo (14)

semejantes pero no idénticas (por ejemplo que alcancen el máximo en alturas ligeramente superiores por efecto de la mayor movilidad de los electrones, etc.) y tercera que la distribución de los iones positivos sea exactamente igual a la de los electrones.

Bajo las dos primeras alternativas tendremos (adicionalmente) una componente de campo eléctrico efectivo que penetrará las capas bajas de la atmósfera, lo que no ocurre con la tercera opción.

La intensidad del campo dependerá, en el primer caso de la densidad de los electrones y en el segundo caso de la forma de las distribuciones de densidad de iones y electrones. Actualmente aun se está haciendo trabajo para establecer la magnitud y duración de los campos eléctricos que se inducen durante los fenómenos aurales, principalmente a grandes latitudes ya que

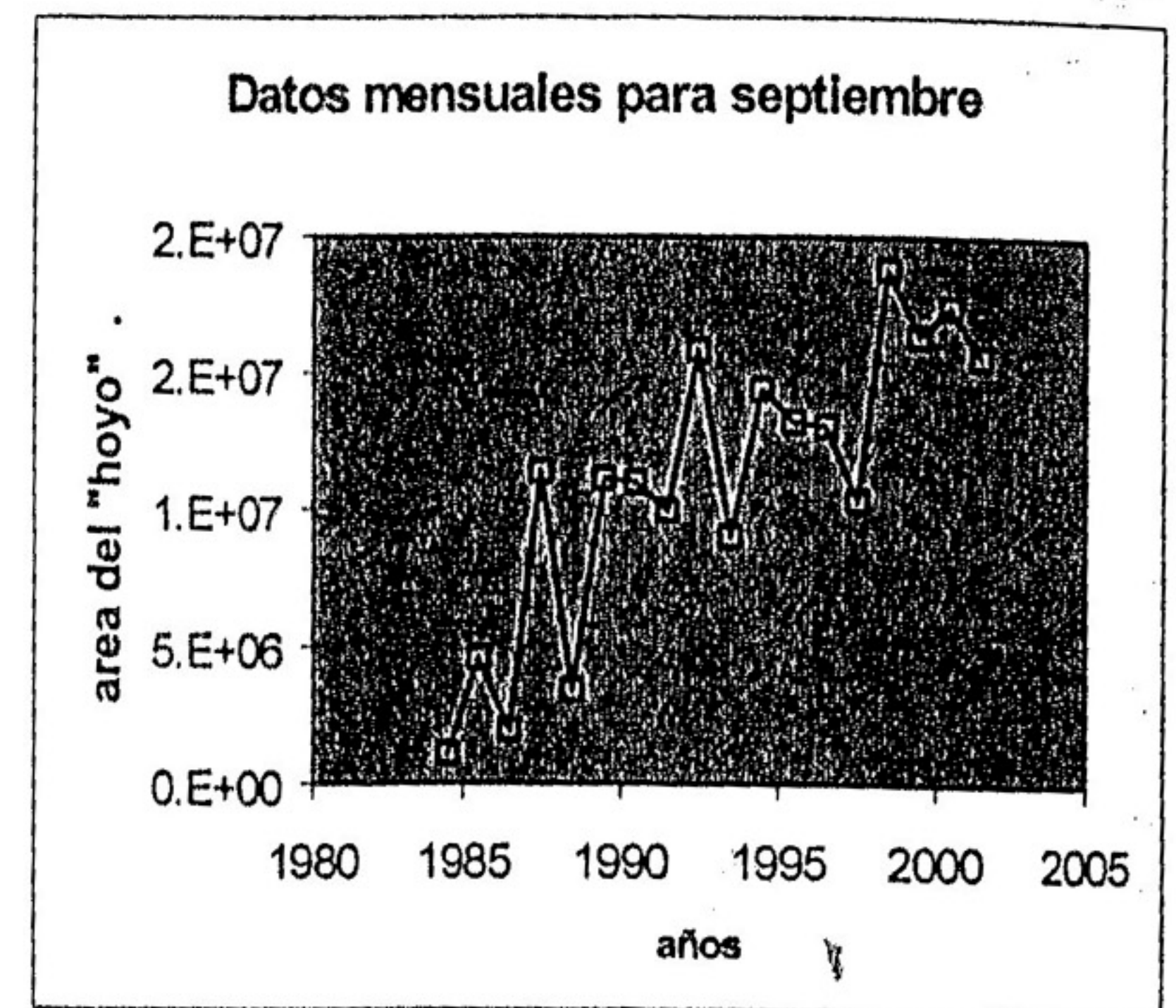


Figura 4. Area del Hoyo de ozono ( $\text{K}^2\text{m}^2$ ) con base en los datos de promedios mensuales del mes de septiembre (12). Los datos para el 2000 y el 2001 son datos aproximados tomados de los reportes gráficos reportados en (12) y los datos para 1993-1995 se tomaron de las gráficas reportadas en (19).

orden de los 100V/m) hasta unos 260 V/m, que es aproximadamente el doble del valor normal esperado al nivel de la superficie terrestre (17).

Un aumento del campo eléctrico global de esta magnitud implica que la corriente global a nivel estratosfera puede también duplicarse, suponiendo que la conductividad se mantiene aproximadamente igual ya que por la ley de Ohm:

$$J = \sigma E, \quad (1)$$

Donde  $J$  es la densidad de corriente eléctrica vertical,  $E$  es el campo eléctrico y  $\sigma$  es la conductividad atmosférica. Sin embargo los experimentos han mostrado que no siempre existe un aumento de la corriente asociado a los eventos aurales ya que en ocasiones  $J$  permanece igual, de ahí se infiere que en algunos eventos  $\sigma$  es la que se modifica. Véase por ejemplo



Olson 1976 (18). Dentro del contexto del presente trabajo lo relevante es que en algunos casos  $J$  si se incrementa del orden del doble de su valor, por lo que  $\sigma$  ha de permanecer casi constante. En tales casos suponiendo  $\sigma$  constante, el aumento esperado en la corriente eléctrica a nivel estratosfera puede llegar al doble del valor normal aproximadamente. Un aumento en la densidad de corriente  $J$  implica un aumento en el número de cargas que se mueven o un aumento en la velocidad de ellas.

$$J = \sum_i N_i q_i v_i \quad (2)$$

Donde  $i$  es cada uno de los tipos de portadores de carga;  $N_i$  es el número de portadores por unidad de volumen del tipo  $i$ ;  $q_i$  es la carga de cada tipo de portador; y  $v_i$  es la velocidad de desplazamiento promedio para el portador de la carga tipo  $i$ .

Así que, en las ocasiones donde la densidad de cargas no se modifica en la estratosfera como consecuencia de un cambio en la actividad geomagnética ( $\sigma$  constante), la velocidad de las cargas estaría aumentando al doble y su energía cinética aumentaría 4 veces, así que las cargas que circulan tienen mayor oportunidad de disociar ozono y oxígeno en sus colisiones con el medio circundante, y por consecuencia, de

intervenir en los procesos de creación y destrucción del ozono estratosférico.

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

De acuerdo al presente modelo de interacción se esperaba encontrar una relación entre la actividad auroral y la erosión del ozono estratosférico ya que un aumento en la corriente a nivel estratosfera implica un mayor número de colisiones de iones y electrones que pueden llegar a disociar el ozono y oxígeno circundantes, afectando el balance en los procesos fotoquímicos de creación y destrucción del ozono (esto ocurre aun en ausencia de luz solar!). Además, las auroras también emiten radiación en el UV, y a ésta radiación hay que sumarle el efecto de los vientos ascendentes que se provocan a causa del calentamiento de la atmósfera neutra, justo debajo de las auroras, lo que pudiera favorecer que las PSC (Polar Stratospheric Clouds) alcancen mayores alturas (debajo de la aurora) y participen en el proceso de erosión del ozono al llegar la iluminación solar a la zona. Por lo anterior se espera que aun durante las épocas oscuras (no iluminadas) del invierno en el área antártica se produzca una erosión de ozono en las épocas de gran

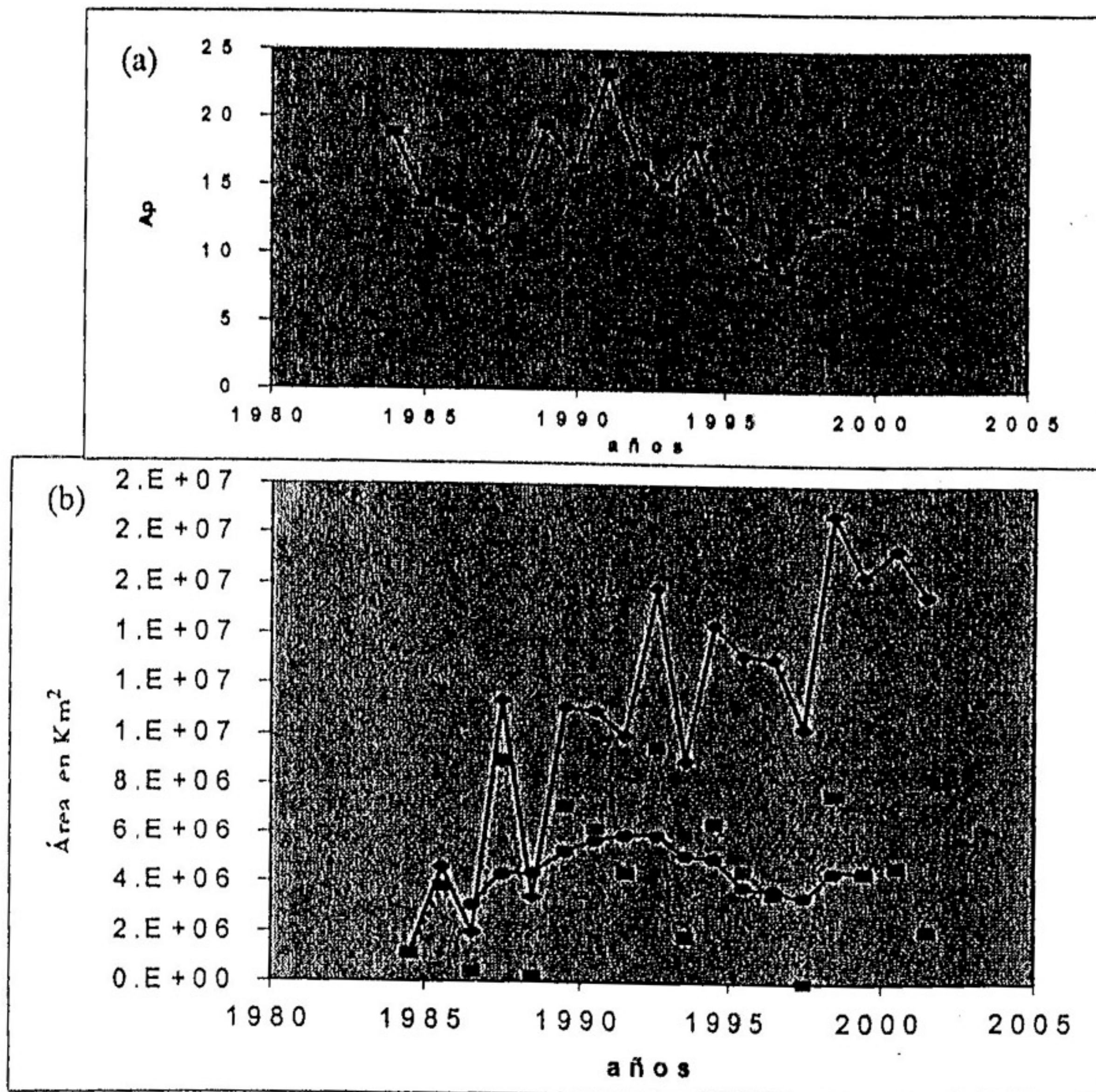


Figura 5. En la parte superior (a) se muestran los índices anuales de actividad geomagnética  $A_p$  y en la parte inferior (b) se tienen las curvas del área del "hoyo" de ozono. Su valor total con línea continua, en línea punteada la parte cíclica así como un suavizamiento a estos datos.



actividad auroral.

En principio parece sencillo comprobar esta hipótesis sin embargo los satélites que monitorean el ozono total lo hacen aprovechando la iluminación solar y por tanto no toman datos bajo condiciones de oscuridad.

Sin embargo es de esperarse que durante los primeros días de iluminación (el primer mes por ejemplo) el efecto de la actividad auroral debe ser aun perceptible, antes de que la química y la dinámica atmosférica sea completamente dominada por la iluminación solar.

Buscando esta posible conexión se analizaron las áreas del "hoyo de ozono" antártico con base en los promedios mensuales para Septiembre desde 1979 al 2000 (primer mes completo con datos de ozono en la región Antártica) con base en los datos reportados en Internet (12) y (19). El comportamiento del tamaño de "hoyo de Ozono" se ilustra en la fig. 4. Aquí se aprecian dos patrones (al menos), uno con tendencia monótona creciente, consistente con lo que se espera a causa de la contaminación antropogénica (20) y un patrón cíclico (oscilante) que tiene una periodicidad semejante a la del ciclo de actividad auroral de 11 años.

Cuando se le compara este patrón cíclico con la gráfica de los índices de actividad geomagnética Ap (que son un parámetro de la actividad en el óvalo auroral) se encuentra que tienen comportamientos cualitativamente semejantes (véase fig. 5); la relación no es lineal puesto que no todos los eventos aurorales afectan de la misma forma a la estratosfera y los mecanismos de interacción aurora-estratosfera son por lo menos tres diferentes.

La variación cíclica esperada (en el área del "hoyo de ozono") tiene una contribución que varía en importancia puesto que la talla del "hoyo" es cada vez mayor. De acuerdo a la curva suavizada de la componente cíclica, antes de 1991 la contribución esperada al tamaño del "hoyo" era del mismo orden o mayor que la esperada por la tendencia lineal creciente atribuida a los contaminantes de tipo antropogénico. Después de 1991 la tendencia lineal es mayor. Ya para el año de 1999 la contribución esperada por la componente cíclica es de apenas un 30% aproximadamente, que sigue siendo significativa, durante el mes de septiembre.

Por consecuencia podemos decir que, dada la magnitud de su efecto la actividad auroral es un factor natural más a tomar en cuenta dentro de las causas de variación a largo plazo. Probablemente por los "relativamente" pocos años de información las causas asociadas a este tipo de actividad pasaron desapercibidas, dado que la aparición del "hoyo" se hizo patente hasta la década de los 1980's cuando los efectos de los contaminantes antropogénicos se manifestaron de manera más contundente; aunque quizá sólo sea ausencia de datos, y efectivamente se haya tenido un "hoyo de ozono" anteriormente o simplemente una erosión de tipo cíclico, (que no llegó a considerarse "hoyo") como consecuencia de las variaciones de tipo natural.

Sin embargo parece claro que en el presente existe un proceso dominante que está haciendo que el "hoyo" tenga un tamaño cada vez mayor de manera consistente y el candidato natural que se ha identificado es la contaminación antropogénica.

#### 4. CONCLUSIONES

Este modelo predice que aun bajo condiciones de oscuridad (sin iluminación solar) en el invierno antártico también se tendría erosión del ozono estratosférico y es posible que se forme un "hoyo (o depresión) de ozono" de carácter cíclico como consecuencia de un periodo de gran actividad auroral. Esta predicción se podría confirmar con observaciones que utilicen otro método distinto al TOMS que usan los satélites considerados en este trabajo (12).

#### 5. REFERENCIAS

- 1) Stolarski, R. S. et al. (1991) Total ozone trends deduced from Nimbus 7 TOMS data, *Geophys. Res. Lett.*, 18, 1015-1018.
- 2) Bojkov, R. D. et al (1990) A statistical trend analysis of revised Dobson total ozone data over the northern hemisphere. *J. Geophys. Res.*, 95, 9785-9807.
- 3) World Meteorological Organization (WMO) (1995) Scientific assessment of ozone depletion: 1994, Rep. 37, Global Ozone Res. And Monit. Proj., Geneva.
- 4) García R. R. et al. (1984) A numerical response of the middle atmosphere to the 11-year solar cycle. *Planet. Space. Sci.*, 32, 411-423.
- 5) Fleming, E. L., et al (1995) The middle atmosphere response to short and long term solar UV variations. Analysis of observations and 2D model results. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 57, 333-365.
- 6) Solomon, S. R., et al. (1996) The role of aerosol variations in anthropogenic ozone depletion at northern midlatitudes. *J. Geophys. Res.*, 101, 6713-6727.
- 7) Schneider, H. R. et al (1991) Interannual variations of ozone: Interpretation of 4 years of satellite observations of total ozone. *J. Geophys. Res.*, 96, 2889-2896.
- 8) Jackman, C. H., et al. (1995) Two-dimensional and three-dimensional model simulations, measurements, and interpretation of the influence of October 1989 solar proton events on the middle atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 100, 11641-11660.
- 9) Shumilov, O. I., et al. (1992). Arctic ozone abundance and solar proton events, *Geophys. Res., Lett.*, 19, 16, 1647-1650.
- 10) Legrand, M. R., et al (1989) A model study of the stratospheric budget of odd nitrogen, including effects of solar cycle variations. *Tellus., Ser. B.* 41, 413-426.
- 11) Callis et al. (1991) Ozone depletion in the high latitude lower stratosphere: 1979-1990, *J. Geophys. Res.*, 96, 2921-2937.
- 12) <http://jwocky.gsfc.nasa.gov/> . Total ozone Mapping Spectrometer. Code 916 Atmospheric Chemistry and Dynamics Branch. Acesado durante agosto-noviembre 2001.



- 13) <http://www.sel.noaa.gov/tiger/index.html>, Relative Intensities of NOAA POES Energetic Particles Satellite. Currently providing data: NOAA-15. Acesado durante el periodo agosto-noviembre 2001.
- 14) Jones, Alister Vallance (1974) Aurora. D. Reidel Publishing Company. Dordrecht-Holland/Boston-USA.
- 15) Michnowski, S. (1998). Solar wind influences on atmospheric electricity variables in polar regions. *J Geophys. Res.*, 103, D12, 13939-13948.
- 16) Burns et al (1995). The geoelectric field at Davis station, Antarctica. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 57, 1783-1797, 1995.
- 17) Rycroft M. J. et al (2000). The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 62, 1563-1576.
- 18) Olson D.E., (1971). The Evidence for Auroral Effects on Atmospheric Electricity., *Pageoph.*, 84, 118-138.
- 19) [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/sbuy2to/ozone\\_hole.html](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/sbuy2to/ozone_hole.html) . National Weather Service, Climate Prediction Center. Acesado durante agosto-noviembre 2001.
- 20) Jackman, C. H., et al (1996). Past, present, and future modeled ozone trends with comparisons to observed trends. *J. Geophys Res.* 101, D22, 28753-28767.