

LAS ANOMALIAS NOCTURNAS DE FASE EN MBF Y EL OXIGENO ATOMICO
EN LA MESOSFERA - Parte I: Datos Experimentales

Olga I. Pintado y Rodolfo G. Ezquer
Laboratorio de Ionósfera - Instituto de Física
Universidad Nacional de Tucumán
Sandro M. Radicella y Valdis Restbergs
Centro Argentino de Estudios de Radiocomunicaciones y
Compatibilidad Electromagnética, Buenos Aires

RESUMEN

Se han analizado los registros de muy baja frecuencia (MBF) recibidos en Tucumán entre 1973 y 1976, buscando anomalías nocturnas de fase (ANF) del tipo observado por Chilton y Radicella en el mismo circuito transecuatorial en 1963-1964, encontrándose un total de 8 noches que presentan dichas anomalías de manera bien definida. Utilizando la teoría de guía de ondas de Wait y el modelo de concentración electrónica obtenido por dos de los autores (R. y R.) se ha calculado la evolución de la altura de la guía de ondas durante las anomalías como así también los cambios de gradiente de conductividad en la región de reflexión. Los resultados muestran que la base de la capa D nocturna ha descendido hasta 12 Km durante la anomalía más pronunciada.

ABSTRACT

Tucumán VLF records for the 1973-1976 period have been analyzed, looking for nighttime phase anomalies (NPA) of the type observed by Chilton and Radicella for the same transequatorial propagation path in 1963-1964. Eight NPA have been found. The height and conductivity gradient variations of the waveguide during the NPA have been computed, using the Wait's waveguide theory and the electron concentration model obtained by two of the authors (R. and R.). The results show that the base of the D region has descended up to 12 Km during the largest anomaly.

INTRODUCCION

La fase y la amplitud de una onda de muy baja frecuencia (MBF) que se propaga en la guía de ondas Tierra-ionósfera permanece constante, si la altura y la concentración electrónica de la misma no varían. Este comportamiento es observado durante el día y durante la noche en los registros obtenidos en Tucumán (Argentina) de la señal de 24 KHz emitida por NBA (Balboa, Panamá).

Chilton y Radicella (1965) observaron fuertes anomalías nocturnas de fase (ANF), como las que se muestran en la figura 1, acompañadas por variaciones en la amplitud.

En el presente trabajo se estudia el comportamiento de las ANF observadas en Tucumán en el período 1973-1976, descartando posibles efectos de propagación y analizando las variaciones de la guía de ondas que pueden causar las mismas.

DESARROLLO TEORICO

Del análisis de los registros que no muestran las variaciones periódicas de fase y amplitud debidas a la interferencia entre los modos de propagación que se presentan durante la noche, es posible descartar que las ANF sean atribuibles a problemas de propagación.

Como consecuencia de lo anterior las variaciones observadas deben ser consideradas como cambios reales de la densidad electrónica en la ionósfera inferior que originan alteraciones de la guía de ondas Tierra-ionósfera.

Para una onda de MBF que se propaga en la guía de ondas sobre una distancia mayor que 500 Km, el campo eléctrico en el receptor puede ser escrito de la siguiente manera (Wait, 1962):

$$E = A \exp(j\phi) \quad (1)$$

donde A es la intensidad de campo y ϕ la fase de la onda recibida, que dependen de las propiedades eléctricas de las paredes de la guía de ondas, de su altura, de la velocidad de fase y de la razón de atenuación.

Wait y Spies (1964) discutieron esta dependencia para algunos modelos sencillos. En este trabajo se usará el modelo exponencial, en el cual la densidad electrónica N y la frecuencia de colisión v varían exponencialmente con la altura h.

Se define el parámetro de conductividad

$$\omega_r = \omega_0^2 / v \quad (2)$$

donde: $\omega_0^2 = Ne^2 / m\epsilon_0$ es la frecuencia angular del plasma
 e la carga del electrón
 m la masa del electrón
 ϵ_0 la permitividad del vacío

que también puede ser expresado de la forma:

$$\omega_r = \omega_{ro} \exp\{\beta(h-h_0)\} \quad (3)$$

donde: $\omega_{ro} = 2,5 \cdot 10^5 \text{ seg}^{-1}$

h_0 altura de la guía de ondas

β gradiente de conductividad

h_{ro} determina la altura de reflexión.

Durante los eventos analizados h_0 y β varían en cantidades Δh_0 y $\Delta\beta$ produciendo cambios en la fase y la amplitud de la onda registrada.

Estos cambios de fase y amplitud pueden escribirse en función de la variación de β y h_0 de la siguiente manera:

$$\Delta\phi = \phi(\beta', h_0') - \phi(\beta, h_0) = \frac{\delta\phi}{\delta\beta} \Delta\beta + \frac{\delta\phi}{\delta h_0} \Delta h_0 \quad (4)$$

$$\Delta A = A(\beta', h_0') - A(\beta, h_0) = \frac{\delta A}{\delta\beta} \Delta\beta + \frac{\delta A}{\delta h_0} \Delta h_0 \quad (5)$$

$\Delta\phi$ y ΔA son las variaciones de fase y amplitud obtenidas de los registros de MBF.

Con esto se puede escribir:

$$\Delta h_0 = (\Delta A \frac{\delta\phi}{\delta\beta} - \Delta\phi \frac{\delta A}{\delta\beta}) (\frac{\delta A}{\delta h_0} \frac{\delta\phi}{\delta\beta} - \frac{\delta A}{\delta\beta} \frac{\delta\phi}{\delta h_0})^{-1} \quad (6)$$

$$\Delta\beta = (\Delta A \frac{\delta\phi}{\delta h_0} - \Delta\phi \frac{\delta A}{\delta h_0}) (\frac{\delta A}{\delta\beta} \frac{\delta\phi}{\delta h_0} - \frac{\delta A}{\delta h_0} \frac{\delta\phi}{\delta\beta})^{-1} \quad (7)$$

Para determinar las derivadas parciales que aparecen en las ecuaciones (6) y (7) se debe conocer la variación de la velocidad de fase y de la razón de atenuación de la onda con la altura de la guía de ondas (h_0) y el gradiente de conductividad (β) y conocer los valores de h_0 y β para la altura de reflexión.

Del modelo de densidad electrónica nocturna obtenidos por Radicella y Restbergs (1980) se calcula que la altura de la guía de ondas es de 81 Km y que el gradiente de conductividad es de $0,87 \text{ Km}^{-1}$

en condiciones normales.

Como el camino de propagación está en dirección norte-sur y su longitud es mucho mayor que la altura de la guía de ondas, el coseno del ángulo de incidencia se puede escribir (Wait, 1962):

$$C_n^2 = \frac{(12n-5) \frac{\pi}{6} - \left(\frac{2ka}{3}\right) \left(\frac{2h_0}{a}\right)^{3/2} - j\alpha_0 \left(\frac{2h_0}{a}\right)^{1/2}}{ka \left(\frac{2h_0}{a}\right)^{1/2} + j\alpha_0 \left(\frac{2h_0}{a}\right)^{-1/2}} \quad (8)$$

donde: n es el número de modo

k el número de onda

a el radio de la Tierra

h_0 la altura de la guía de ondas

α_0 un coeficiente que se obtiene a partir del coeficiente de reflexión

Con esto se puede calcular la velocidad de fase y la razón de atenuación a partir de las siguientes ecuaciones (Wait, 1962):

$$\frac{v}{c} - 1 = \frac{1}{\text{Re}S_n} - 1 \quad (9)$$

$$\text{Atenuación en dB por 1000 Km recorridos} = -\text{Im}(S_n) \frac{2\pi}{\lambda} 8,68 \cdot 10^3 \quad (10)$$

donde $S_n^2 = (1 - C_n^2)$, y λ está expresado en Km.

Usando las ecuaciones (8), (9) y (10) y los valores de α_0 calculados por Wait y Walters (1963) se obtienen los siguientes valores para las derivadas parciales:

$$\frac{\delta\phi}{\delta h_0} = -2,70 \cdot 10^{-1} \text{Km}^{-1} \quad \frac{\delta E}{\delta h_0} = 23,6 \text{ dB/Km}$$

$$\frac{\delta\phi}{\delta B} = 2,50 \cdot 10^{-1} \text{Km} \quad \frac{\delta E}{\delta B} = 8,20 \cdot 10^2 \text{ dB.Km}$$

DISCUSION

Se analizaron los registros obtenidos entre el 27/8/73 y el 4/11/76 obteniéndose 8 eventos de ANF.

Usando las ecuaciones (6) y (7) se calculan las variaciones de altura de reflexión (Δh_0) y el gradiente de conductividad (ΔE) con intervalos de 5 minutos, desde que comienza hasta que termina el evento. Estos resultados se muestran en la figura 2.

En la ANF del 11/10/73 (Figura 2a) se observa que a las 0300

TU comienza a producirse una disminución de la altura de la gufa de ondas y simultaneamente un incremento en el gradiente de conductividad. Estos parámetros alcanzan su máxima variación hacia las 0435 TU ($\Delta h_0 = -6,92$ Km y $\Delta \beta = 0,17$ Km⁻¹), manteniéndose un valor alto por intervalo de 1 hora aproximadamente. A las 0500 TU comienza a recuperarse y a las 0610 TU ambos parámetros han alcanzado su valor normal. Durante la aparición de esta ANF el índice magnético Kp toma un valor máximo de 2, el Dst no supera los 10γ y AE alcanza un valor máximo de 239γ, por lo que se puede considerar que es un día magnéticamente tranquilo.

El 16/10/73 (Figura 2b) la ANF comienza a las 0420 TU y tiene una duración aproximada de 3 horas. En este caso el comportamiento de los parámetros analizados es similar al del caso anterior, incluso en los valores máximos alcanzados ($\Delta h_0 = -5,35$ Km y $\Delta \beta = 0,15$ Km⁻¹). El índice Dst es mayor que en el evento analizado anteriormente. Hacia el final de la anomalía se produce el SC de una tormenta geomagnética, y simultaneamente hay un incremento en el índice AE que alcanza un valor de 557γ a las 0700 TU. Estas perturbaciones magnéticas no parecen alterar el desarrollo de la ANF.

El 20/10/73 (Figura 2c), la ANF comienza a manifestarse hacia las 0200 TU y tiene una duración de 1 hora 30 minutos. En este caso las variaciones Δh_0 y $\Delta \beta$ son más bruscas que en los casos analizados anteriormente. Un análisis de los índices magnéticos indica que no hay perturbaciones (Máximas variaciones: $\Delta h_0 = -5,21$ Km y $\Delta \beta = 0,15$ Km⁻¹).

La ANF que se presenta el 25/10/73 (Figura 2d) comienza a las 0140 TU y finaliza a las 0640 TU. En este caso tanto Δh_0 como $\Delta \beta$ tienen una variación lenta hasta alcanzar un máximo a las 0400 TU ($\Delta h_0 = -8,81$ Km y $\Delta \beta = 0,25$ Km⁻¹) y desde allí hay una recuperación lenta hasta que alcanza nuevamente los valores normales. Un estudio de los índices magnéticos Kp, Dst y AE pone de manifiesto que este es el día más tranquilo de todos los analizados.

El día 29/10/73 (Figura 2e) es el día más perturbado con un índice Kp=6 al comienzo de la anomalía, Dst también alto y un índice AE que en todo momento es mayor que 400γ alcanzando a veces valores de 700γ. Esta ANF comienza a las 0240 TU y finaliza a las 0800 TU. El comportamiento de las variaciones de altura y de gradiente de conductividad es similar al del caso anterior, pero ahora los valores máximos alcanzados son $\Delta h_0 = -12,75$ Km y $\Delta \beta = 0,37$ Km⁻¹. Este evento es el de más larga duración (5 horas 20 minutos).

El 9/11/73 (Figura 2f) durante la ANF, los parámetros analizados presentan un comportamiento muy irregular y sus valores máximos son grandes, $\Delta h_0 = -9,51$ Km y $\Delta B = 0,26$ Km⁻¹, además es un evento de larga duración (aproximadamente 4 horas), sin embargo este es un día magnéticamente tranquilo.

El 21/11/73 (Figura 2g) se observa que los valores del índice magnético Dst son altos, mientras que Kp tiene un máximo de 3. La anomalía comienza a las 0030 TU y termina a las 0400 TU. Δh_0 y ΔB tienen comportamientos irregulares, presentando máximos bien marcados, con valores extremos $\Delta h_0 = -7,10$ Km y $\Delta B = 0,20$ Km⁻¹ a las 0215 TU.

El 8/1/74 (Figura 2h) se observa la anomalía de más corta duración (50 minutos). Presenta variaciones bruscas de los parámetros analizados, y a diferencia de la otra anomalía de corta duración observada el 20/10/73 (Figura 2c), presenta un máximo bien marcado a las 0305 TU donde $\Delta h_0 = -8,57$ Km y $\Delta B = 0,15$ Km⁻¹. Este día es magnéticamente tranquilo aunque se observa un crecimiento del índice Dst.

La tabla I resume las características de las ANF analizadas.

CONCLUSIONES

1.-Se descarta la posibilidad de que las ANF sean un problema de propagación.

2.-Por los resultados presentados, se puede decir que las ANF no tienen una dependencia directa con las variaciones de la actividad geomagnética, ya que se observan comportamientos similares de Δh_0 y ΔB en días magnéticamente diferentes, tal es el caso a las anomalías del 11/10/73 y 16/10/73 (Figura 2a y 2b) y del 25/10/73 y 29/10/73 (Figuras 2e y 2f).

3.-Dado que las perturbaciones geomagnéticas no pueden explicar las ANF y su causa no puede ser, en forma directa, la variación de la radiación solar, se intenta una interpretación aeronómica vinculada con la distribución de componentes menores en la mesósfera (Ver parte II).

BIBLIOGRAFIA

- Burges, B. y Jones, T.B., 1967: Solar flares effects and VLF radiowaves observations of the lower ionosphere; *Radio Science*, 2, 619-626.
- Chilton, J.C. y Radicella, S.M., 1965: Differences between transequatorial and middle latitude VLF propagation; *Proc. on the 2° International Symposium on Equatorial Aeronomy, Brazil*, 33-39.
- Radicella, S.M. y Restbergs, V., 1980: Oxygen allotropes concentrations and electron density profiles in the nighttime D region; aceptado para su publicación en el *J. Atmos. Terr. Phys.*
- Wait, J.R., 1962: *Electromagnetic waves in stratified media*; Pergamon Press, Nueva York.
- Wait, J.R., 1963: Influence of the lower ionosphere on propagation of VLF waves to great distances; *J. of Res. of the NBS*, 67, 375-381.
- Wait, J.R., 1978: Concise theory of radio transmission in the earth-ionosphere waveguide; *Reviews of Geophys. and Space Phys.*, 16, 320-326.
- Wait, J.R. y Spies, K.P., 1964: Characteristics of the earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves; *NBS Technical Note N°300*.
- Wait, J.R. y Walters, L.C., 1963: Reflection of VLF radio waves from an inhomogeneous ionosphere. Part I; Exponential varying isotropic model; *J. of Res. of the NBS*, 67, 361-367.

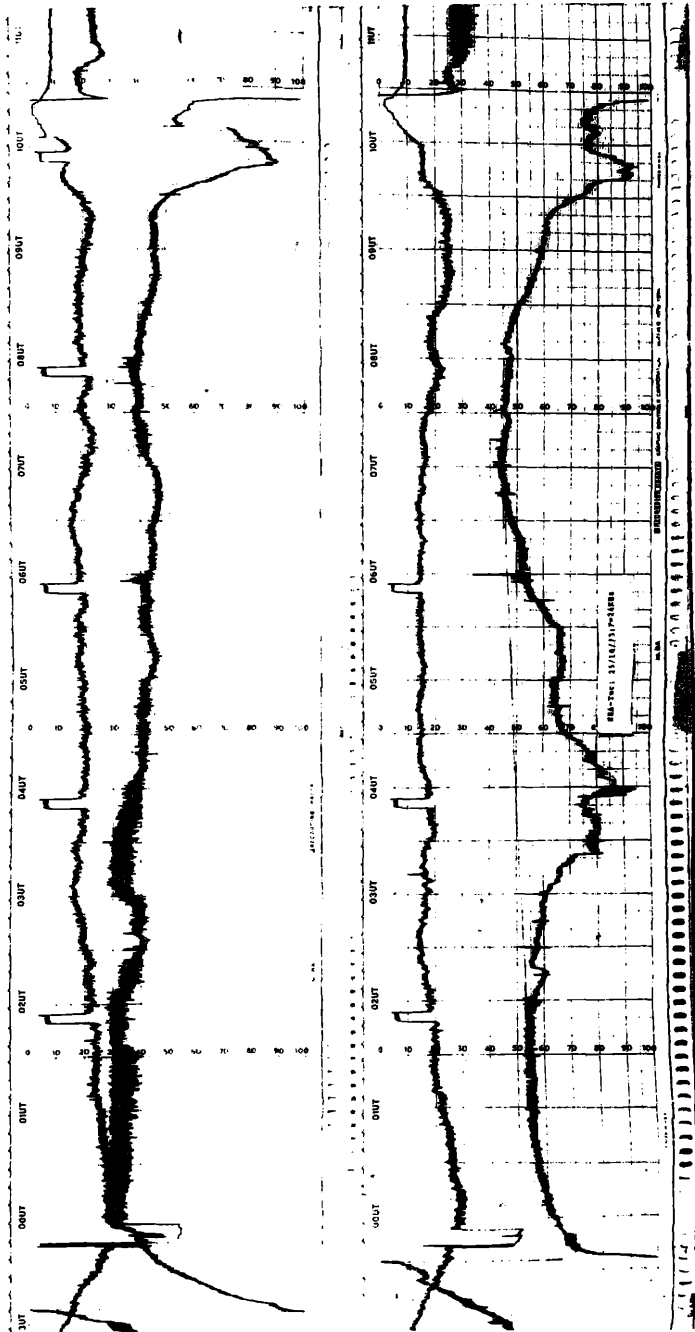


Figura 1: Registros de fase y amplitud para una noche normal (24/10/73) y una noche donde aparece la ANF (25/10/73)

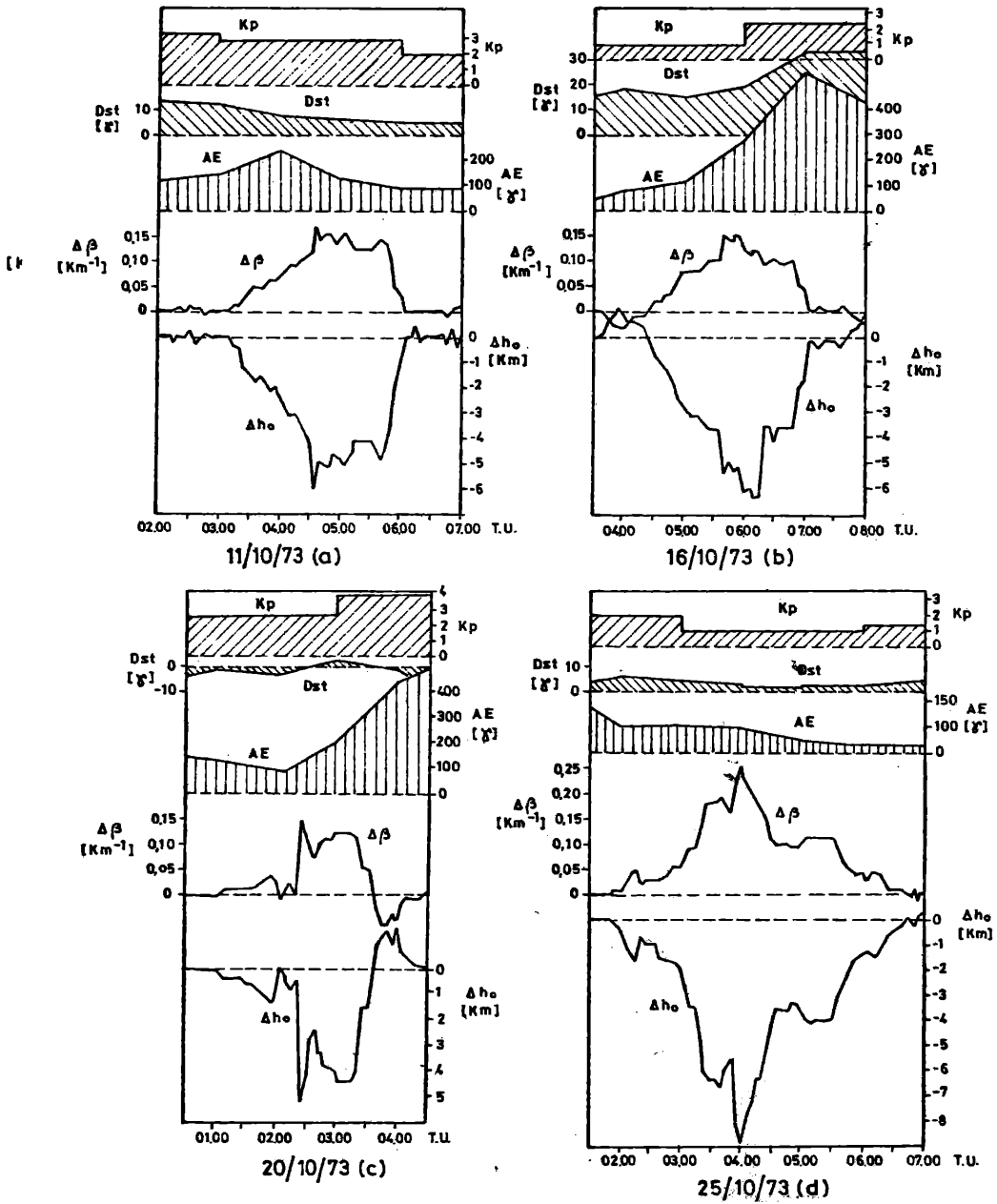


Figura 2: Variación de altura de la guía de ondas y del gradiente de conductividad durante las ANF

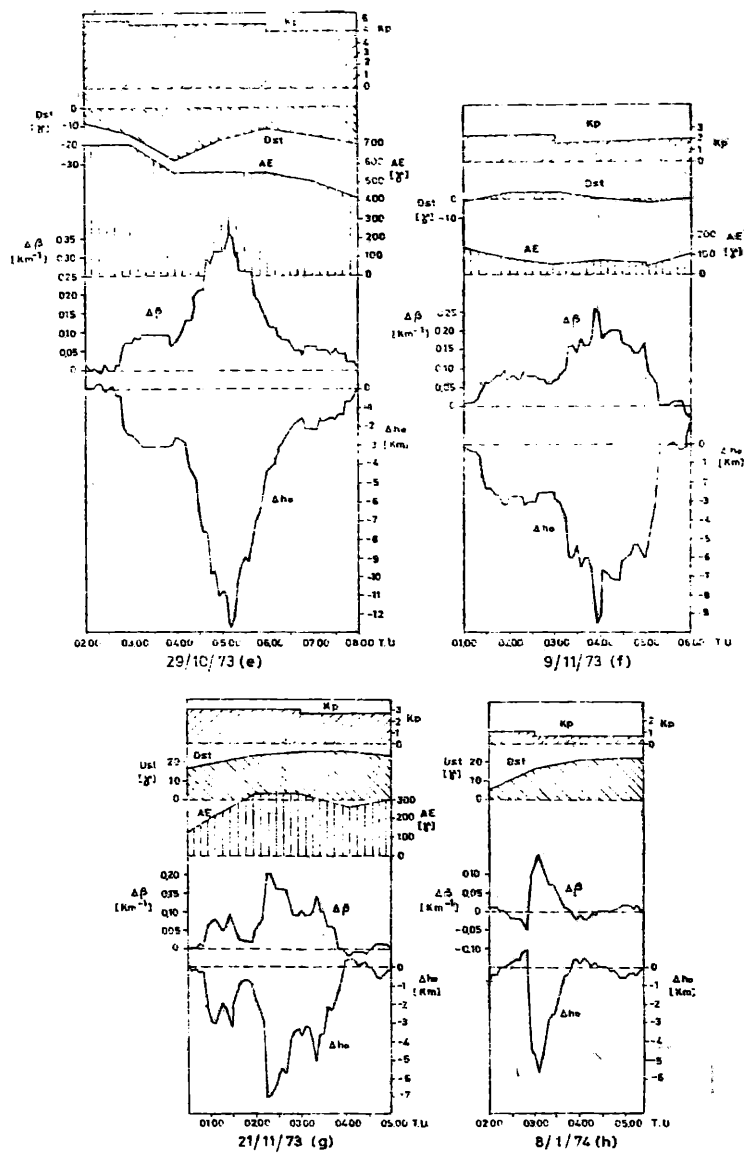


Figura 2: Variación de altura de la guía de ondas y del gradiente de conductividad durante las ANF

Tabla I
Características de las ANF observadas en el circuito NBA-Tucumán

| Fecha | Hora máx. variación de altura | Duración apro. (hs) | Δh_0 máx. (Km) | $\Delta \beta$ máx. (Km ⁻¹) | Indices geomagnéticos | | |
|----------|-------------------------------|---------------------|------------------------|---|-----------------------|----------------|-----|
| | | | | | Dst(γ) | Kp | |
| 11/10/73 | 0435 | 3.10 | -6,02 | 0,17 | 6 | 3 | 239 |
| 16/10/73 | 0550 | 3.00 | -5,35 | 0,15 | 19 | 2 ⁺ | 279 |
| 20/10/73 | 0225 | 1.30 | -5,21 | 0,15 | -3 | 3 ⁻ | 209 |
| 25/10/73 | 0400 | 5.00 | -8,81 | 0,25 | 2 | 1 | 101 |
| 29/10/73 | 0510 | 5.20 | -12,75 | 0,37 | -18 | 6 ⁻ | 555 |
| 9/11/73 | 0355 | 4.00 | -9,51 | 0,26 | 0 | 2 | 71 |
| 21/11/73 | 0215 | 3:30 | -7,10 | 0,20 | 23 | 3 | 315 |
| 8/1/74. | 0305 | 0.50 | -5,57 | 0,15 | 16 | 1 | - |

