

Análise de Alguns Parâmetros Ionosféricos na Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul Mediante Ondas "VLF"*

ALFREDO HERBERT CARDOSO

Departamento de Física do Setor de Ciências Exatas – Universidade Federal do Paraná, C.P. 1862 – Curitiba, Paraná

Recebido em 17 de Maio de 1981

We have characterised a smaller diurnal variation of the height of the ionospheric "D" sheet which is associated with the South Atlantic Geomagnetic Anomaly (SAGA), using VLF waves. The result was achieved with a privileged trajectory by using the diurnal phase variation. The simultaneous use of the experimental data of the diurnal variation of the amplitude and Wait's theory¹ with usually accepted parametrized values, gives however results which are physically inconsistent.

Conseguimos caracterizar uma menor variação diurna da altura da camada ionosférica "D", associada à Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul (SAGA), usando ondas "VLF". O resultado foi obtido com o uso da variação diurna da fase, em trajetória privilegiada. O uso conjunto dos valores experimentais da variação diurna da amplitude e a teoria de Wait¹ com valores paramétricos geralmente aceitos, levou entretanto a resultados fisicamente inconsistentes.

(*) Este artigo reforça estatisticamente uma das conclusões da tese de mestrado do autor "Alguns efeitos de propagação de ondas "VLF" nas proximidades da Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul", apresentada ao Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie em 30 de maio de 1979.

1. INTRODUÇÃO

A Anomalia Geomagnética do Atlântico SUL (SAGA) caracteriza-se por uma baixa intensidade de campo magnético terrestre. O centro da SAGA situa-se aproximadamente a $25^{\circ}S$ e $48^{\circ}W$, próximo à costa brasileira no Estado de Santa Catarina (Fig.1).

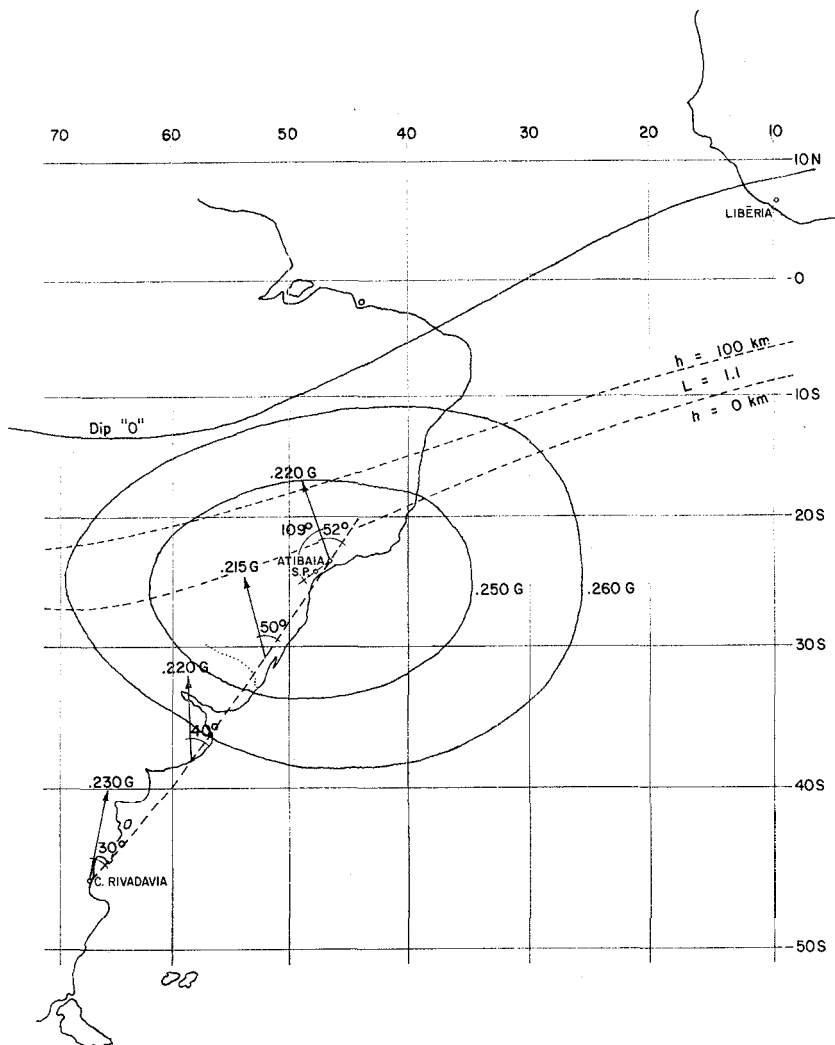


Fig. 1 - (---) Trajetória Comodoro Rivadavia-Atibaia. (→) Direção e intensidade da componente horizontal do vetor indução magnética. (—) Localização da região central da SAGA e Equador magnético real. (----) Linhas iso-L, para $L=1,1$, na altura de 0 km e 100 km.

A intensidade do campo magnético a 100 km de altura atinge apenas valores da ordem de 0,25 G, nas proximidades do centro da SAGA². Tal intensidade de campo magnético permite que as reflexões magnéticas de partículas, presas no campo magnético terrestre, ocorram em alturas bem menores do que as correspondentes no hemisfério norte ou mesmo em outras regiões do globo.

Considerando que os elétrons apresentam um movimento de deriva para Leste, estes devem precipitar-se na SAGA em seu contorno Oeste e Sul, onde a baixa altitude que atingem, aumenta a probabilidade de colisões com os constituintes da atmosfera, gerando localmente uma fonte adicional de ionização.

A eficiência da SAGA em remover elétrons ligados ao campo magnético terrestre foi demonstrada por Williams e Kohl³, citado por Zmuda⁴.

Williams e Kohl mediram um fluxo de $6 \cdot 10^5$ elétrons/(s cm² sr) em 282° E, contra um fluxo de 10^3 elétrons/(s cm² sr) em 0° E, para elétrons com energias superiores a 280 keV, $L = 2,2$ e $0,30 < B < 0,31$, onde L e B constituem as coordenadas de Macilwain.

Vários trabalhos se referem à existência de precipitação de elétrons na SAGA: Gledhill⁵, Torr *et al.*⁶, Zmuda⁴, Abdu *et al.*⁷, Mendes *et al.*⁸ e Gough⁹.

A propagação de ondas "VLF" (Very Low Frequency) no guia de ondas esférico, definido por duas superfícies esféricas concêntricas; uma a superfície terrestre e a outra a ionosfera inferior (camada D) foi tratada por vários autores, entre os quais Wait¹ (*). A teoria da propagação modal proposta por Wait¹ e seus resultados são considerados suficientemente conhecidos e serão usados no presente trabalho para análises e comparações.

(*) Veja-se também Wait^{10,11} e Wait e Spies¹².

2. CONDIÇÕES GERAIS DE MEDIDA E RESULTADOS

2.1. Geografia e condições de operação

A estação transmissora dos sinais de "VLF" no sistema Omega, opera nas frequências de 10,2 kHz e 13,6 kHz, estando situada na cidade de Comodoro Rivadavia-Argentina, com coordenadas 46°S e 67°W .

O receptor situa-se no Rádio Observatório de Itapetininga, Atibaia - São Paulo, Brasil, com coordenadas $23^{\circ}11'\text{S}$ e $43^{\circ}33'\text{W}$. A trajetória perfaz 3,2 Mm.

A figura (1) nos mostra a trajetória ortodrômica dos sinais de VLF, a direção e intensidade da componente horizontal do campo magnético terrestre ao longo da trajetória, a linha do equador magnético real e a linha iso-L para $L=1,1$ a 100 km de altura e na superfície terrestre. A SAGA está assinalada pelas iso-linhas de indução magnética $B=0,25\text{ G}$ e $B=0,26\text{ G}$, para a altura de 100 km.

A trajetória do sinal passa pelo centro da SAGA, em cujos bosons Oeste e Sul acredita-se encontrar uma anomalia ionosférica a ela associada. Ao longo da trajetória, a coordenada L varia entre 1,50 em Comodoro Rivadavia e 1,15 em Atibaia.

Para todos os fins práticos, adotaremos para a condutividade terrestre um valor infinito.

O receptor usado é um modelo comercial Tracor 599G, que permite registrar variações de amplitude numa faixa de 40 dB e variações de fase em relação a um padrão de Césio. Isto permite obter registros de fase com precisão de $1\ \mu\text{s}/\text{dia}$. O registro de amplitude tem precisão menor e, por não ser linear, exige calibrações semanais.

Na redução de dados, foram tomados em consideração e corrigidos os efeitos da atividade solar e geomagnética.

Em março de 1976 o Sol esteve particularmente ativo, tendo esta atividade se estendido, já em menor escala, até junho¹³.

Adotaremos para a camada D da ionosfera o modelo exponencial

de Wait e Spies¹², onde o parâmetro da condutividade ionosférica (ω_p) é dado pela equação:

$$\omega_p(h) = \omega_p(h_0) e^{\beta(h-h_0)} = \frac{\omega_0}{v} \quad (1)$$

onde ω_0 é a frequência angular do plasma,

v é a frequência de colisões dos elétrons com partículas neutras

h , é a altura de referência, ajustada para o valor onde:

$$\omega_p = 2,5 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1} \text{ e}$$

β é o gradiente vertical de ionização.

Aceitaremos que $\beta_D = 0,3 \text{ km}^{-1}$ para uma ionosfera diurna a 70 km de altura e que $\beta_N = 0,5 \text{ km}^{-1}$ para uma ionosfera noturna a 90 km de altura. Admitiremos modificações neste modelo, quando necessárias para justificar os fatos experimentais.

A anisotropia criada na ionosfera com a presença do campo magnético terrestre é representada pelo parâmetro magnético R, dado por:

$$\Omega = \omega_T / v \quad (2)$$

onde ω_T é a girofrequência dos elétrons.

É usual considerar $R = -1$ no caso de ondas que se propagam para Leste, em latitudes médias, durante o dia; valores mais negativos são usuais durante a noite. Assim, o modelo teórico de Wait e Spies¹² permite comparar as intensidades relativas do campo elétrico vertical para os modos 1 e 2 em função da distância percorrida pela onda, como mostrado na figura (2). Por simplicidade, e em primeira aproximação, usamos $\omega = -1$ para o dia e para a noite, sendo o modo 2 normalizado para a unidade em $d=0$.

Vemos, nesta análise teórica, que para 3,2 MHz o modo 2 não é desprezível apenas para a propagação noturna em 13,6 kHz.

Atualmente uma altura noturna de 90 km é considerada alta, e assim, na prática, o modo 2 sofre uma atenuação maior.

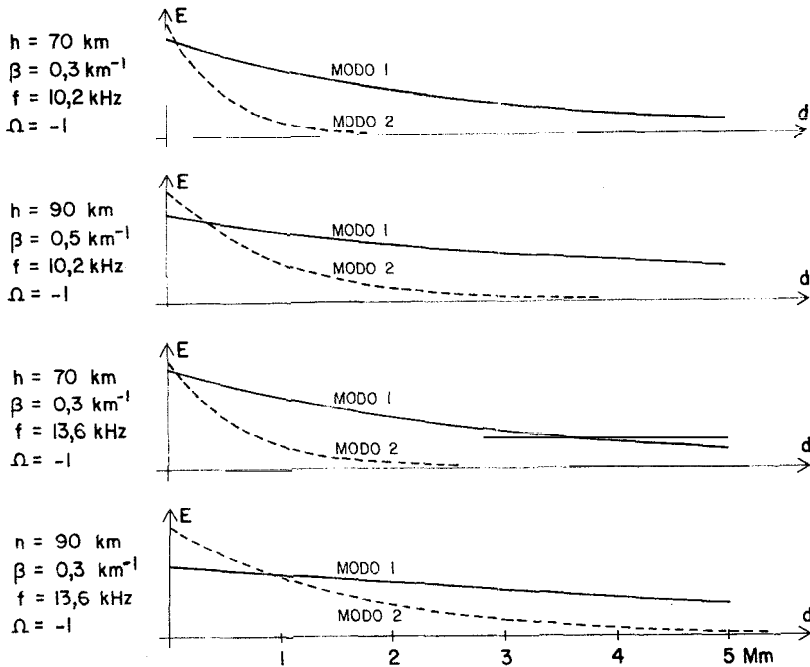


Fig.2 - Intensidades relativas do campo elétrico vertical para os modos de propagação 1 e 2 em função da distância percorrida pela onda.

2.2. Os resultados experimentais

Os sinais de VLF são analisados em fase e amplitude.

Optamos pelo cálculo de curvas médias para 10 dias em cada mês, num período de 12 meses, para a frequência de 10,2 kHz, e para um período de 3 meses na frequência de 13,6 kHz. Este esquema não pode ser executado rigidamente, devido a dificuldades técnicas.

Tomamos dados na frequência de 10,2 kHz nos seguintes meses e intervalos em 1976: Fevereiro (4-13), Março (13-27), Abril (7-19), Maio (21-30), Junho (14-28), Julho (9-18), Agosto (sem dados), Setembro (13-21), Outubro (19-28), Novembro (18-24 e 27-29), Dezembro (sem dados); e em 1977: Janeiro (20-29), Fevereiro (19-24) e Março (16-19).

Usamos também dados na frequência de 13,6 kHz nos últimos três intervalos acima citados.

Não foram observados saltos de ciclo ao amanhecer e ao anoitecer. Pequenas oscilações, nas amplitudes médias dos dez dias, sugerem que o modo 2 está presente em pequena proporção ao amanhecer. Como o modo 1 domina plenamente o comportamento das curvas no que toca a redução de dados, o modo 2 não será considerado.

Obtidas as curvas médias mensais, com pontos de meia em meia hora, e respectivos erros médios quadráticos, calculamos a curva média anual e o valor médio dos erros médios quadráticos mensais, ao qual chamamos de "desvio padrão típico", σ_A , para a amplitude, e σ_ϕ , para a fase.

Estes valores estão no gráfico da figura (3) para a frequência de 10,2 kHz, sendo as curvas representativas do intervalo de um ano.

As figuras (4) e (5) mostram os valores médios e respectivos desvios-padrões típicos para os três primeiros meses de 1977, nas frequências de 10,2 kHz e 13,6 kHz, respectivamente.

A tabela (1) resume os resultados experimentais, e os valores teóricos esperados.

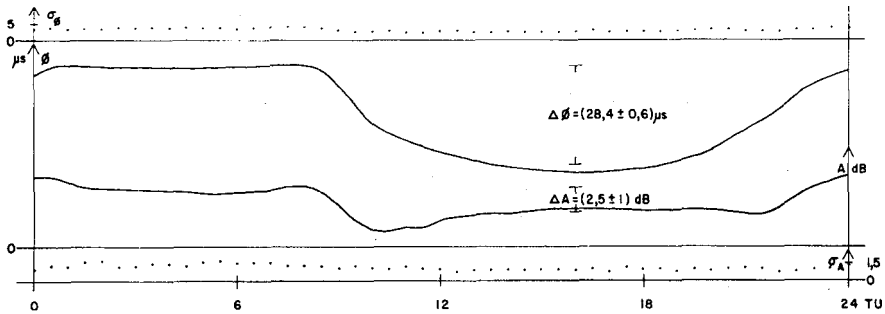


Fig.3 - Valores médios anuais da fase e da amplitude na frequência de 10,2 kHz, num período de 24 horas. Desvios-padrões típicos σ_ϕ e σ_A . Variação diurna da fase $\Delta\phi = \bar{\phi}_N - \bar{\phi}_D$, Variação diurna da amplitude $\Delta A = \bar{A}_N - \bar{A}_D$, onde: $\bar{\phi}_N$ = valor médio da fase no período noturno, $\bar{\phi}$ = valor médio da fase no período diurno, \bar{A} = valor médio da amplitude no período noturno, e \bar{A} = valor médio da amplitude no período diurno.

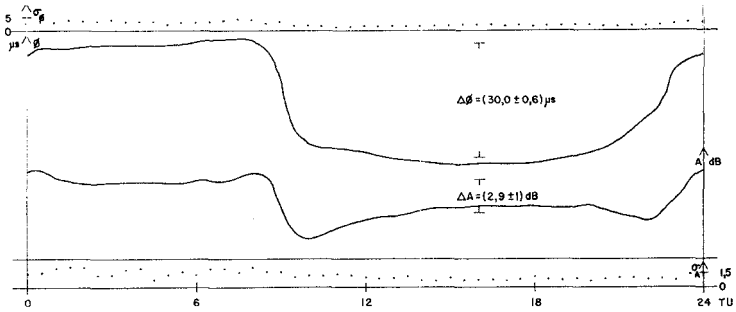


Fig.4 - Valores médios trimestrais da fase e da amplitude na frequência de 10,2 kHz, num período de 24 horas, válidos para os meses de janeiro, fevereiro e março de 1977. Desvios padrão típicos σ_ϕ e σ_A , variação diurna da fase $\Delta\phi = \bar{\phi}_N - \bar{\phi}_D$, Variação diurna da amplitude $\Delta A = \bar{A}_N - \bar{A}_D$, onde: $\bar{\phi}$ = valor médio da fase no período noturno, $\bar{\phi}_D$ = valor médio da fase no período diurno, \bar{A} = valor médio da amplitude no período noturno, e \bar{A}_D = valor médio da amplitude no período diurno.

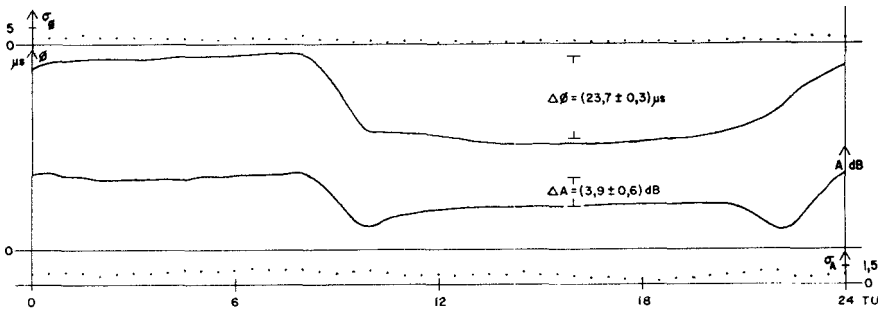


Fig.5 - Valores médios trimestrais da fase e da amplitude na frequência de 13,6 kHz, num período de 24 horas, válidos para os meses de janeiro, fevereiro e março de 1977. Desvios-padrões típicos σ_ϕ e σ_A , Variação diurna da fase $\Delta\phi = \bar{\phi}_N - \bar{\phi}_D$, Variação diurna da amplitude $\Delta A = \bar{A}_N - \bar{A}_D$, onde: $\bar{\phi}_N$ = valor médio da fase no período noturno, $\bar{\phi}_D$ = valor médio da fase no período diurno, \bar{A} = valor médio da amplitude no período noturno, e \bar{A}_D = valor médio da amplitude no período diurno.

TABELA 1

Frequência	Período	Valores experimentais		Valores teóricos ⁽⁺⁾		0
		Taxa $\Delta\phi/d$	Taxa $\Delta A/d$	Taxa $\Delta\phi/d$	Taxa $\Delta A/d$	
kHz	meses	$\mu s/Mm$	dB/Mm	$\mu s/Mm$	dB/Mm	km
10,2	12	8,9 ± 0,2	0,8 ± 0,3	15,0	1,1	29,41
10,2	3	9,4 ± 0,2	0,9 ± 0,3	15,0	1,1	29,41
13,6	3	7,4 ± 0,1	1,2 ± 0,2	11,3	0,9	22,06

(+) Modelo isotrópico, com $\beta_D = 0,3 \text{ km}^{-1}$, $h_D = 70 \text{ km}$
 $\beta_N = 0,5 \text{ km}^{-1}$, $h_N = 90 \text{ km}$

3. ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS. COMPARAÇÕES.

3.1. Comparação da fase com outros valores experimentais

A figura (6) apresenta, entre outras, a curva experimental de Blackband¹⁴, para condições isotrópicas de propagação, que nos mostra a taxa de variação da fase em função da frequência.

Na mesma figura, as curvas teóricas foram obtidas mediante a equação:

$$\frac{\Delta t}{d} = \frac{|(V_D/c)-1| - |(V_N/c)-1|}{c} \quad (3)$$

onde c é a velocidade da luz em Mm/s ,

Δt é a variação da fase em μs ,

$|(V_D/c)-1|$ e $|(V_N/c)-1|$ são fatores envolvendo as velocidades de fase, diurna e noturna, do modo 1, tabelados por Wait e Spies¹².

Situando os dados experimentais da tabela (1) na figura (6), observamos que nossos valores são menores do que os usuais, teóricos e experimentais.

Pelo modelo teórico adotado, a figura (6) sugere que a variação diurna de altura Δh , é da ordem de 10 km ou menor, pois a curva teórica para 80 km, não está corrigida para o campo magnético terrestre.

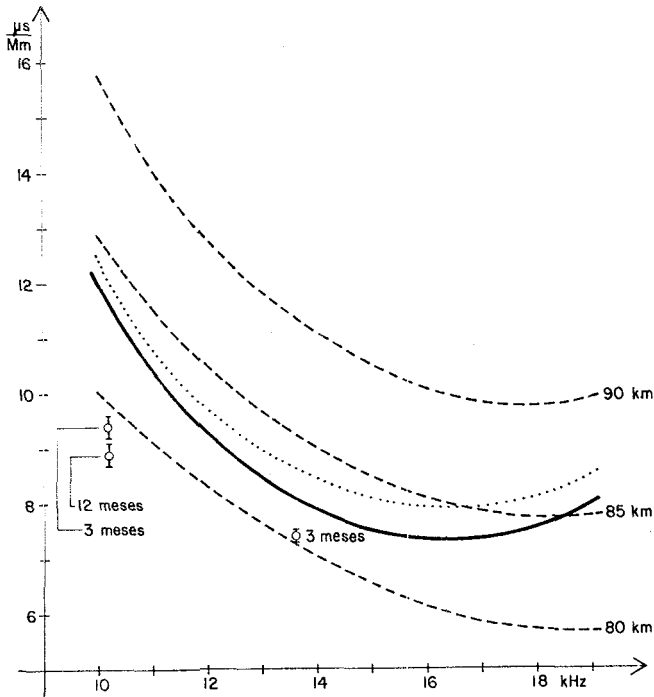


Fig. 6 - Taxa de variação diurna da fase por unidade de distância percorrida pela onda. (-----) Soluções teóricas para o modo I, em meio isotrópico, usando dados de Wait a Spies¹², com $h_D \approx 70$ km (fixa), para as alturas noturnas do guia de ondas de $h = 90$ km, $h_N = 85$ km e $h_N = 80$ km, com $\beta_D = 0,3 \text{ km}^{-1}$ e $\beta_N = 0,5 \text{ km}^{-1}$. (—) Curva experimental de Blackband¹⁴. (.....) Curva experimental de Blackband¹⁴, com correção devida ao campo magnético terrestre, baseada em dados de Watt¹⁵.

Este resultado é até aqui a melhor evidência conseguida com ondas "VLF" que sugere que a anomalia ionosférica associada à SAGA se estende inclusive à camada "D".

3.2. Variação diurna da altura do guia de ondas com a variação da fase

Usando a equação (4), desenvolvida por Wait¹⁶, para o primeiro modo de propagação,

$$\Delta h = \Delta \phi \frac{\lambda_1 h}{2\pi d} \left| \frac{1}{\frac{h}{2a} + \frac{(\lambda_1)^2}{16 h^2}} \right|, \quad (4)$$

onde Δh é a variação diurna da altura efetiva do guia,
 A_ϕ é a variação diurna experimental da fase,
 λ_1 é o comprimento de onda do modo 1 no vácuo,
 h é a altura média da ionosfera (valor proposto),
 d é a distância percorrida pela onda, e
 a é o raio terrestre (6400 km);

obtemos as curvas $h \times \Delta h$ apresentadas na figura (7).

Sobre estas curvas podemos avaliar uma variação aceitável para h com um ajuste conveniente da *altura diurna* do guia de ondas e sua *altura média*.

Fixando a altura diurna do guia em aproximadamente 70 km, vemos que, a altura média do guia que melhor satisfaz esta condição é a de 77 km.

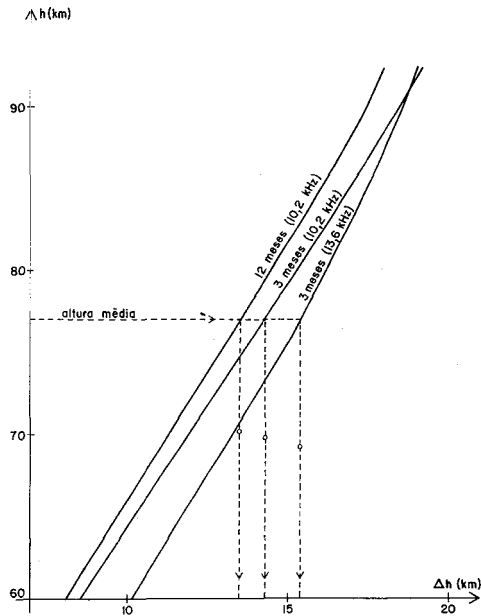


Fig. 7 - Interpolações gráficas das variações diurnas da altura efetiva do guia de ondas, Δh , em função de uma altura média, h , convenientemente escolhida (vide texto). (o) Alturas diurnas do guia.

Com esta altura média, temos a definição dos valores Ah procurados:

$$Ah(10,2 \text{ kHz}) = (13,4 \pm 1) \text{ km (valor anual),}$$

$$\Delta h(10,2 \text{ kHz}) = (14,3 \pm 1) \text{ km (valor trimestral),}$$

$$Ah(13,6 \text{ kHz}) = (15,2 \pm 0,5) \text{ km (valor trimestral)}$$

Vemos que estes valores são baixos em relação aos 16 km defendidos por alguns autores¹⁴ (cap. 19), porém bem maiores do que o obtido mediante a figura (6). Devemos aqui ter em mente, que a equação (4) tem um significado mais geométrico do que físico, pois não inclui os parâmetros β e R explicitamente.

3.3. Variação diurna da altura do guia de ondas com a taxa de variação da amplitude

Apesar de menos precisas, usaremos a seguir as taxas de atenuação experimentais e o modelo de Wait e Spies¹² para determinar as variações diurnas da altura ionosféricas, Ah.

Nas figuras (8) e (9), temos a taxa de atenuação, a , em função da altura do guia de ondas para vários casos.

Nos 70 km de altura, fixamos $R = -1$, $\beta_{70} = 0,3 \text{ km}^{-1}$ e para os 90 km de altura, propomos várias soluções para Ω_{90} e β_{90} .

Situando os valores experimentais da tabela (1) a partir dos 70 km, vemos que, para obtermos valores Δh compatíveis com a solução obtida na figura (6), devemos adotar para a parametrização noturna, $\beta=0,5 \text{ km}^{-1}$ e $R=-3$.

Com isto, obtemos:

$$\Delta h(10,2) = (6,8 \pm 1,2) \text{ km (valor anual) (não assinalado na fig.8),}$$

$$\Delta h(10,2) = (7,5 \pm 1,5) \text{ km (valor trimestral) e}$$

$$\Delta h(13,6) = (14,0 \pm 1,5) \text{ km (valor trimestral).}$$

Os dois últimos valores, efetivamente assinalados nas figuras (8) e (9), diferem bastante entre si, o que sugere que a parametrização

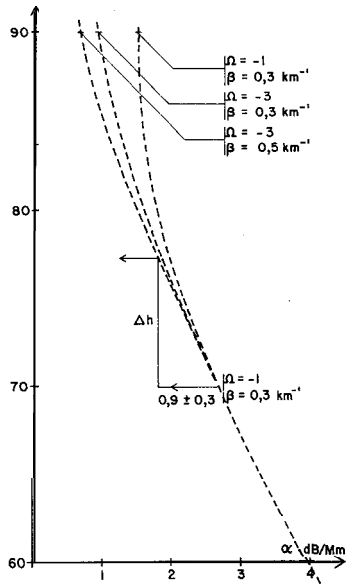


Fig. 8 - (----) Taxa de atenuação em função da altura efetiva do guia de ondas, para a frequência de 10,2 kHz, parametrizada em β e R , usando dados de Wait e Spies¹². (—) Interpolação gráfica.

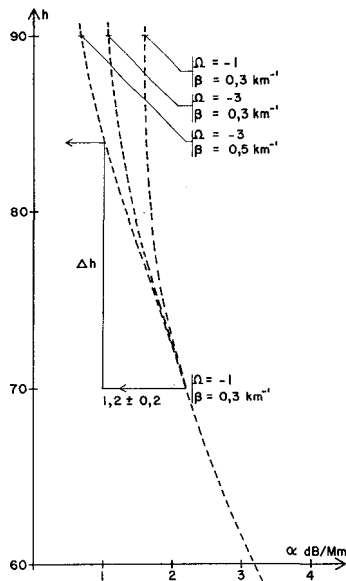


Fig. 9 - (----) Taxa de atenuação em função da altura efetiva do guia de ondas, para a frequência de 10,2 kHz, parametrizada em β e Ω , usando dados de Wait e Spies¹². (—) Interpolação gráfica.

zação adotada talvez não seja a mais conveniente. É pouco comum o uso dos dados experimentais da atenuação na determinação da variação da altura do guia, justamente devido à sua maior dependência dos parâmetros β e Ω .

4. REALIMENTAÇÃO

No intuito de verificar a compatibilidade de comportamento de A_h obtido pela variação da fase, A_ϕ , na figura (6), com os parâmetros impostos nas figuras (8) e (9), apresentamos na figura (10) uma nova solução. Como não existem dados a respeito do comportamento teórico da ionosfera, em relação à variação de Ω , com $\beta = 0,5 \text{ km}^{-1}$, usamos somente os dados disponíveis e que permitem traçar as curvas para $\beta = 0,3 \text{ km}^{-1}$ com R variável.

Pela figura (10), vemos que os pontos experimentais trimestrais, ficam situados entre as duas curvas:

$$h_N = 80 \text{ km}, \quad \beta = 0,5 \text{ km}^{-1}, \quad R = 0 \text{ (modelo isotrópico)}$$

e

$$h_N = 83 \text{ km}, \quad \beta = 0,3 \text{ km}^{-1}, \quad R = -3.$$

5. DISCUSSÃO

Para fins de comparação vamos nos ater apenas aos valores trimestrais. Um aspecto importante nos resultados dos itens 3.1, 3.2, e 3.3, é o fato de que o valor de $\Delta h(13,6)$ é sempre maior do que $\Delta h(10,2)$, quer usando a variação diurna da fase, $\Delta\phi$, quer usando a variação diurna da amplitude, ΔA .

Isto sugere que a frequência de 13,6 kHz, apesar de próxima de 10,2 kHz, esteja se refletindo efetivamente a uma altura noturna maior e com parametrização distinta.

Esta hipótese é reforçada pela diferença nas variações diurnas de atenuação, que geram valores A_h incompatíveis.

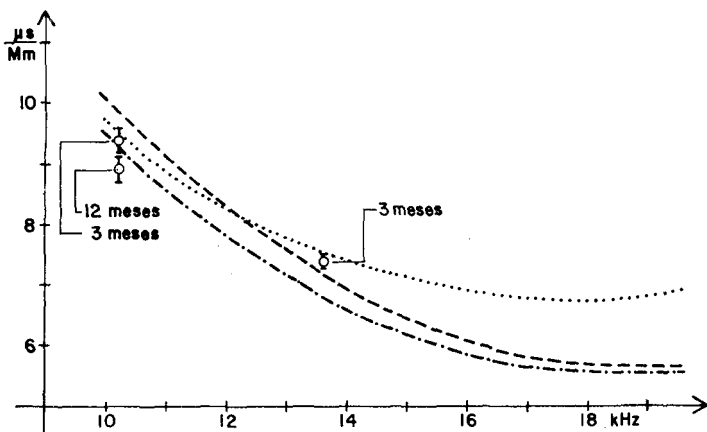


Fig.10 - Taxa de variação diurna da fase por unidade de distância percorrida pela onda. Soluções teóricas para o modo I: (----) Nas mesmas condições da fig. 6, para $h_N \approx 80$ km. (.....) Para a altura noturna, h_N , de 83 km, com $\beta_D = \beta_N = 0,3 \text{ km}^{-1}$ e $\Omega = -1$, $\Omega_N = -3$. (-.-.-) Para a altura noturna, h_N , de 84 km, com $\beta_D = \beta_N = 0,3 \text{ km}^{-1}$ e $\Omega_D = \Omega_N = -1$. (o) Valores experimentais.

Pela figura (10), vemos que é possível obter uma solução única para a parametrização, que satisfaça os dois valores experimentais, desde que h_N esteja entre 80 km e 84 km, β esteja entre $0,3 \text{ km}^{-1}$ e $0,5 \text{ km}^{-1}$ e R esteja entre $0,0$ e -3 .

A curva ($h_N=83 \text{ km}$, $\beta=0,3 \text{ km}^{-1}$, $R=-3$) da figura (10), apresenta uma inclinação muito pobre, enquanto as outras duas apresentam uma inclinação excessiva. A melhor inclinação deverá estar em torno de $R=-2$ e a uma altura entre 83 e 84 km. Qualquer que seja a solução teórica comum obtida, sua parametrização será incompatível com a solução obtida nas figuras (8) e (9).

Estamos, pois, frente a um comportamento real da ionosfera que não é satisfatoriamente explicado pelo modelo teórico, usando parâmetros comumente atribuídos à ionosfera em latitudes médias.

Não devemos esquecer aqui, que a teoria de Wait¹, a respeito da propagação modal, apresenta boa concordância com a experiência, no intervalo de frequências entre 15 kHz e 20 kHz aproximadamente¹². Uma análise de dados, neste intervalo de frequências, em nossa trajetória, seria desejável.

As curvas médias das figuras (3), (4) e (5), deixam claro que o Sol continua sendo o fator dominante no comportamento diurno da ionosfera e que a precipitação de partículas (elétrons), tem uma influência menor.

Esta pequena, mas perceptível influência que, até aqui, não tinha sido detectada com ondas "VLF", pode ser vista de duas maneiras:

a) como sendo devida a um fenômeno distribuído ao longo de grande parte da trajetória;

b) como sendo devida a um fenômeno mais ou menos localizado na trajetória, envolvendo uma precipitação intensa de partículas, cujos efeitos, em nossas medidas, ficam distribuídos nos 3,2 Mm

Acreditamos ser o segundo modelo o menos provável, pelo fato de não terem sido detectadas fotoluminescências que acompanhariam tais precipitações localizadas, Gledhill⁵.

A ambiguidade na localização do fenômeno e o fato de não ser o mesmo uniforme ao longo da trajetória, constitui um problema à parte quando se trata de estabelecer o valor dos parâmetros.

Por outro lado, como a componente horizontal do vetor indução magnética, ao longo da trajetória, vale apenas 0,22 gauss em média, formando um ângulo médio de 43° com a mesma, dificilmente poder-se-á justificar fisicamente um valor para R , mais negativo do que -1.

6. CONCLUSÕES

1. A taxa de variação diurna da fase em relação à distância percorrida pela onda, na trajetória C.Rivadavia-Atibaia apresenta uma diferenciação nítida em relação aos dados experimentais compilados por Blackband¹⁴, valores estes, válidos para latitudes médias e independentes de qualquer modelo teórico e de parametrizações impostas.

2. Permanece como matéria discutível nesta trajetória, a parametrização mais conveniente; ou até mesmo o modelo teórico a ser usado. Em qualquer caso, dificilmente a variação diurna da altura do guia de on-

das, Ah , deixará de sofrer alguma redução em relação aos valores usuais em latitudes médias.

Agradecemos ao Centro de Radio Astronomia e Astrofísica "Mackenzie", pelo acesso a seu banco de dados.

REFERENCIAS

1. Wait, J.R., "A new approach to the mode theory of VLF Radio Waves," J. Res. NBS, 65D, 37-46 (1961).
2. Coutinho, E.F., "Introdução às partículas presas à anomalia geomagnética brasileira," Ciência e Cultura, 26, 329-339 (1974).
3. William, D.J. and Kohl, J.W., "Loss and Replenishment of electrons at Middle Latitudes and High B Values," J. Geophys. Res., 70, 4139 (1965).
4. Zmuda, A.J., "Ionization Enhancement from Van Allen Electrons in the South Atlantic Magnetic Anomaly," J. Geophys. Res., 70, 1911-1917 (1966).
5. Gledhill, J.A., "Aeronomical Effects of the South Atlantic Anomaly," J. Geophys. and Space Phys., 14, 173 (1976).
6. Torr, D.G.; Torr, R.M.; Walker, J.C.G. and Hoffman, R.A., "Particle Precipitation in the South Atlantic Geomagnetic Anomaly," Planet. Space Sci., 23, 15-26 (1975).
7. Absu, M.A.; Ananthakrishnan, S.; Coutinho, E.F.; Krishnan, B.A. and Reis, E.M. da S., "Azimuthal Drift Precipitation of Electrons into the South Atlantic Anomaly During a SC Magnetic Storm," J. Geophys. Res., 78, 5830 (1973).
8. Mendes, A.M.; Ananthakrishnan, S. and de Barros, M.H. Paes, "Phase and Amplitude Change of VLF Signals Associated with PCA.. Events," with Reference to the South Atlantic Geomagnetic Anomaly. Ann. Geophys., 26, 483-492 (1970).
9. Gough, M.P., "Particle Precipitation in the South Atlantic Anomaly Deduced from VLF Propagation Path Measurements," J. Atmos. Terr. Phys., 37, 1379-1383 (1975).
10. Wait, J.R., "On the Propagation of VLF and ELF Radio Waves when the Ionosphere is not Sharply Boundet," J. Res. NBS. 66D, 53-61 (1962).

11. Wait, J.R., "Terrestrial Propagation of VLF Radio Waves." J. Res., NBS, 64D, 153-204 (1960).
12. Wait, J.R. and Spies, K.P., "Characteristics of the Earth Ionosphere Waveguide for VLF Radio Waves.", NBS Tech. Note 300, (1964).
13. SOLAR GEOPHYSICAL DATA, USA, Publicaçõe mensalente pela National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Environmental Data Service. U.S. Dep. of Commerce.
14. Blackband, T.W., (Ed.), *Propagation of Radiowaves at Frequencies below 300 kHz.* New York, Printice-Hall, (1961).
15. Watt, A.D., *Radio Engineering Handbook*, 1.ed., N.York, Pergamon Press, (1967).
16. Wait, J.R., "Diurnal Change of Ionospheric Heights Deduced from Phase Velocity Measurements at VLF." Proc. of the IRE, p. 998 (1959).