



PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS  
**AUTORES** AUTORS  
 TEMPESTADE MAGNÉTICA DENSIDADE ELETRÔNICA  
 PRECIPITAÇÃO DE PARTÍCULAS  
 ANOMALIAS DE FASE

AUTORIZADA POR/AUTHORIZED BY  
  
 Marco Antonio Raupp  
 Diretor Geral

AUTOR RESPONSÁVEL  
 RESPONSIBLE AUTHOR  
  
 Neusa Maria Paes Leme

DISTRIBUIÇÃO/DISTRIBUTION  
 INTERNA / INTERNAL  
 EXTERNA / EXTERNAL  
 RESTRITA / RESTRICTED

REVISADA POR / REVISED BY  
  
 Liliana Rizzo Piazza

CDU/UDC  
 550.382(261.5)

DATA / DATE  
 Dez. 1. 1986

TÍTULO/TITLE	PUBLICAÇÃO Nº PUBLICATION NO INPE-4084-TDL/251
	ESTUDO COMPARATIVO DOS EFEITOS DE TEMPESTADES MAGNÉTICAS EM VLF NA ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL
AUTORES/AUTHORSHIP	Neusa Maria Paes Leme

ORIGEM  
 ORIGIN  
 DRH-DAS

PROJETO  
 PROJECT  
 DRH-CEA

Nº DE PAG.  
 NO OF PAGES  
 155

ULTIMA PAG.  
 LAST PAGE  
 136

VERSÃO  
 VERSION

Nº DE MAPAS  
 NO OF MAPS

RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES

Foram analisados os efeitos de quarenta tempestades magnéticas na baixa ionosfera, ocorridas no período de 1976 a 1981. Utilizou-se a propagação de sinais de VLF no trajeto  $\Omega$ -Argentina ( $43^{\circ}S$ ;  $65^{\circ}W$ )/Atibaia ( $23^{\circ}S$ ;  $46^{\circ}W$ ), localizado na Anomalia Geomagnética Brasileira. Os efeitos de algumas tempestades de 1981 também foram analisados através de Ionossonda Oblíqua de VLF/LF (20-60 KHz) operado pelo CTA/IAE, com transmissor em Paula Freitas ( $26^{\circ}S$ ;  $51^{\circ}W$ ) e o receptor em Gaspar ( $26^{\circ}S$ ;  $48^{\circ}W$ ). A comparação entre as frequências de 13,6 KHz e 10,2 KHz mostrou características bem distintas de propagação. Obteve-se para as frequências de 10,2 KHz e 13,6 KHz uma altura de propagação noturna próxima a 80 km e 83 km, respectivamente. Diferenças no tempo de ionização e na densidade de elétrons de cada região foram verificadas. Os dados de refletividade da Ionossonda Oblíqua evidenciaram a ocorrência de mais de uma camada de reflexão do sinal em alturas próximas (Dupla Reflexão). Os resultados confirmaram o aumento da densidade eletrônica entre 08 e 48 horas após o início do sc (sudden commencement), o qual perdurou de 01 a vários dias. Os cálculos do fluxo de elétrons mostraram a presença de partículas entre 10 e 200 KeV, encontrando-se para o maior desvio de fase observado, um fluxo que varia entre  $J (> 40 \text{ KeV}) = 10^3 - 10^6 \text{ elétrons/cm}^2 \text{ s sr}$ , com energia que varia entre  $50 \text{ KeV} \leq E \leq 150 \text{ KeV}$ . A densidade eletrônica da região variou de  $10^3$  a  $10^4 \text{ elétrons/cm}^3$  durante o período de máxima atividade. Por outro lado, algumas tempestades magnéticas apresentaram decréscimo na concentração eletrônica, durante a fase inicial, efeito este ainda não observado nesta região.

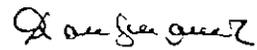
OBSERVAÇÕES/REMARKS  
 Dissertação de Mestrado em Ciências Espaciais, aprovada em março de 1986.

### ABSTRACT

Effects produced in the lower ionosphere by forty magnetic storms were analysed in the period of 1976-1981. Using VLF propagation path  $\Omega$ -Argentina ( $43^{\circ}\text{S}$ ;  $65^{\circ}\text{W}$ )/Atibaia ( $23^{\circ}\text{S}$ ;  $46^{\circ}\text{W}$ ), which is located in the Brazilian Geomagnetic Anomaly. Some storm effects occurred in 1981 were also analysed by means of a VLF/LF (20-60 KHz) Oblique Ionosonde operated by CTA/IAE, with the transmitter located in Paula Freitas ( $26^{\circ}\text{S}$ ;  $51^{\circ}\text{W}$ ) and the receiver in Gaspar ( $26^{\circ}\text{S}$ ;  $48^{\circ}\text{W}$ ). Comparison between frequencies of 13,6 KHz and 10,2 KHz showed well-defined propagation characteristics. For the frequencies of 10,2 KHz and 13,6 KHz, the height near 80 and 83 km night propagation was obtained, respectively. Differences in electron density and ionization time for each region were verified. Reflectivity data for the Oblique Ionosonde indicated the occurrence of more than one reflection layer of the signal in near heights (Double Reflection). The results confirmed the increase of electron density in about 08-48 hours after the sc (sudden commencement) onset, and lasting from one to several days. Electron flux calculations revealed the existence of particles with energy ranging from 10 to 200 KeV and flux ranging from  $J$  ( $\geq 40$  KeV) =  $10^3 - 10^6$  electrons/cm<sup>2</sup> s sr for energy between  $50 \leq E \leq 150$  KeV for the largest observed phase deviation. The electron density in the region considered changed from  $10^3$  to  $10^4$  electrons/cm<sup>3</sup> during the periods of maximum activity. On the other hand, some magnetic storms have shown a decrease in the electron density near the sc, effect not observed in this region.

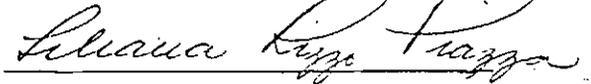
Aprovada pela Banca Examinadora  
em cumprimento a requisito exigido  
para a obtenção do Título de Mestre  
em Ciência Espacial

Prof. Pierre Kaufmann



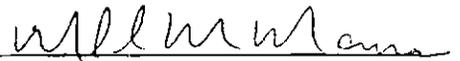
Presidente

Dra. Líliliana Rizzo Piazza



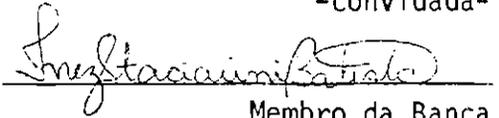
Orientador

Fis. Maria Sueli da Silveira M.Moura, Mestre



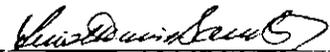
Membro da Banca  
-convidada-

Dra. Inez Staciarini Batista



Membro da Banca

Dr. Luiz Muniz Barreto



Membro da Banca

Candidata: Neusa Maria Paes Leme

São José dos Campos, 04 de março de 1986



## AGRADECIMENTOS

À Dra. Liliana Rizzo Piazza, orientadora desta dissertação, por sua inestimável colaboração, através de críticas, sugestões e discussões durante a realização deste trabalho.

Ao Prof. Pierre Kaufmann, co-orientador deste trabalho, por seu incentivo e apoio.

À mestre Maria Sueli Macedo Moura, por sua ajuda e discussões sobre os dados de Ionossonda Oblíqua, gentilmente cedidos.

Ao Eng<sup>o</sup> Ricardo E. Schaal, por seu inestimável apoio e contribuição no desenvolvimento experimental deste trabalho.

Aos colegas Joaquim E. Rezende Costa, José Williams dos Santos Vilas Boas, Emília Correia, pelo auxílio na parte computacional deste trabalho.

A Fausta Coelho da Fonseca e a Rosana D.G.A. Gonçalves pelo cuidadoso trabalho datilográfico.

Ao IAE/CTA, por permitir a utilização dos dados da Ionossonda Oblíqua.

Ao Departamento de Geofísica do Observatório Nacional pelos magnetogramas gentilmente cedidos.

Ao CRAAM/INPE, através de seu corpo de pesquisadores, técnicos e recursos experimentais, por ter propiciado a realização do curso de pós-graduação.

Ao CNPq e CAPES, por seu auxílio financeiro durante este período.

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS .....	<i>ix</i>
LISTA DE TABELAS .....	<i>xiii</i>
LISTA DE SÍMBOLOS .....	<i>xv</i>
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u> .....	1
1.1 - Comportamento de partículas energéticas na preseça do campo geomagnético .....	1
1.1.1 - Considerações gerais sobre o campo geomagnético .....	1
1.1.2 - Variações magnéticas .....	4
1.1.3 - Índices de atividade magnética .....	5
1.2 - Interação de partículas carregadas com o campo geomagnético .....	6
1.2.1 - Movimento ciclotrônico .....	8
1.2.2 - Movimento de balanceamento (movimento de "bouncing") ao longo da linha de campo magnético .....	9
1.2.3 - Movimento de deriva (drift) da partícula .....	11
1.3 - O sistema B-L de coordenadas ou coordenadas de McILwain ..	12
1.4 - Os cinturões de radiação .....	14
1.4.1 - Mecanismos de injeção e perda de partículas energéticas. ..	16
1.5 - A Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul (SAGA - South Atlantic Geomagnetic Anomaly) .....	20
1.5.1 - O comportamento dos elétrons na SAGA .....	24
1.6 - Objetivo do presente estudo .....	29
<u>CAPÍTULO 2 - TÉCNICAS UTILIZADAS E APRESENTAÇÃO DOS DADOS OBSERVACIONAIS</u> .....	31
2.1 - Técnicas utilizadas .....	31
2.1.1 - Propagação de VLF à longa distância .....	31
2.1.2 - Sondagem oblíqua em VLF/LF (20 KHz - 60 KHz) .....	33
2.2 - Apresentação dos resultados .....	33
<u>CAPÍTULO 3 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS OBSERVAÇÕES EXPERIMENTAIS</u> .....	37
3.1 - A ionosfera em latitudes médias .....	37

	<u>Pág.</u>
3.2 - A ionosfera na região da anomalia magnética brasileira ...	39
3.3 - Principais características observadas .....	41
3.3.1 - Avanço e atraso de fase do sinal de VLF associados a tempestades magnéticas .....	41
3.3.2 - Tempestades magnéticas que ocorreram em períodos de chuvas de meteoros .....	58
3.3.3 - Períodos que indicam a precipitação de elétrons antes do início da perturbação do campo magnético .....	75
3.4 - Outras análises .....	86
3.5 - Análises das tempestades magnéticas de abril e maio de 1981 realizada através dos dados da Ionossonda Oblíqua de VLF/LF .....	86
3.5.1 - Comparação entre os dados de ionossonda e os sinais de VLF .....	91
<u>CAPÍTULO 4 - PROPAGAÇÃO DE SINAIS DE VLF NO GUIA DE ONDA TERRA - IONOSFERA</u> .....	95
4.1 - Determinação da altura do guia de onda .....	95
4.2 - Estimativa do fluxo de elétrons e da densidade eletrônica na região D noturna .....	103
4.2.1 - Cálculo da densidade eletrônica para dados obtidos com Ionossonda Oblíqua de VLF/LF .....	113
<u>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES</u> .....	117
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	121

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 - Magnetosfera .....	3
1.2 - Fases de uma tempestade magnética .....	5
1.3 - Variação da altitude com a longitude para vários anéis B-L	13
1.4 - Os cinturões de radiação e os três movimentos periódicos das partículas energéticas no campo magnético .....	15
1.5 - Diagrama B e L para longitude de 45° que mostra os pontos de reflexão para uma partícula localizada em L = 1,15 .....	22
1.6 - Espectros de elétrons medidos .....	25
1.7 - Tempo de vida de elétrons .....	26
1.8 - Tempo de vida de elétrons devido unicamente ao espalhamento atmosférico .....	29
2.1 - Trajetória Ω-Argentina/Atibaia, Paula Freitas/Gaspar e coordenadas magnéticas sobrepostas às coordenadas geográficas	32
3.1 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (13,6 KHz) de 27 de julho a 03 de agosto de 1977 e os índices magnéticos ΣKp e Dst .....	42
3.2 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (13,6 KHz) de 01 a 08 de janeiro de 1978 e os índices magnéticos ΣKp e Dst ...	43
3.3 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (13,6 KHz) de 25 de agosto a 01 de setembro de 1978 e os índices magnéticos ΣKp e Dst .....	44
3.4 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (13,6 KHz) de 22 a 30 de setembro de 1978 e os índices magnéticos ΣKp e Dst.	45
3.5 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (13,6 KHz e 10,2 KHz) de 02 a 12 de fevereiro de 1979 e os índices magnéticos ΣKp e Dst .....	46
3.6 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (13,6 KHz e 10,2 KHz) de 20 a 27 de abril de 1979 e os índices magnéticos ΣKp e Dst .....	47
3.7 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (13,6 KHz) de 11 a 16 de abril de 1981 e os índices magnéticos ΣKp e Dst ...	48
3.8 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (13,6 KHz) de 10 a 20 de dezembro de 1977 e os índices magnéticos ΣKp e Dst ..	61
3.9 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (13,6 KHz e 10,2 KHz) de 11 a 16 de dezembro de 1978 e os índices magnéticos ΣKp e Dst .....	62

3.10 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (13,6 KHz e 10,2 KHz) de 04 a 13 de junho de 1979 e os índices magnéticos $\Sigma Kp$ e Dst .....	66
3.11 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (13,6 KHz e 10,2 KHz) de 19 a 26 de outubro de 1979 e os índices magnéticos $\Sigma Kp$ e Dst .....	67
3.12 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (13,6 KHz) de 03 a 12 de maio de 1981 e os índices magnéticos $\Sigma Kp$ e Dst ...	68
3.13 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (10,2 KHz) de 22 a 28 de março de 1976 e os índices magnéticos $\Sigma Kp$ e Dst ..	77
3.14 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (10,2 KHz) de 16 a 25 de maio de 1976 e os índices magnéticos $\Sigma Kp$ e Dst ...	78
3.15 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (13,6 KHz e 10,2 KHz) de 02 a 12 de julho de 1979 e os índices magnéticos $\Sigma Kp$ e Dst .....	79
3.16 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (13,6 KHz e 10,2 KHz) de 29 de novembro a 08 de dezembro de 1979 e os índices magnéticos $\Sigma Kp$ e Dst .....	80
3.17 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (13,6 KHz e 10,2 KHz) de 12 a 23 de fevereiro de 1980 e os índices magnéticos $\Sigma Kp$ e Dst.....	81
3.18 - Alturas de reflexão dos sinais de ionossonda oblíqua de VLF/LF para o período de 11 a 14 de abril de 1981 .....	89
3.19 - Coeficientes de reflexão na hora da dupla reflexão .....	90
3.20 - Comparação das alturas de reflexão dos sinais de curta e longa trajetórias para abril de 1981 .....	92
3.21 - Comparação das alturas de reflexão dos sinais de curta e longa trajetórias para maio de 1981 .....	93
4.1 - Variação diurna da fase de VLF por unidade de distância percorrida .....	102
4.2 - Taxa de produção de íons para um fluxo unitário de elétrons com diferentes valores de energia inicial.....	105
4.3 - Taxa de ionização noturna em função da altitude para diferentes fontes ionizantes (pares de íons/cm <sup>3</sup> s) .....	109
4.4 - Variação de fase computada para a trajetória $\Omega$ -Argentina/Atibaja nas frequências de 10,2 KHz e 13,6 KHz em função do fluxo de elétrons ( $J > 40$ KeV) para diferentes valores de energia inicial .....	110
4.5 - Perfil de densidade eletrônica para os períodos de alta e baixa atividades magnéticas .....	113

4.6 - Perfil de densidade eletrônica utilizando dados de ionosson da oblíqua de VLF/LF para a tempestade magnética de abril de 1981 .....	114
4.7 - Perfil de densidade eletrônica utilizando dados de ionosson da oblíqua de VLF/LF para a tempestade magnética de maio de 1981 .....	115

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 - Parâmetros do campo magnético .....	50
3.2 - Características e parâmetros obtidos dos sinais de VLF para as tempestades magnéticas de julho de 1977; janeiro, agosto e setembro de 1978; fevereiro e abril de 1979; abril de 1981 .....	52
3.3 - Parâmetros do campo magnético .....	60
3.4 - Características e parâmetros obtidos dos sinais de VLF para tempestades magnéticas de dezembro de 1977 e 1978; junho e outubro de 1979 e maio de 1981 .....	64
3.5 - Chuvas de meteoros .....	71
3.6 - Parâmetros do campo magnético .....	76
3.7 - Características e parâmetros obtidos dos sinais de VLF para as tempestades magnéticas de março e maio de 1976, julho e novembro de 1979 e fevereiro de 1980 .....	83
4.1 - Comparação dos valores teóricos e experimentais de fase e amplitude dos sinais de VLF em 13,6 KHz e 10,2 KHz .....	100
4.2 - Limite de penetração para elétrons no ar .....	106

## LISTA DE SÍMBOLOS

- B - Campo magnético
- $B_m$  - Campo magnético no ponto de reflexão
- $B_0$  - Campo magnético equatorial
- c - Velocidade da luz no vácuo
- d - Distância
- E - Campo elétrico
- $E_e$  - Energia de elétrons
- $E_0$  - Energia característica dos elétrons
- e - Carga do elétron
- $E_{ion}$  - Perda média de energia por par de ion formado
- F - Força não-eletromagnética
- f - Frequência da onda
- h - Altura
- $h_0$  - Altura de referência
- I - Integral invariante
- J - Fluxo de elétrons com energia E
- $J_0$  - Fluxo total de elétrons
- $J_i$  - Invariante longitudinal ou integral
- K - Número de onda
- L - Parâmetro de McIlwain
- l - Comprimento medido sobre a linha de campo magnético
- m - Massa da partícula
- $N_e$  - Densidade de elétrons
- $n(M)_R$  - Densidade numérica de átomos ou moléculas ionizáveis na profundidade atmosférica R.

- $n(M)_z$  - Densidade numérica de partículas ionizáveis na profundidade atmosférica  $z$ .
- $n$  - Número de modos de propagação
- $p$  - Momento da partícula
- $R$  - Distância radial ao centro da Terra
- $R_T$  - Raio da Terra
- $r_0$  - Distância de uma linha de campo magnético ao centro da Terra no plano equatorial
- $t$  - Tempo
- $v$  - Velocidade de uma partícula
- $v//$  - Componente da velocidade de uma partícula paralela ao campo magnético
- $v_{\perp}$  - Componente da velocidade de uma partícula perpendicular ao campo magnético
- $v_f$  - Velocidade de fase
- $z$  - Profundidade atmosférica
- $\Lambda$  - Latitude magnética
- $\lambda$  - Comprimento de onda
- $\alpha_0^*$  - Coeficiente associado ao coeficiente de reflexão na ionosfera
- $\alpha$  - Ângulo de Passo (Pitch Angle)
- $\alpha_0$  - Ângulo de passo equatorial
- $\alpha_m$  - Ângulo de passo no ponto de reflexão
- $\beta$  - Gradiente de condutividade
- $\Psi$  - Invariante de fluxo
- $\omega$  - Frequência angular de plasma para os elétrons
- $\omega_r$  - Condutividade
- $\omega_r(h)$  - Condutividade em uma altura  $h$
- $\omega_r(h_0)$  - Condutividade em uma altura  $h_0$

- $\Delta t$  - Intervalo de tempo
- $\Delta h$  - Variação de altura
- $\Delta \phi$  - Variação relativa de fase
- $\Delta A$  - Variação relativa de amplitude
- $\Delta \beta$  - Variação do gradiente de condutividade
- $\epsilon_0$  - Energia inicial dos elétrons
- $\nu$  - Frequência de colisão dos elétrons com partículas neutras
- $\nu_h$  - Frequência de colisão na altura  $h$
- $\nu_{h0}$  - Frequência de colisão da altura de referência
- $\rho$  - Densidade de massa

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 - O COMPORTAMENTO DE PARTÍCULAS ENERGÉTICAS NA PRESENÇA DO CAMPO GEOMAGNÉTICO

##### 1.1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O CAMPO GEOMAGNÉTICO

A análise das características do campo geomagnético é feita através da distribuição espacial e de suas variações temporais.

A teoria clássica supõe que o campo magnético tem origem nos movimentos de matéria eletricamente carregada no núcleo da Terra; 99% do campo observado na superfície pode ser representado por um campo dipolar, cujo eixo está deslocado  $11^\circ$  em relação ao eixo de rotação da Terra. A esta componente principal do campo, bastante estável, estão associados campos anômalos de origem externa, como correntes ionosféricas e magnetosféricas, cuja contribuição representa 0,1% do campo total.

O campo magnético  $B$  é expresso em Gauss (G), Tesla ( $T=10^4$  Gauss) ou Gama ( $\gamma = 10^{-9}T$ ).

A intensidade do campo na superfície apresenta variações, a qual apresenta apreciáveis diferenças e irregularidades em relação ao campo do dipolo.

Essas irregularidades, ou anomalias, apresentam valor de campo muito baixo e um lento movimento de deriva para o oeste. Se o campo for expresso pela representação multipolar, estas anomalias podem ser estimadas através do termo de quadripolo (Roederer, 1972).

A maior anomalia existente é a Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul (SAGA). No Brasil recebe o nome de Anomalia Geomagnética Brasileira.

A configuração do campo para distâncias maiores que 4 raios terrestres ( $R_T$ ) afasta-se totalmente do modelo dipolar, consequência da pressão exercida pelo fluxo contínuo de plasma proveniente da coroa solar (vento solar).

A região onde o campo B está confinado denomina-se magnetosfera (Gold, 1959) e é caracterizada pelo domínio do campo magnético sobre os processos físicos que ali ocorrem. Possui uma estrutura bastante complexa e muitos modelos foram desenvolvidos para descrevê-la. Sua extensão em média vai de 10 a 15  $R_T$  do lado solar e do lado anti-solar forma uma cauda de dezenas de  $R_T$  (Poervelin, 1972).

As principais partículas energéticas presentes na magnetosfera são prótons e elétrons e, em quantidades bem menores, partículas alfa e núcleos pesados.

As regiões ilustradas na Figura 1.1 são descritas a seguir, possibilitando uma visão geral das características da magnetosfera.

A frente de choque (bow-shock) é a região onde ocorre a primeira interação do vento solar com o campo.

A camada de revestimento (magnetosheath) é caracterizada por um regime turbulento. É uma região muito importante para o estudo dos processos associados à aceleração de partículas.

Na região denominada vértice (cusp) encontram-se as partículas pouco energéticas, de origem solar. Acredita-se que é através desta região que as partículas penetram no interior da magnetosfera, precipitando-se na zona polar, produzindo as auroras.

A camada de plasma (plasma sheet) é uma região de alta densidade de plasma na cauda da magnetosfera, a qual contribui com a injeção de partículas para o interior da magnetosfera em períodos magneticamente perturbados.

A camada neutra (neutral sheet) é uma região neutra da cauda da magnetosfera. Supõe-se que é nesta região que ocorrem instabilidades que dão origem a subtempestades magnéticas.

A região onde as linhas de campo são fechadas denomina-se plasmasfera. Ela apresenta movimento de co-rotação com a Terra e contém partículas carregadas aprisionadas nas linhas de campo, formando os cinturões de radiação.

A dinâmica da magnetosfera está associada diretamente à atividade solar. A compressão ou expansão da região em função da variação da pressão do vento solar provoca variações em pequenas ou grandes escalas no campo geomagnético.

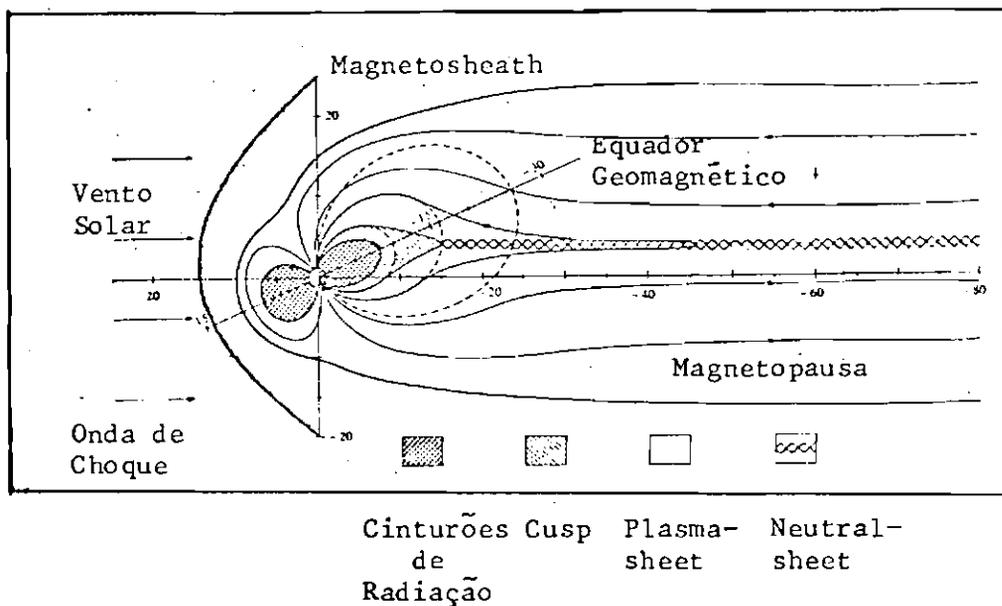


Fig. 1.1 - Magnetosfera.

FONTE: Roederer (1970), p. XIII.

### 1.1.2 - VARIAÇÕES GEOMAGNÉTICAS

O campo geomagnético apresenta basicamente dois tipos de variações: 1) lentas, que estão associadas à variação secular e inversão de polaridade, e 2) rápidas, que estão associadas a pulsações, tempestades magnéticas, variações diurnas, e outras variações como variação lunar, etc.

As variações de curta escala de tempo são causadas por agentes externos (Kane, 1976). Podem ocorrer pequenas variações, que estão associadas aos movimentos de marés da atmosfera, em períodos magneticamente calmos ou variações intensas, associadas a períodos magneticamente perturbados (tempestades magnéticas).

Uma tempestade magnética típica é caracterizada pelo aumento da componente horizontal (H) do campo e pode ser dividida em três fases distintas (Poervelin, 1972; Rostoker, 1972; Kane, 1976):

- a) Fase inicial, onde ocorre o aumento da componente horizontal (H), devido à maior compressão das linhas magnéticas na magnetosfera, pelo vento solar. Pode ocorrer nesta fase um início gradual ou súbito (sudden commencement - sc). Nem sempre é possível observar nos magnetogramas este estágio (ou porque a variação é muito lenta ou muito pequena). Um aumento típico é da ordem de 20 a 30  $\gamma$ . Em tempestades mais intensas, pode ser observado um aumento de cerca de 50  $\gamma$ . Esta fase pode durar de 3 a 8 horas.
- b) Fase principal, que corresponde a um decréscimo do campo, conseqüência da presença de correntes elétricas que fluem na magnetosfera, formando o sistema de corrente de anel (ring current). Esta fase é a mais longa e pode ter a duração de dias.
- c) Fase de recuperação, onde o campo volta ao seu estado inicial não-perturbado.

A Figura 1.2 mostra as fases de uma tempestade magnética. As variações menores, superpostas à fase principal, são consequência de sistemas secundários de correntes elétricas que circulam em regiões polares, denominadas distúrbios polares (DP).

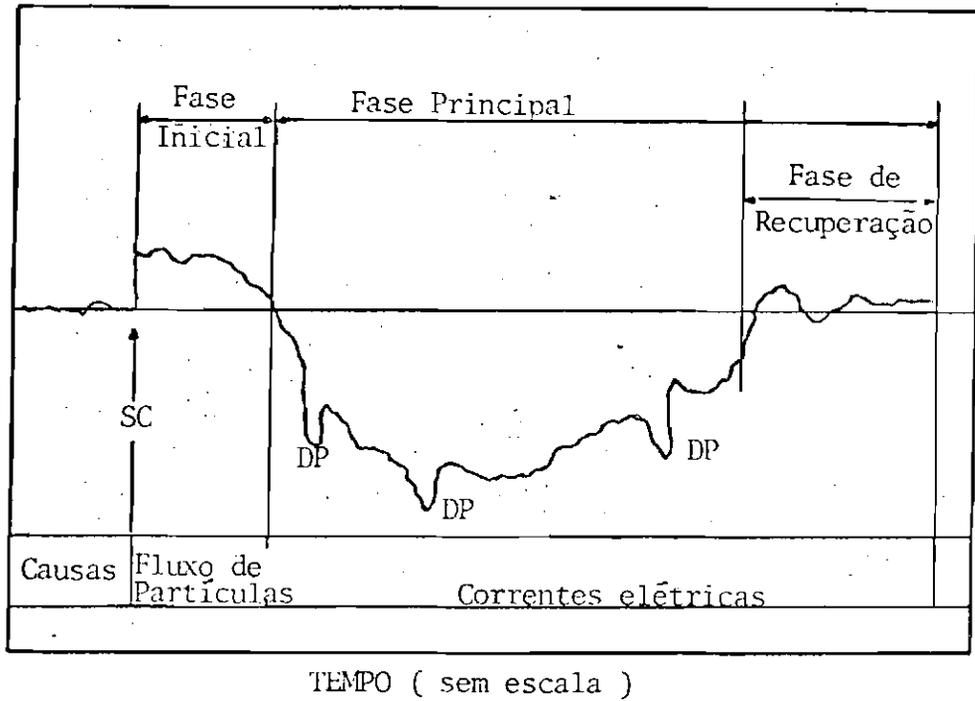


Fig. 1.2 - Fases de uma tempestade magnética.

FONTA: Ratcliffe (1972), p. 94.

### 1.1.3 - ÍNDICES DE ATIVIDADE MAGNÉTICA

Para definir o estado de atividade do campo magnético, foram criados vários índices que expressam as variações do campo.

Em cada estação magnética, o dia é dividido em 8 períodos de 3 horas onde se mede a variação de cada componente do campo. Destas medidas, são previamente subtraídas as variações que ocorrem em períodos quiescentes. A maior das três variações é denominada amplitude  $a$  (Rostoker, 1972).

Estas amplitudes são obtidas em diversos locais e produzem o índice planetário Ap.

Vários índices são utilizados para representar a variação do campo, entre eles os índices Kp e Dst.

a) Índice Kp:

O índice K, está relacionado com as amplitudes a por uma escala semilogarítmica que é escolhida individualmente para cada estação. Os valores numéricos de K variam de 0 (atividade muito calma) a 9 (atividade muito intensa), com frações intermediárias de 1/3, representadas por sinais + ou -, e estes valores incluem efeitos locais.

A média entre as várias estações corresponde ao índice planetário Kp. Esta representação do valor médio da atividade magnética na Terra não é uma representação ideal, pois a rede de magnetômetros não está distribuída uniformemente sobre a superfície terrestre, com a maioria dos observatórios situando-se no Hemisfério Norte.

b) Índice Dst:

O índice Dst indica variações na corrente elétrica induzida a  $5,6 R_T$ . Este índice é expresso em valores que representam uma média simétrica da amplitude da componente horizontal do campo perturbado e fornece uma boa descrição qualitativa da atividade da magnetosfera em geral, a qual, porém, não é eficiente quando se analisam subtempestades individuais.

## 1.2 - INTERAÇÃO DE PARTÍCULAS CARREGADAS COM O CAMPO GEOMAGNÉTICO

O movimento de uma partícula carregada em um campo magnético dipolar, estático, sob a ação de um campo elétrico e uma força externa não-eletromagnética, é expresso por (Roederer, 1970):

$$\frac{d}{dt} \left( m \frac{d\vec{r}}{dt} \right) = e \left[ \frac{1}{c} \left( \frac{d\vec{r}}{dt} \times \vec{B} \right) + \vec{E} \right] + \vec{F}, \quad (1.1)$$

onde

$t$  = tempo,

$m$  = massa da partícula,

$r$  = vetor posição da partícula,

$e$  = carga da partícula,

$c$  = velocidade da luz no vácuo,

$\vec{B}$  = vetor campo magnético,

$\vec{E}$  = vetor campo elétrico,

$\vec{F}$  = vetor força não-eletromagnética.

A possibilidade de esta partícula, permanecer presa à linha de campo foi sugerida por Störmer (1907). O método mais adequado para o estudo do seu movimento é o que utiliza a aproximação adiabática, onde se supõe que a partícula tem apenas energia cinética, não havendo troca com o meio e, conseqüentemente, a energia é conservada (Liemohn, 1961). Isto é, impondo certas condições na geometria dos campos elétrico e magnético, na intensidade da força externa e na energia da partícula, a equação de movimento fica bastante simplificada e pode ser decomposta em três tipos de periodicidade:

- 1) movimento de rotação perpendicular às linhas de campo magnético (movimento ciclotrônico);
- 2) movimento de balanceamento ao longo da linha de campo magnético (movimento de "bouncing");
- 3) movimento de deriva ao longo de superfícies fechadas construídas pelas linhas de campo magnético (movimento de "drift").

Roederer (1970) estudou os mecanismos de aprisionamento de uma partícula, aplicando os invariantes adiabáticos para os três movimentos periódicos.

### 1.2.1 - MOVIMENTO CICLOTRÔNICO

Uma partícula eletricamente carregada, ao penetrar num campo magnético estático,  $\vec{B}$ , com uma componente da velocidade perpendicular ao campo, descreverá num movimento helicoidal em torno da linha de campo.

Para os elétrons, o período de rotação é da ordem de  $\mu\text{s}$  e o sentido do movimento é anti-horário, enquanto para os prótons, o período de rotação é da ordem de  $\text{ms}$  e o sentido é horário.

O ângulo formado entre o vetor velocidade  $\vec{V}$  e o vetor campo magnético  $\vec{B}$  é chamado de ângulo de passo (pitch angle) " $\alpha$ ":

$$\alpha = \text{arc tg } v_{\perp}/v_{\parallel} , \quad (1.2)$$

onde:

$v_{\perp}$  = componente da velocidade da partícula  $\perp$  a  $B$ ,

$v_{\parallel}$  = componente da velocidade da partícula  $\parallel$  a  $B$ .

Ao movimento ciclotrônico está associada uma grandeza que permanece constante, denominada invariante adiabático, e que é válida sob certas condições.

#### - 1º invariante adiabático

O movimento helicoidal da partícula ao redor da linha de campo gera um momento magnético. Se o campo magnético não apresenta grande variação num tempo da ordem do período ciclotrônico e as varia

ções espaciais forem muito pequenas comparadas com o raio ciclotrônico, então o momento magnético deve permanecer constante.

### 1.2.2 - MOVIMENTO DE BALANCEAMENTO (MOVIMENTO DE "BOUNCING") AO LONGO DA LINHA DO CAMPO MAGNÉTICO

O movimento de balanceamento é aquele que a partícula descreve entre dois pontos de mesma intensidade ao longo da linha do campo magnético. A partícula, ao penetrar no campo geomagnético, encontra uma configuração tal que a intensidade do campo aumenta à medida que se afasta do equador. A análise da Equação 1.2 mostra que se o ângulo de passo for diferente de  $90^{\circ}$ , a velocidade da partícula tem uma componente paralela à direção do campo. Portanto, além do movimento ciclotrônico haverá um deslocamento ao longo da linha de campo. Como o momento magnético é constante, a componente perpendicular da velocidade da partícula irá variar de acordo com a mudança de B, e se a energia cinética total da partícula for constante tem-se:

$$\frac{\text{sen}^2 \alpha}{B} = \text{const.} \quad (1.3)$$

À medida que  $B$  aumenta,  $\text{sen}^2 \alpha$  também aumenta, atingindo um máximo em  $\alpha = 90^{\circ}$ . Neste ponto a componente paralela da velocidade ( $v_{\parallel}$ ) é nula e a partícula inverte seu movimento, percorrendo novamente a linha de campo até encontrar o valor de  $B$  que novamente anule sua velocidade. Os pontos onde a partícula inverte seu movimento são chamados pontos conjugados de reflexão ou pontos de espelhamento (mirror point). Considerando dois pontos da trajetória de balanceamento, um no equador, onde é mínimo ( $\alpha_0$ ), e outro no extremo da trajetória, onde é máximo ( $\alpha_m$ ), a Equação 1.3 fica

$$\frac{\text{sen}^2 \alpha_0}{B_0} = \frac{\text{sen}^2 \alpha_m}{B_m} \quad (1.4)$$

ou

$$B_m = \frac{B_0}{\sin^2 \alpha_0}, \quad (1.5)$$

onde:

$\alpha_m$  e  $B_m$  são respectivamente o ângulo de passo e o campo magnético no ponto de reflexão;

$\alpha_0$  e  $B_0$  o ângulo de passo e o campo magnético no equador.

Nota-se que para o primeiro invariante ser mantido, basta que  $B_m$  seja conservado.

O período de balanceamento, que indica o tempo de ida e volta da partícula ao mesmo ponto, é sempre maior que o período ciclotrônico. Para os elétrons, o período de balanceamento é de aproximadamente décimos de segundos, e para os prótons, da ordem de segundos.

Associado ao movimento de balanceamento da partícula tem-se o invariante longitudinal ou integral ( $J_i$ ), aqui denominado 2º invariante adiabático:

- 2º invariante adiabático

O ciclo completa que a partícula executa entre dois pontos de reflexão pode ser representado pela integral (Roederer, 1970):

$$J_i = P \int_{l_1}^{l_2} \sqrt{1 - \frac{B(l)}{B_m}} dl \quad (1.6)$$

onde  $P$  é o momento da partícula.

$$J_i = \text{const.} \quad (1.7)$$

A partícula ficará oscilando indefinidamente entre os dois pontos de reflexão.

### 1.2.3 - MOVIMENTO DE DERIVA (DRIFT) DA PARTÍCULA

Se uma partícula, num campo magnético, sofrer a ação de uma força externa, perpendicular ao campo, ela então apresentará um movimento de deriva perpendicular tanto à força quanto ao campo.

Para uma partícula que penetra no campo magnético terrestre, o movimento de deriva resultante será o movimento que ela efetua ao redor da Terra. As forças perpendiculares que atuam na partícula são decorrentes da curvatura, do gradiente do campo magnético, da gravidade e dos campos elétricos. O sentido do movimento final dependerá da carga da partícula: os elétrons deslocam-se para leste e os prótons para oeste.

O período de deriva resultante é o tempo gasto por uma partícula para dar uma volta completa ao redor da Terra, sendo sempre maior que o período de "balanceamento", com valores típicos de 1 hora para os elétrons e de 30 minutos para os prótons.

O invariante de fluxo ( $\psi$ ), apresentado a seguir, está associado ao movimento de deriva.

#### - 3º invariante adiabático:

Ele estabelece que o fluxo magnético, através da superfície  $\Omega$ , definida pela órbita da deriva longitudinal da partícula, é conservado:

$$\psi = \int_{\Omega} \vec{B} \cdot d\Omega = \text{const.} \quad (1.8)$$

Se o campo sofrer contração ou expansão, a integral de superfície invariante deve mudar de tal forma que mantenha  $\psi$  constante. Este invariante é importante no estudo de efeitos associados a variações lentas que ocorrem no campo geomagnético. Quando ocorrem tais variações os invariantes adiabáticos são conservados, ou seja, apesar de a partícula sofrer alterações em sua energia e posição, o processo é reversível. Para as variações rápidas, um ou mais invariantes adiabáticos são violados e a partícula passa a interagir com o meio. O processo é irreversível. Ao estudar partículas sob estas condições, utiliza-se a Teoria da Difusão, que será comentada na Seção 1.4.1.

### 1.3 - O SISTEMA B-L DE COORDENADAS OU COORDENADAS DE McILWAIN:

A representação do campo geomagnético, na forma dipolar, não é satisfatória para o estudo de partículas magneticamente presas. McIlwain (1961) elaborou um sistema de coordenadas considerado bastante adequado, onde o campo na aproximação multipolar equivale a um campo de dipolo. Este sistema utiliza como unidades a intensidade do campo magnético B e o parâmetro L, denominado parâmetro de McIlwain ou "shell parameter", que é função da quantidade I ( $I = J_i/2m$ , sendo  $J_i$  definido pela Equação 1,6) e do campo magnético B.

Se os invariantes adiabáticos são conservados, então os valores de I são os mesmos para todos os pontos da trajetória da partícula. Isto implica B e I constantes, formando uma "região magnética" sobre a qual a partícula se desloca. L pode então ser definido, utilizando as relações da teoria dipolar, onde I e B são funções de R, os quais por sua vez, estão relacionados por (Roederer, 1970):

$$R = r_0 \cos^2 \Lambda, \quad (1.9)$$

onde  $\Lambda$  é a latitude magnética.

Pode-se definir  $L$  em função  $\Lambda$  e da distância  $R$  ao centro da Terra:

$$L = \frac{R}{\cos^2 \Lambda}, \quad (1.10)$$

sendo  $L$  medido em unidades de raios terrestres.

A Figura 1.3 exemplifica este sistema de coordenadas.

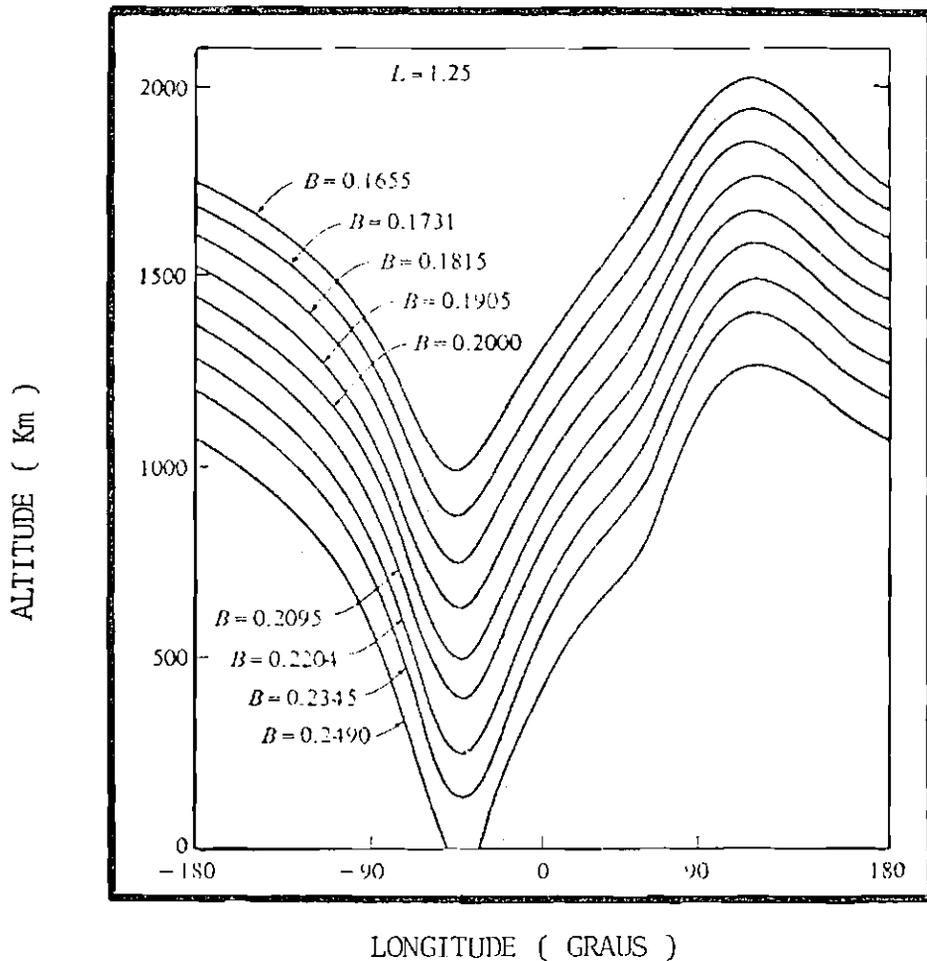


Fig. 1.3 - Variação da altitude com a longitude para vários "anéis" B-L.

FONTE: Hess (1968), p. 132.

#### 1.4 - OS CINTURÕES DE RADIAÇÃO

A interação de partículas carregadas com o campo geomagnético já era bem conhecida quando, em 1958, Van Allen e um grupo de colaboradores, analisando dados obtidos pelo satélite Explorer I, detectaram um aumento no fluxo de radiação que não era explicado pela contribuição de raios cósmicos. O grupo sugeriu que o aumento observado deveria estar associado a partículas carregadas presas ao campo magnético. Com base nas primeiras medidas foram detectadas duas regiões distintas de radiação, as quais receberam o nome de cinturões de radiação ou cinturões de Van Allen. A distinção entre as duas regiões, no entanto, foi consequência instrumental, pois os contadores Geiger possibilitavam apenas a detecção de partículas energéticas: prótons > 30 MeV e elétrons > 1,6 MeV. Posteriormente, com a detecção de partículas menos energéticas, foi possível perceber que os cinturões formavam apenas uma região, que apresentava, no entanto, características distintas entre as partes interna e externa, existindo entre elas uma estreita região (slot region), onde o fluxo de elétrons é extremamente baixo (Pfitzer et alii, 1966; Hess, 1968; Poervelein, 1972).

A região interna ( $L = 1,5$ ) é formada basicamente por prótons energéticos, cujo espectro de energia vai de 40 a 110 MeV. Estes apresentam um fluxo bastante estável, com um longo tempo de decaimento, da ordem de um ano. A maior parte dos elétrons existentes nesta região possui energia abaixo de 1 MeV. O fluxo natural não é bem conhecido, apresentando um tempo de decaimento da ordem de meses ou um ano. A região externa ( $L = 3,6$ ) possui partículas com energia menor. O fluxo de prótons é relativamente estável, porém os mais energéticos podem ser afetados durante tempestades magnéticas muito intensas. Já os elétrons apresentam um fluxo bastante variável, podendo aumentar em mais de uma ordem de grandeza, num intervalo de horas em períodos magneticamente perturbados. Medidas efetuadas a 1000 km de altitude mostraram uma precipitação contínua de elétrons, provenientes da região externa, mesmo em períodos magneticamente calmos, sugerindo desta forma a existência de equilíbrio entre a injeção e perda de partí

culas (Poeverlin, 1972). A Figura 1,4 esquematiza os cinturões de radiação e os três movimentos periódicos executados pelas partículas energéticas.

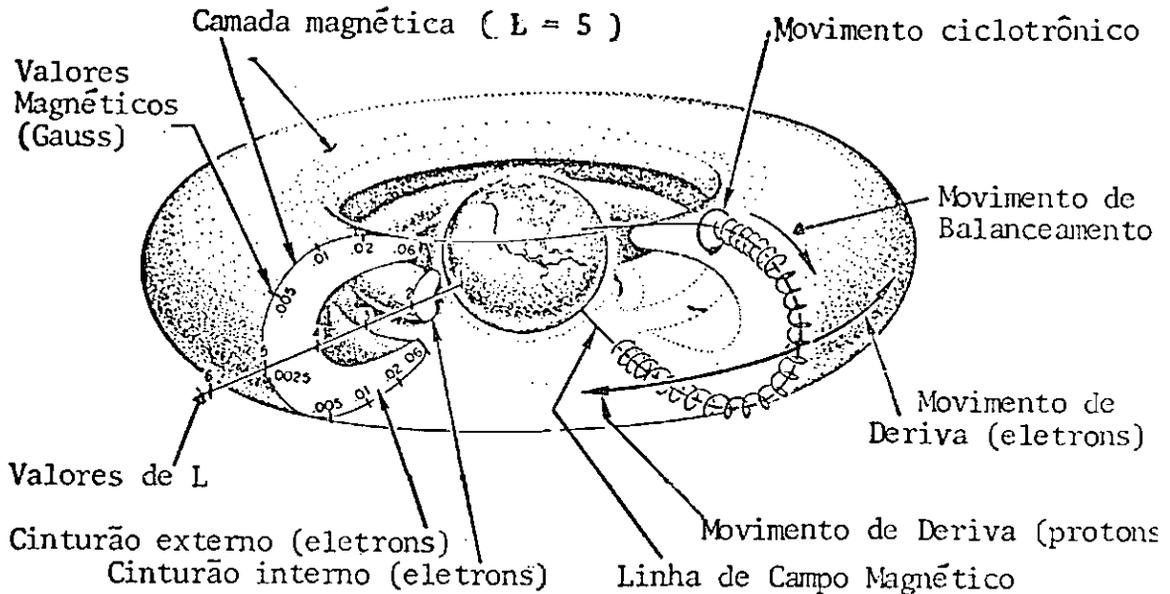


Fig. 1.4 - Os cinturões de radiação e os três movimentos periódicos das partículas energéticas no campo magnético.

FONTE: White (1970), p. 2.

Um melhor conhecimento das características dos cinturões de radiação foi obtido através da formação de cinturões artificiais, provocados por explorações nucleares em grandes alturas, em 1958. Foram efetuadas inúmeras medidas do fluxo e deslocamento das partículas, confirmando as predições teóricas tais como movimento de rotação ao longo da linha de campo entre os pontos de reflexão e deriva longitudinal (Dessler, 1959; Welch and Whithaker, 1959; Vernon and Chudakov, 1960; Kurnosova et alii, 1962).

O experimento "Starfish", em 1962, conseguiu formar um cinturão artificial muito semelhante ao real. Os elétrons distribuíram-se em diferentes alturas numa extensa região da magnetosfera e foi possível analisar o seu decaimento nesta região. No entanto, esta explosão provocou grande alteração nas condições do fluxo natural das

partículas para  $L < 2$ , chegando a aumentar em uma ou mais ordens de grandeza. Em algumas regiões o fluxo só retornou à condição de pré-explosão três anos mais tarde (Filz and Holeman, 1965). Medidas efetuadas entre julho de 1962 e fins de 1965 não podem ser consideradas como típicas para o uso na predição de efeitos aeronômicos para baixos valores de  $L$  (Gledhill, 1976).

As medidas de fluxo mostraram que o decréscimo da população de elétrons dos cinturões de radiação foi mais rápido do que o previsto, o que sugere a existência de outro mecanismo de perda associado ao espalhamento atmosférico (Kennel and Petschek, 1966; Roederer and Welch, 1966; Lyons et alii, 1972).

#### 1.4.1 - MECANISMOS DE INJEÇÃO E PERDA DE PARTÍCULAS ENERGÉTICAS

A principal fonte de partículas energéticas nos cinturões de radiação é o vento solar. Outras fontes tais como raios cósmicos galáticos, mésons produzindo elétrons, a componente neutra do vento solar e os prótons solares têm uma contribuição menor. Os nêutrons, conseqüência da colisão de raios cósmicos galáticos com núcleo de  $O_2$  e  $N$  na atmosfera, parecem ser a fonte responsável por prótons energéticos (40 - 110 MeV) na região interna do cinturão de radiação.

No entanto, não são os responsáveis pelos elétrons com energias de 40 e 110 MeV (Pizzella et alii, 1962). Luhmann e Vampola (1977) estudaram a origem e localização de fontes de elétrons nos cinturões de radiação, em períodos magneticamente calmos. Tais fontes estariam girando com a Terra, provavelmente na plasmasfera, com longitude entre  $45^\circ$  e  $180^\circ$ , as quais explicariam um grande número de observações.

A interação destas partículas carregadas com as partículas neutras do meio (ionosfera, atmosfera), com as flutuações de campos e com ondas eletromagnéticas, pode ser analisada pela teoria de difusão. A difusão ocorre quando um dos invariantes adiabáticos é violado.

O processo de difusão pode ser dividido em dois tipos:

- 1) difusão radial, que desloca as partículas perpendicularmente às camadas onde elas se movimentam (drifts shells);
- 2) difusão em ângulo de passo, que move as partículas ao longo das linhas de campo.

Estes processos controlam o balanço entre injeção e perda de partículas, a distribuição espacial e o espectro de energia das partículas presas.

A análise matemática da teoria de difusão é bastante complexa, pois existem muitos mecanismos físicos acoplados (por exemplo, interações coulombianas, espalhamentos, perdas de energia por excitação, ionização, etc.). Os trabalhos teóricos geralmente se baseiam na equação de Folker - Planck para estudar o comportamento cinético das partículas. Considera-se que o deslocamento de uma partícula de sua região de equilíbrio é consequência de inúmeras interações fracas com o meio, ao invés de uma única forte (Roederer, 1967; Boyd and Sander son, 1969).

### 1) Difusão radial

Como já mencionado, o efeito da difusão radial é o deslocamento perpendicular das partículas às regiões de deslocamento (drifts shells). Este processo é considerado o mais importante para a injeção de partículas carregadas provenientes do vento solar nos cinturões de radiação, o que provoca variações tanto na sua energia como na sua distribuição.

Dois tipos de aceleração de partículas estão associados a estes mecanismos: aceleração adiabática e não-adiabática. A primeira ocorre quando o campo magnético varia lentamente; a segunda está relacionada com variações bruscas do campo magnético ou de campos elétricos, sendo um processo irreversível, o qual provoca variações tanto na energia como na posição das partículas.

Este mecanismo de difusão atua sobre todo o espectro de energia ou apenas em energias selecionadas. É um processo contínuo na magnetosfera, sendo intensificado em períodos magneticamente perturbados (Schulz and Lanzerotti, 1974).

Os processos mais significativos que provocam a difusão radial são:

- a) Variações bruscas no campo magnético que ocorrem devido a contrações e expansões da magnetosfera, associadas à pressão do vento solar, durante tempestades magnéticas.
- b) Flutuações do campo magnético e elétrico que em geral ocorrem devido a variações de correntes elétricas na magnetosfera, plasmasfera ou ionosfera; também associadas a períodos magneticamente perturbados.
- c) Deslocamento da partícula de uma região para outra (shell splitting) que está associado à assimetria do campo magnético, sendo este um processo adiabático.

## 2) Difusão em ângulo de passo

A difusão em ângulo de passo é o mecanismo responsável pela mudança dos pontos de reflexão das partículas e representa o processo básico de deslocamento delas para a região de perdas na atmosfera. Pode ser caracterizada através de dois mecanismos:

- a) Espalhamento coulombiano (ou difusão colisional) que representa a interação das partículas carregadas com os constituintes atmosféricos. É um processo contínuo e provoca alterações tanto na órbita como na energia das partículas devido às sucessivas colisões.
- b) Difusão em ângulo de passo ressonante, que é o mecanismo das interações entre ondas e partículas e não um processo contínuo. Está associada à atividade magnética, uma vez que as ondas mag

netosféricas são originárias das instabilidades do plasma, das flutuações do campo magnético e das flutuações do campo elétrico. Para que ocorra a interação entre as ondas e as partículas, é preciso que elas tenham frequências próximas à frequência ciclotrônica ou à frequência de "balanceamento".

Os mecanismos de difusão descritos acima são os responsáveis pelo fluxo das partículas nos cinturões de radiação. Dependendo da energia e da localização das partículas, esses processos podem acelerar o deslocamento para dentro da região de perdas, ocorrendo finalmente a precipitação. O domínio de um processo ou de outro irá depender da natureza da partícula.

Para os prótons, a remoção dos cinturões de radiação ocorre principalmente por perda de energia. Devido à sua massa, a deflexão angular das partículas pode ser desprezada ao estudar seu espalhamento atmosférico.

Prótons de alta energia são removidos do cinturão interno de radiação através de colisões com os constituintes atmosféricos, os quais provocam um amortecimento das partículas até que atinjam uma energia aproximada de 100 keV,

Para os prótons com energia  $< 100$  keV, o processo mais significativo é a troca de carga com átomos de hidrogênio (Poervelein, 1972).

Os processos responsáveis pela remoção de elétrons são bem diferentes. Por serem mais leves que os prótons, são espalhados mais facilmente para dentro da região de perdas através de interações coulombianas com os constituintes atmosféricos. Estes provocam mudanças drásticas em sua trajetória, e é necessário utilizar a Teoria de Difusão para calcular a sua distribuição espacial (Roederer, 1967).

A interação das partículas com a atmosfera é mais intensa nos pontos de reflexão, e alguns fatores podem contribuir para intensificar esta interação; por exemplo, a atividade solar que altera a densidade eletrônica da atmosfera nas mais variadas alturas ou as anomalias geomagnéticas onde irregularidades na intensidade do campo provocam o deslocamento dos pontos de reflexão para alturas onde a atmosfera é mais densa.

#### 1.5 - A ANOMALIA GEOMAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL (SAGA - SOUTH ATLANTIC GEOMAGNETIC ANOMALY)

As anomalias de grande escala do campo geomagnético são consequência da distribuição assimétrica das correntes elétricas no interior da Terra, o que produz uma intensidade de campo magnético local muito diferente da produzida por um dipolo magnético. Roederer (1972), através do modelo de multipolo para o campo geomagnético, mostrou que através dos termos de quadripolo é possível prever duas regiões onde o valor do campo é mínimo: uma para baixos e outra para altos valores de L.

A região englobada como Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul (SAGA) não é bem definida, variando de acordo com os parâmetros considerados. A interpretação mais comum é a que se refere a baixos valores do campo magnético com o mínimo na costa leste do Brasil. A intensidade do campo que deveria ser da ordem de 0,5G é aproximadamente 0,25G no centro da anomalia. Em altitudes de 300 km encontram-se valores em torno de 0,22G, que normalmente são valores de B para altitudes de 1.500 km sobre a mesma coordenada L (Coutinho, 1973; Gledhill, 1976). Em termos do parâmetro L, a SAGA pode ser dividida em dois setores: altos valores de L, que coincidem com a região de precipitação de prótons (Anomalia da África do Sul,  $3,5 \leq L \leq 5,5$ ), e baixos valores de L, coincidentes com a região de precipitação de elétrons (Anomalia Magnética Brasileira,  $1,1 \leq L \leq 1,2$ ).

Através dos dois primeiros invariantes adiabáticos é possível estabelecer a trajetória das partículas quando estas apresentam movimento de deslocamento ao redor da Terra. Considerando os valores que o campo magnético apresenta na região da SAGA, pode-se concluir que as partículas terão seu ponto de reflexão em altitudes menores (Hess, 1968); conseqüentemente aumenta a probabilidade de as partículas carregadas interagirem com os constituintes atmosféricos, através do espalhamento coulombiano.

A Figura 1.5 mostra a altura dos pontos de espelhamento para uma da da partícula nos dois hemisférios. Pode-se observar que uma partícula localizada em  $L = 1,15$ , com ponto de reflexão em  $B = 0,24$  G, no Hemisfério Norte, irá se refletir numa altura de 420 km, enquanto para a região da Anomalia ela irá encontrar o seu ponto de reflexão muito abaixo de 100 km, ocorrendo, portanto, sua precipitação.

Os primeiros cálculos de precipitação de partículas do cinturão de radiação, na região do Atlântico Sul, foram feitos por Welch e Whitaker (1959), quando estimaram a velocidade de difusão, utilizando dados do experimento Argus (detonação de três bombas nucleares). Dessler (1959) observou deriva longitudinal das partículas sobre a região de Capetwon, África do Sul, e sugeriu que a perda de partículas através da interação com a atmosfera neste setor poderia ser responsável pela região de baixa densidade de elétrons (slot region) que separa os cinturões de radiação. Atualmente, entretanto, acredita-se que a precipitação sobre uma área muito mais extensa tem como fator principal a interação ressonante entre ondas e partículas (Lyons et alii, 1972; Lyons and Thorne, 1973).

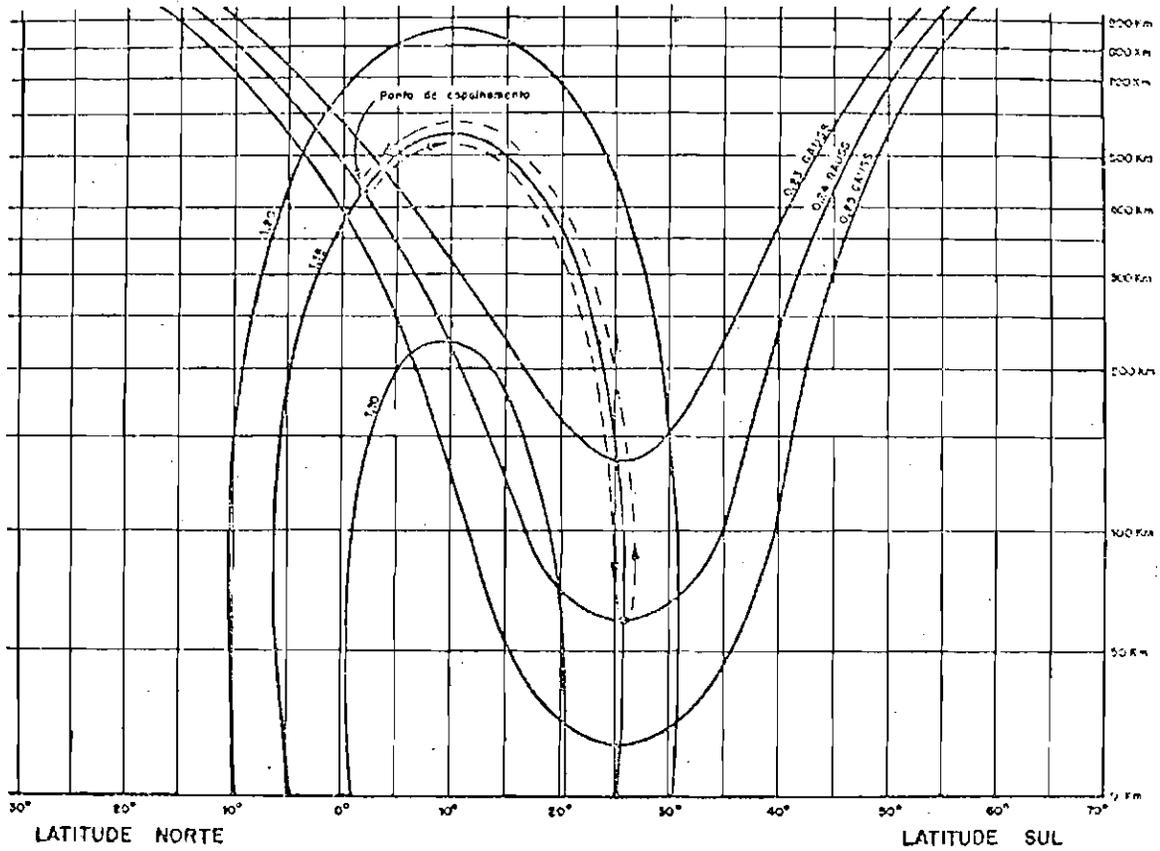


Fig. 1.5 - Diagrama B e L para longitude de  $45^{\circ}$  que mostra os pontos de reflexão para uma partícula localizada em  $L = 1,15$ .

FONTE: Coutinho (1973), p.23.

Muitos trabalhos teóricos e experimentais foram desenvolvidos para compreender a SAGA, e a mais importante revisão destes estudos foi feita por Glendhill (1976) que analisa as previsões teóricas para as possíveis regiões de precipitação de partículas, como também os apontamentos feitos por satélites a 300 km e 650 km de altura. Os efeitos aeronômicos produzidos na SAGA, decorrentes da precipitação de elétrons, são discutidos; como por exemplo o aumento da luminescência atmosférica (airglow), o aumento no fluxo de raios X (energia entre 20-60 keV e 60-150 keV) e raios gama devido a bremsstrahlung, associados a elétrons energéticos ( $E > 7$  MeV). Mostrou-se que a concentração iônica

na região da anomalia é maior do que em outras regiões. Existem diferenças na composição iônica, as quais afetam principalmente  $O^+$ ,  $N^+$  e  $He^+$ , como também evidências de que tanto a temperatura dos elétrons como da atmosfera são superiores nesta região.

Elétrons de diferentes energias, cujo ponto de reflexão permanece acima de 350 km de altura sobre a região da anomalia, não são perturbados. Porém, 90% dos que alcançam altitudes entre 300 km e 100 km têm suas energias depositadas em diferentes alturas, o que produz diferentes efeitos aeronômicos.

Os elétrons com energia  $< 1$  keV estão presentes na região F (~ 300 km). Para energias entre 1 e 30 keV a interação ocorre na região E (~ 100 km), e elétrons com energia  $> 30$  keV irão alcançar a região D (~ 90 km) (Rees, 1963; Berger et alii, 1970; Glendhill and Hoffman, 1981).

Zmuda (1966) mostrou que elétrons com 40 keV na altitude entre 90 e 100 km, com fluxo  $\geq 10$  part/cm<sup>2</sup>.s, são dominantes durante o período noturno. Para elétrons com 300 keV, um fluxo 10 part/cm<sup>2</sup>.s é a fonte dominante de ionização em 74 km durante o dia.

Torr et alii (1975), através de estudo teórico, prevêem a precipitação de elétrons para a região que se estende desde o sudeste da América do Sul até quase a Antártica, ao sul da África. Os prótons precipitam-se numa região menor ao sul da África.

O fluxo de prótons apresenta diferentes perfis com a altura, durante os períodos de máxima ou mínima atividade solar. McIlwain (1963) observou um aumento na intensidade do fluxo de prótons aprisionados em baixas altitudes, perto da época de mínima atividade solar. O mesmo resultado foi obtido por Van Allen (1963). Analisando os dados obtidos por satélites, correlacionou-se o aumento do fluxo de prótons em baixas altitudes com a injeção de prótons originários das interações de nêutrons provenientes de raios cósmicos, reforçando assim sua teoria sobre a origem dos prótons energéticos na região interna do cin

turão de radiação, Contudo, Zmuda (1966), analisando o fluxo de prótons na região da anomalia durante tempestades magnéticas, não observou nenhum aumento significativo nele. A quantidade de prótons existentes na SAGA é muito menor do que a dos elétrons, os quais porém, possuem energia muito maior (Freden and Paulikas, 1964; Paulikas, 1975).

#### 1.5.1 - O COMPORTAMENTO DOS ELÉTRONS NA SAGA

As partículas presentes na Anomalia Magnética Brasileira são transportadas das regiões mais externas da magnetosfera, através da difusão radial, permanecendo aprisionadas no cinturão interno de radiação até sua precipitação.

O fluxo de elétrons é contínuo, sendo intensificados em períodos magneticamente ativos, O espectro de energia destes elétrons apresentará diferentes estruturas, dependendo dos mecanismos de difusão predominantes. Estes mecanismos podem atuar sobre o espectro ou apenas em energias selecionadas. Para períodos magneticamente calmos o espectro será monotônico e decrescente e para períodos perturbados, aparecerão picos sobrepostos (Imhof and Smith, 1966). A Figura 1.6 ilustra uma das primeiras observações de picos em baixos valores de L. Cladis (1966) atribuiu a formação desses picos a flutuações no campo magnético decorrentes de variações do eletrojato equatorial.

Durante as tempestades magnéticas os mecanismos de difusão são dominantes que aumentam a injeção de elétrons na anomalia são: variações bruscas do campo magnético, flutuações do campo magnético e flutuações do campo elétrico.

Roederer (1970) mostrou que a influência de uma tempestade magnética sobre a partícula irá depender de sua posição em termos de tempo local durante a fase inicial (sudden commencement). Se o elétron se encontrar do lado diurno da Terra, este ficará no final da tempestade com mais energia e com altura mais baixa; se, do lado noturno, o comportamento será inverso. Mostrou também que a velocidade de deriva dos elétrons é maior do lado noturno do que do diurno e, portanto, a probabilidade de o elétron se encontrar do lado diurno é maior. Conse

qüentemente, o efeito da tempestade magnética sobre os elêtrons será de aceleração das partículas e abaixamento dos pontos de reflexão.

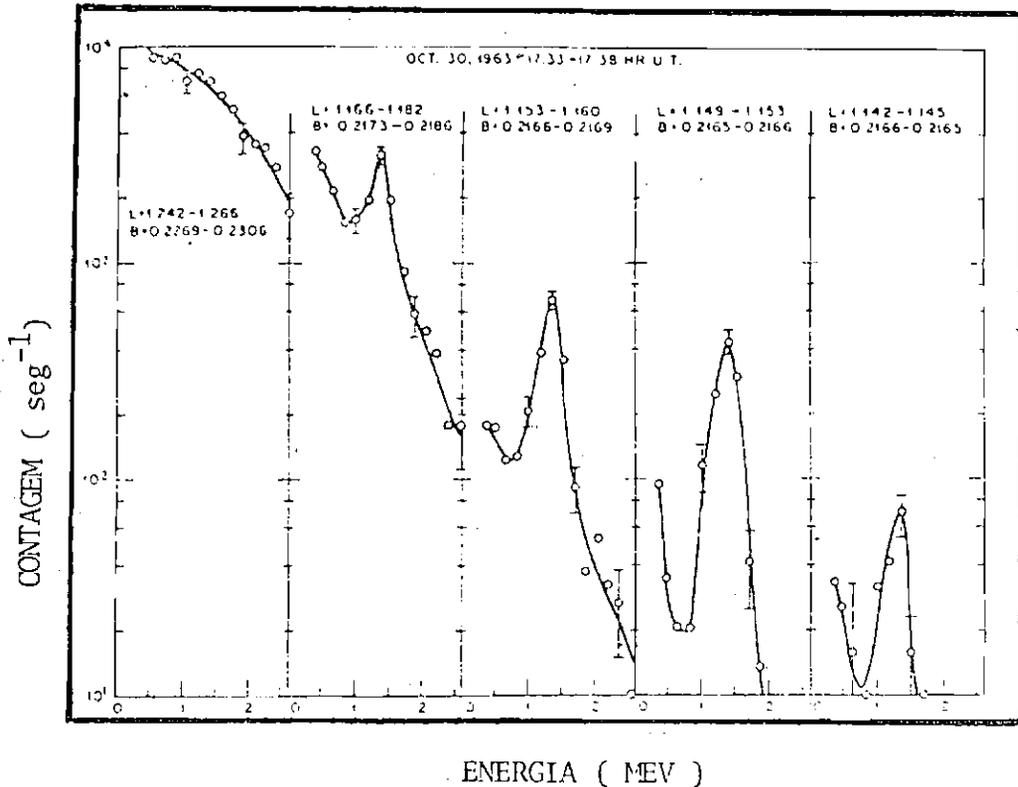


Fig. 1.6 - Espectros de elêtrons medidos.

FONTE: Imhof and Smith (1966), p. 107.

Schulz e Lanzerotti (1974), estudando a variação temporal do fluxo de elêtrons durante tempestade magnética, evidenciaram que o efeito das variações do campo atua principalmente nos elêtrons que têm seus pontos de reflexão próximos ao equador. O tempo de vida do elêtron varia diretamente com a energia e inversamente com o valor de  $L$ . A Figura 1.7 ilustra tal fato.

Geralmente as flutuações do campo magnético estão associadas a variações de correntes elétricas na magnetopausa ou na ionosfera, as quais ocorrem em períodos de atividade magnética. Estas flutuações provocam difusão radial através de interações ressonantes com elêtrons na frequência de deriva. A ressonância na frequência de balanceamento ainda não é bem conhecida. Segundo cálculos de Schulz e Lanzerotti (1974) a sua influência é desprezível. A interação ocorre, por

tanto, para determinadas energias, o que provoca o aparecimento dos picos anteriormente citados no espectro de elétrons.

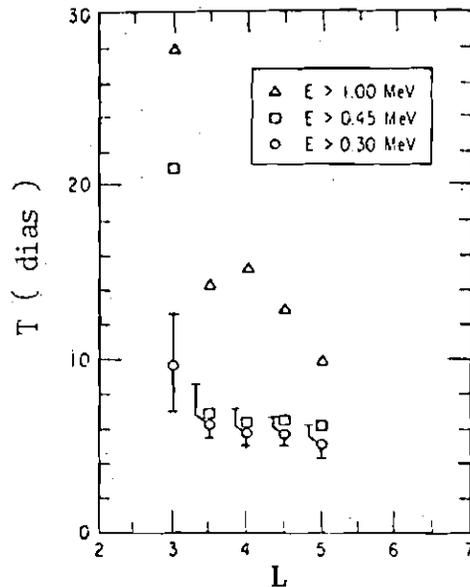


Fig. 1.7 - Tempo de vida de elétrons.

FONTE: Schulz and Lanzerotti (1974),  
p. 124.

As flutuações do campo elétrico sempre ocorrem em períodos magneticamente ativos. O estudo destas flutuações mostra que elas atuam principalmente em elétrons pouco energéticos (Schulz and Lanzerotti, 1974).

O mecanismo responsável pela remoção de elétrons dos cinturões de radiação é a difusão em ângulo de passo. A difusão dos elétrons na atmosfera provoca espalhamento e perda de energia.

Paulikas (1975) mostrou que um elétron, embora interagindo com as partículas do meio, permanece aprisionado durante vários movimentos de deriva, desde que não atinja uma região crítica por volta de 100km. A partir deste nível o elétron estaria penetrando no cone de

perdas, violando os invariantes adiabáticos e fazendo ocorrer a pre  
cipitação (Berger and Seltzer, 1964; 1972),

Se os elêtrons com altas energias colidem com elêtrons livres ou com elêtrons pertencentes a átomos, eles perdem parte de sua energia em um processo que eventualmente os remove da população dos cin  
turões de radiação.

Em colisão com os núcleos, os elêtrons não perdem ener  
gia, mas são espalhados. Esses espalhamentos acumulados causam mudan  
ça no ângulo de passo da partícula; como resultado ocorre um decrêsci  
mo monotônico de energia acompanhado de difusão.

Para a região acima de 100 km, devido à baixa densidade, a perda de energia por radiação pode ser desprezada (Berger et alii, 1970). A perda de energia ocorre por ionização e excitação através de colisões com elêtrons orbitais.

A evolução temporal do espectro de elêtrons aprisionados até a precipitação (~ 100 km) adquire uma forma exponencial decrescente (Imhof and Smith, 1966). Berger e Seltzer (1964), estudando a difu  
são em energia do elêtron, encontraram que elêtrons com energia  $\leq 10$  KeV não alcançam a região de precipitação. Entretanto, Potemra e Rosenberg (1973), através de evidências experimentais, mostraram a possibi  
lidade da presença de elêtrons com energia  $\leq 10$  KeV para uma altura de 85 km.

O fluxo de elêtrons nessa região não é bem conhecido: en  
tão costuma-se estimar valores médios, a 100 km de altura, da ordem de  $10^3$  a  $10^6$  e/cm<sup>2</sup>.s (Imhof and Smith, 1966; Paulikas et alii, 1966; Imhof, 1968; Imhof et alii, 1973, 1974, 1974a, 1978; Torr et alii, 1973; Vampola and Gorney, 1983).

Outro fator importante para o estudo da difusão de elê  
trons é seu tempo de vida, Entretanto, considerando apenas o espalha

mento atmosférico, ocorre discrepância entre as medidas de fluxo obtidas e os valores esperados. Isto sugeriu que outro processo de difusão, além do espalhamento coulombiano, deveria ser associado ao fenômeno. Este outro mecanismo seria a difusão em ângulo de passo ressonante (Pfitzer et alii, 1966; Lyons et alii, 1972; Lyons and Thorne, 1973; West et alii, 1973). Como já foi visto, tal processo é dependente da atividade magnética e da frequência de balanceamento ou "frequência ciclotrônica". Apenas a interação ressonante na frequência ciclotrônica é considerada significativa. No caso do elétron, para ocorrer a interação entre onda e partícula, a onda deve ser polarizada a direita (Roberts, 1966).

Durante tempestades magnéticas, o fluxo dos elétrons aumenta para todos os valores de  $L$ . O tempo de decaimento para  $1,2 < L < 2$  é em torno de 200 a 300 dias, levando a uma precipitação contínua. No entanto, para  $L \leq 1,18$ , a precipitação ocorre em menos de um dia. Próximo à região auroral o decaimento é instantâneo; em  $L = 3$  leva poucos dias e para  $L = 2$  o decaimento leva dez dias (Craven, 1966; Imhof et alii, 1967; Gough, 1975; Rose e Sanders, 1979). A Figura 1.8 ilustra o tempo de vida para os elétrons devido ao espalhamento atmosférico. A curva representa medidas de vários anos obtidas através de satélites em 4 diferentes órbitas (Roberts, 1968).

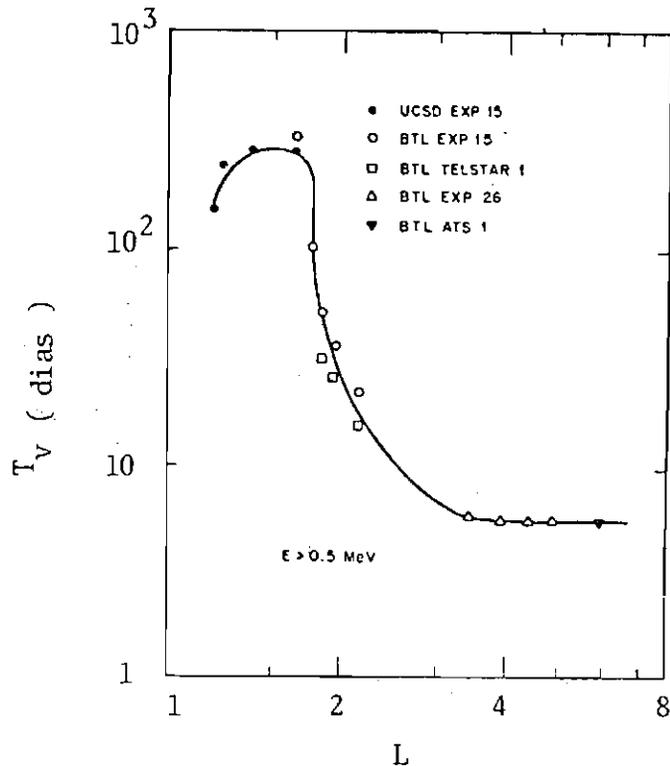


Fig. 1.8 - Tempo de vida para elētrons devido unicamente ao espalhamento atmosférico.

FONTE: Schulz and Lanzerotti (1974), P. 125.

## 1.6 - OBJETIVO DO PRESENTE ESTUDO

Este trabalho analisa a interação dos elētrons com a baixa ionosfera, durante tempestades magnéticas, na região da Anomalia Magnética Brasileira ( $1,15 \leq L \leq 1,5$ ). Um estudo sistemático de 6 anos, abrangendo meio ciclo solar (1976 a 1981), permitiu a determinação de alguns parâmetros desta região.

No Capítulo 2 são apresentadas de forma sucinta as técnicas e os critérios utilizados para a análise dos dados experimentais.

As principais características dos resultados observacionais são analisados no Capítulo 3, onde é feita também uma comparação

entre duas técnicas distintas (propagação de ondas de VLF a longa distância e sondagem oblíqua em VLF/LF) para duas tempestades magnéticas de 1981.

Determinou-se a densidade eletrônica para o período considerado, como também o fluxo e a energia dos elétrons necessários para explicar as observações (Capítulo 4).

Finalmente, uma análise geral da variação das características da baixa ionosfera associada à anomalia magnética, durante período magneticamente ativos é apresentada no Capítulo 5.

## CAPÍTULO 2

### TÉCNICAS UTILIZADAS E APRESENTAÇÃO DOS DADOS OBSERVACIONAIS

As ondas de rádio em frequência muito baixa, denominadas de VLF (Very Low Frequency: 3-30 KHz), podem ser utilizadas para o estudo das propriedades físicas da baixa ionosfera (região D - 70 km - 90 km). São bastante estáveis no tempo e, como são pouco atenuadas, possibilitam a propagação da energia em distâncias de até 20.000 km.

A parte observacional deste trabalho, baseou-se em dados de fase e amplitude de sinais de VLF recebidos no Rádio Observatório de Itapetinga, Atibaia, São Paulo (23°S; 46°W), cuja estação transmissora Ômega-Argentina localiza-se em Comodoro Rivadavia-Argentina (43°S; 65°W) e a trajetória do sinal passa pelo centro da Anomalia Geomagnética Brasileira, a qual cobre uma distância de 2,8 Mm ( $1,15 \leq L \leq 1,5$ ).

Utilizaram-se também dados a ionossonda oblíqua de VLF e LF (Low Frequency), pertencente ao CTA-IAE, com o transmissor localizado em Paula Freitas, Paranã (26°S; 51°W) e o receptor em Gaspar, Santa Catarina (26° 55'S; 48° 56'W), situado a 218 km do transmissor (Figura 2.1).

#### 2.1 - TÉCNICAS UTILIZADAS

##### 2.1.1 - PROPAGAÇÃO DE VLF À LONGA DISTÂNCIA

São utilizados receptores TRACOR, no modelo comercial, que permitem registrar variações de fase em relação a um padrão de frequência de Césio, com precisão de 1  $\mu$ s/dia e variações de amplitude numa faixa de 40 dB.

As frequências de 10,2 KHz e 13,6 KHz do sistema Ômega ( $\Omega$ ) de transmissão, consistem em pulsos irradiados a cada 10 segundos.

Estes sinais se propagam no guia de Onda Terra-Ionosfera e qualquer perturbação que ocorra na baixa ionosfera irá provocar um avanço ou um atraso de fase do sinal recebido.

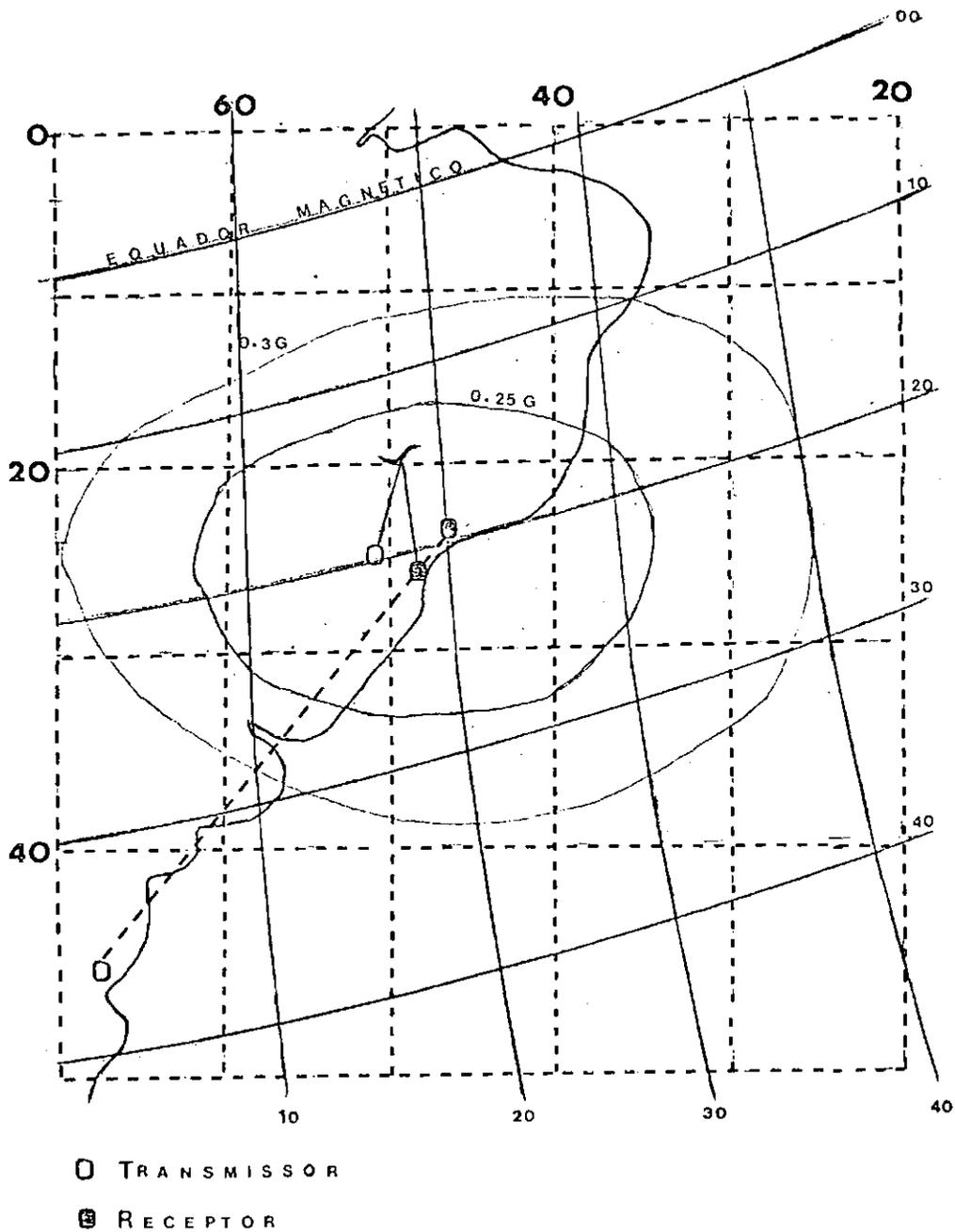


Fig. 2.1 - Trajetória  $\Omega$ -Argentina/Atibaia (-----), Paula Freitas - Gaspar (——) e coordenadas magnéticas sobrepostas à coordenadas geográficas.

FONTE: Carta Magnética do Brasil - Observatório Nacional - MEC, 1980.

### 2.1.2 - SONDAGEM OBLÍQUA EM LF/VLF (20 KHZ A 60 KHZ)

Esta técnica consiste em um transmissor que gera pulsos de curta duração, de 54 ( $\mu$ s), os quais correspondem a uma frequência irradiada de 37 KHz, com período de repetição de 1263  $\mu$ s.

A transmissão pulsada permite a recepção de duas ondas (onda inosférica e onda terrestre) perfeitamente separadas no tempo. A diferença do tempo de chegada entre as duas fornece a altura de reflexão de grupo da ionosfera e a diferença de amplitude fornece o coeficiente de reflexão da onda.

### 2.2 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Foram analisados os efeitos na região D de 40 tempestades magnéticas no período de 1976 a 1981. A escolha deste período permitiu a melhor compreensão da variação da baixa ionosfera associada à Anomalia Magnética Brasileira em diferentes fases da atividade solar.

A seleção de tempestades foi feita através da análise do índice magnético Dst, que indica a variação da componente horizontal do campo magnético. A classificação por intensidade da variação do campo seguiu o seguinte critério: forte, quando  $|Dst| \geq 200 \gamma$ ; moderado, para  $50 \gamma \leq |Dst| \leq 200 \gamma$ ; fraca, se  $|Dst| \leq 50 \gamma$ ; e preferencialmente com um intervalo de 5 dias calmos ( $\sum K_p \leq 15$ ) antes do início da perturbação do campo.

As variações diurnas de fase estão representadas em intervalos de 15 minutos e são comparadas com a média dos dias magneticamente calmos que antecederam aos dias perturbados.

O transmissor Ômega-Argentina começou a operar em 1976, não apresentando uma transmissão muito regular. Neste período foram analisadas 7 tempestades magnéticas e selecionadas as do dia 26 de março e 19 de maio, ambas com dados de fase na frequência de 10,2 KHz. Na mes

ma figura estão representadas a variação diurna da fase (linha cheia), a média dos dias calmos (linha pontilhada), o índice magnético Dst e a  $\Sigma K_p$ , em função do tempo universal (T.U.). O desvio padrão ( $\sigma$ ) está também representado. Esta forma de representação foi adotada para todos os casos apresentados.

Para 1977 foram selecionadas as tempestades de 29 de julho e a do dia 10 de dezembro, ambas analisadas em 13,6 KHz.

O ano de 1978 está representado pelas tempestades de 03 de janeiro, 27 de agosto e 20 de setembro, todas com dados de fase em 13,6 KHz e também pela tempestade de 12 de dezembro que foi estudada simultaneamente em 10,2 KHz e 13,6 KHz.

Em 1979 a recepção foi feita o ano todo com as duas frequências (10,2 KHz e 13,6 KHz) e portanto, as tempestades selecionadas foram em maior número (ao todo 6): 02 de fevereiro; 25 de abril; 6 de junho; 3 de julho; 20 de outubro; e 30 de novembro.

Para 1980 apenas uma tempestade foi escolhida, 02 de fevereiro, com dados de fase também em 10,2 KHz e 13,6 KHz.

Em 1981 só foi recebida a frequência de 13,6 KHz e as tempestades representadas são: 13 de abril e 08 de maio. Estas duas tempestades são também analisadas através dos dados da ionosonda oblíqua de VLF/LF. Dois parâmetros da ionosfera são apresentados: a altura de reflexão (km) em função do tempo universal, para as frequências de 25 KHz, 35 KHz e 55 KHz, e o coeficiente de reflexão em função da frequência. Os dias considerados estão representados pela linha contínua e a média dos dias calmos pela linha pontilhada.

Foi adotado um intervalo de 10 minutos para a leitura dos dados e o critério para a escolha dos dias não perturbados foi o mesmo para os dados de VLF se propagando a longa distância.

Esta forma de representação é a mesma para a tempestade de maio.

## CAPÍTULO 3

### PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS OBSERVAÇÕES EXPERIMENTAIS

Uma rápida revisão de alguns aspectos do comportamento da baixa ionosfera durante tempestades magnéticas é feita a seguir.

#### 3.1 - A IONOSFERA EM LATITUDES MÉDIAS:

É bem conhecido que distúrbios magnéticos são acompanhados por fenômenos aurorais (latitudes altas) e por grandes variações no conteúdo eletrônico da ionosfera (latitudes médias e altas). Sabe-se também que o aumento da densidade eletrônica nestas regiões modifica significativamente a propagação de ondas de rádio. Do ponto de vista experimental, as primeiras observações de perturbações na ionosfera em comunicações devido a estes distúrbios foram feitas por Espenshied et alii (1926), Anderson (1928) e Hafstad e Tuve (1929). Em latitudes médias, os distúrbios mais pronunciados foram observados nas regiões F e D (Ratcliffe and Weekes, 1960).

A região D tem sido extensivamente estudada através de observações nas mudanças das características das ondas de VLF e LF, as quais são sensíveis indicadores de pequenas modificações na ionização (Belrose, 1964; Lauter et alii, 1965; Nestorov et alii, 1966; Belrose and Thomas, 1968; Potemra and Zmuda, 1970; Gough and Collin, 1973; Potemra and Rosenberg, 1973; Spjeldiik and Thorne, 1975; Muraoka, 1979; Rosen and Sanders, 1979; Manzano et alii, 1981).

Os trabalhos mais completos que utilizam dados de L.F. (245 KHz) estudaram detalhadamente os efeitos de tempestades magnéticas numa trajetória de curta distância (180 km), na Alemanha, os quais englobam um período de 18 anos (Lauter et alii, 1965; Lauter and Knuth, 1967).

As características comuns mais importantes reveladas por estes estudos são:

- a) O sc da tempestade magnética nunca foi acompanhado por nenhuma mudança significativa no comportamento do sinal de LF.
- b) Observações noturnas mostraram quedas rápidas e profundas do sinal durante a fase principal da tempestade. Foram denominadas, por Belrose and Thomas (1968), efeitos primários da tempestade (Primary Storm Effect). Durante o dia não foi observada nenhuma perturbação.
- c) Para tempestades intensas, observaram-se durante a noite efeitos de ionização extra, 3 a 4 dias após o início da tempestade. Foram denominados efeitos pós-tempestade (Storm after-effect) (Belrose and Thomas, 1968). Estes efeitos podem durar até 12 dias. A maior parte dos eventos analisados revelou uma duração média acima de 7 dias.
- d) Medidas em 50 e 160 KHz (Watts e Brown, 1950, 1951; Lindquist, 1953) e em 200 KHz (Belrose and Thomas, 1968) mostraram que durante tempestades menos intensas o nível de reflexão move-se de altura normais (90-100 km) para alturas próximas a 150 km, o que sugere o desaparecimento da camada E noturna, normalmente responsável pela reflexão destas ondas. Resultado semelhante foi encontrado por Manzano et alii (1981), os quais analisaram simultaneamente as regiões F, E e D entre as latitudes (27°S - 52°S).
- e) O efeito pós-tempestade foi observado principalmente após tempestades com  $\Sigma K_p > 40$ . Não foi encontrada nenhuma associação entre o aumento da ionização e a ocorrência de PCA (Polar Cap Absorption), ou seja, absorção pelas calotas polares (Lauter and Knuth, 1967).

As características descritas anteriormente foram também encontradas em outras trajetórias e não somente em LF (Belrose, 1964). Estudos de propagação de VLF tanto para curta como longa distância mostraram efeitos semelhantes (Belrose, 1964; Belrose and Thomas, 1968; Potemra and Rosenberg, 1973; Gough and Collin, 1973; Muraoka, 1979 e Manzano et alii, 1981).

### 3.2 - A IONOSFERA NA REGIÃO DA ANOMALIA MAGNÉTICA BRASILEIRA

A Anomalia Magnética Brasileira tem sido estudada através das mais diferentes técnicas, o que possibilita uma visão do comportamento de todas as camadas da ionosfera. Um dos trabalhos pioneiros sobre a densidade eletrônica nesta região foi feito por Mendonça (1965) que analisou pela primeira vez o conteúdo eletrônico total (C.E.T.), através de dados obtidos pelo satélite ANNA 1B durante a sua passagem por São José dos Campos, São Paulo, em abril e maio de 1963. Observou-se um aumento significativo na densidade eletrônica que foi atribuída a elétrons energéticos do cinturão de radiação artificial produzido pelo experimento nuclear Starfish, realizado 10 meses antes. Massambani (1977) analisou o CET, para o ano de 1976, que abrangeu diferentes atividades magnéticas e comparou os resultados obtidos em São Paulo, localizada na anomalia magnética, com os dados obtidos em Natal, Rio Grande do Norte; Paula et alii (1983) analisaram o CET durante algumas tempestades magnéticas de 1980, através de dados de rotação Faraday, obtidos em São José dos Campos, e discutiram as possíveis causas do aumento (fase positiva) e da diminuição (fase negativa) do conteúdo eletrônico observado. Martin et alii (1974) analisaram, através de dados de ionossonda vertical, acréscimo de ionização na camada F, que foi associado a um aumento do fluxo de elétrons com energia  $<40$  KeV.

A região E tem sido analisada através do estudo do comportamento da camada E esporádica (Es). Batista e Abdu (1977) e Abdu et alii (1973, 1977, 1981) encontraram um significativo aumento da camada Es, durante períodos magneticamente ativos, na região de São José dos Campos, São Paulo, que se encontra próxima ao centro da anomalia. Os resultados encontrados foram associados à precipitação de partículas do cinturão interno de radiação. Nunes (1982), utilizando dados de ionossonda vertical, localizada em Gaspar, Santa Catarina (centro da SAGA), estudou o comportamento da camada E noturna (90 - 150 km), para o período do segundo semestre de 1980. A alta concentração encontrada durante períodos perturbados ( $10^5$  elétrons/cm<sup>3</sup>), em relação ao período quiescente ( $10^4$  elétrons/cm<sup>3</sup>), foi atribuída a elétrons precipitados na região.

A análise da densidade eletrônica da região D durante tempestades magnéticas tem sido feita através do estudo do comportamento de sinais de VLF que se propagam a longa distância. Mendes et alii (1970) analisaram 13 tempestades magnéticas associadas aos PCAs, no período de 1966 a 1968, em diversas trajetórias, que cobriam diferentes latitudes geográficas. Foi observado que mesmo em um trajeto de baixa latitude ocorreu um avanço de fase bem definido. Os resultados mostraram boa correlação entre as anomalias e a detecção de prótons. Efeitos associados à precipitação de elétrons foram cogitados. Outros estudos foram feitos em épocas magneticamente ativas (Mendes and Ananthakrishnan, 1972; Ananthakrishnan and Hackradt, 1972; Abdu et alii, 1973; Trivedi et alii, 1973; Gough, 1975). No entanto, estes estudos foram baseados em dados cujo trajeto de propagação é muito longo em relação à extensão da Anomalia Magnética Brasileira. Abdu et alii (1981) estudaram algumas tempestades magnéticas que ocorreram nos anos de 1977 e 1978, utilizando dados de fases de sinais de VLF, em cuja trajetória, Golfo Nuevo, Argentina a Atibaia, SP, encontra-se quase toda na região da anomalia. Analisaram também, para o mesmo período, medidas da camada Es sobre Cachoeira Paulista, São Paulo. Os resultados mostraram que a ionização decorrente de elétrons precipitados inicia-se numa região a aproximadamente 110 km de altitude, a qual se estende para regiões mais baixas (70 km). Tanto as perturbações na fase do sinal de VLF como o aumento na ocorrência da camada Es foram observados 1 a 3 dias após o início da perturbação do campo.

A presença de elétrons mais energéticos ( $E > 7,5$  Mev) foi estimada através da análise do fluxo de raio-X e raios gama obtidos por detectores localizados em balão estratosférico (altura de 40 km) na região de São José dos Campos, SP (Martin et alii, 1972, 1974; da Costa, 1981).

Estes estudos permitiram a definição de alguns parâmetros ionosféricos na região da anomalia durante períodos magneticamente perturbados, porém, através deste trabalho, realizado de forma sistemática, o qual cobriu um período de 6 anos, é que foi possível obter maiores informações da baixa ionosfera nesta região.

### 3.3 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS OBSERVADAS

A análise do comportamento do sinal de VLF durante as tempestades magnéticas, para a trajetória  $\Omega$ -Argentina/Atibaia, permitiu uma seleção dos períodos da seguinte forma:

- a) Períodos em que o sinal de VLF apresentou atraso e avanço de fase em relação à média dos dias magneticamente calmos.
- b) Períodos em que a perturbação da fase poderia estar associada simultaneamente a duas fontes de ionização: tempestades magnéticas e chuvas de meteoros.
- c) Períodos em que o comportamento da fase não correspondeu ao esperado, ou seja, para uma pequena perturbação do campo ocorreu uma grande variação da fase ou vice-versa.

#### 3.3.1 - AVANÇO E ATRASO DE FASE DO SINAL DE VLF ASSOCIADOS A TEMPESTADES MAGNÉTICAS:

Como já citado, o abaixamento do limite inferior do guia de onda terra-ionosfera, durante períodos magneticamente ativos, provoca um avanço de fase do sinal de VLF em relação aos dias não-perturbados. Contudo, o estudo das tempestades magnéticas revelou um aspecto bastante interessante: em determinados períodos verificou-se um atraso de fase (o que sugeriu um levantamento do nível de reflexão) pouco antes ou durante o início da perturbação do campo. Das 40 tempestades analisadas, foi verificada a ocorrência de 16 casos, ou seja 40% do total estudado apresentou avanço e atraso de fase bem definidos. Os períodos aqui selecionados foram apenas alguns: 27 de julho a 03 de agosto de 1977 (Figura 3.1), 01 a 08 de janeiro de 1978 (Figura 3.2), 25 de agosto a 01 de setembro de 1978 (Figura 3.3), 22 a 30 de setembro de 1978 (Figura 3.4), 02 a 12 de fevereiro de 1979 (Figura 3.5), 20 a 30 de abril de 1979 (Figura 3.6) e 11 a 15 de abril de 1981 (Figura 3.7).

JULHO - AGOSTO - 1977

$\Omega$  - ARGENTINA - 13,6 kHz

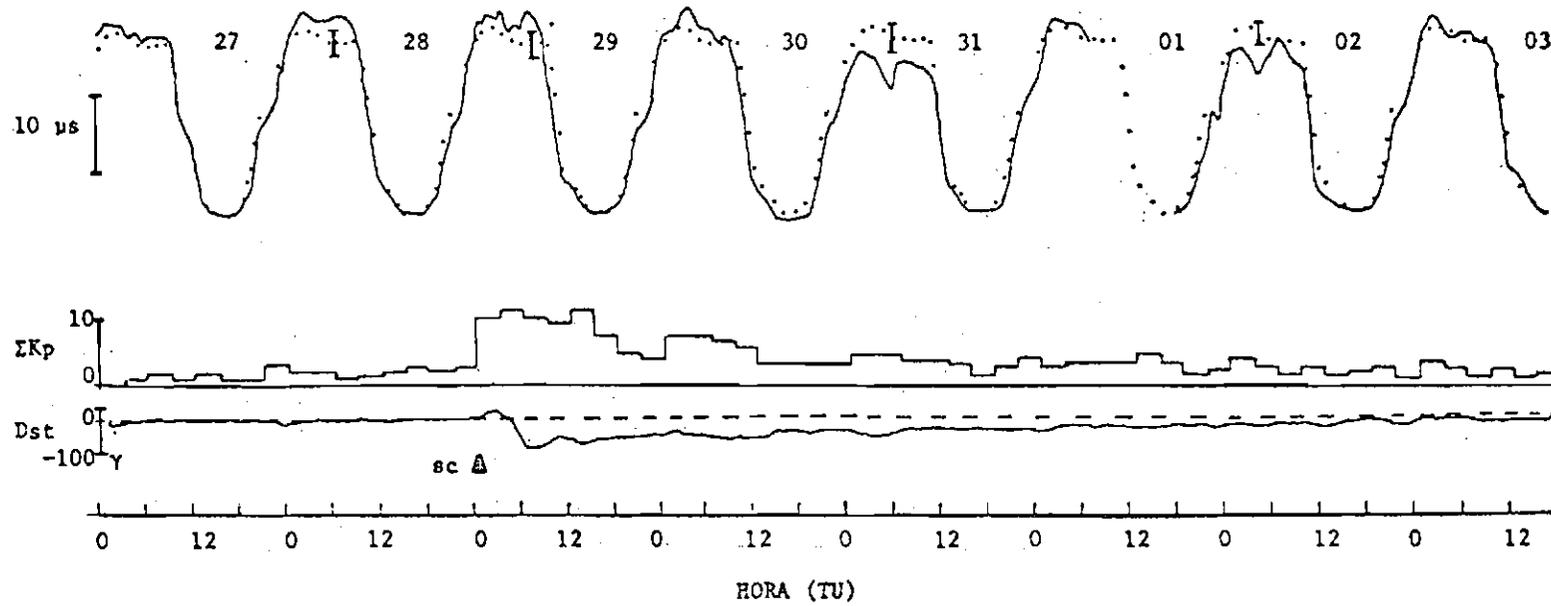


Fig. 3.1 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (13,6 KHz) de 27 de julho a 03 de agosto de 1977 e os índices magnéticos  $\Sigma Kp$  e Dst.

JANEIRO - 1978

$\Omega$ -ARGENTINA - 13,6 kHz

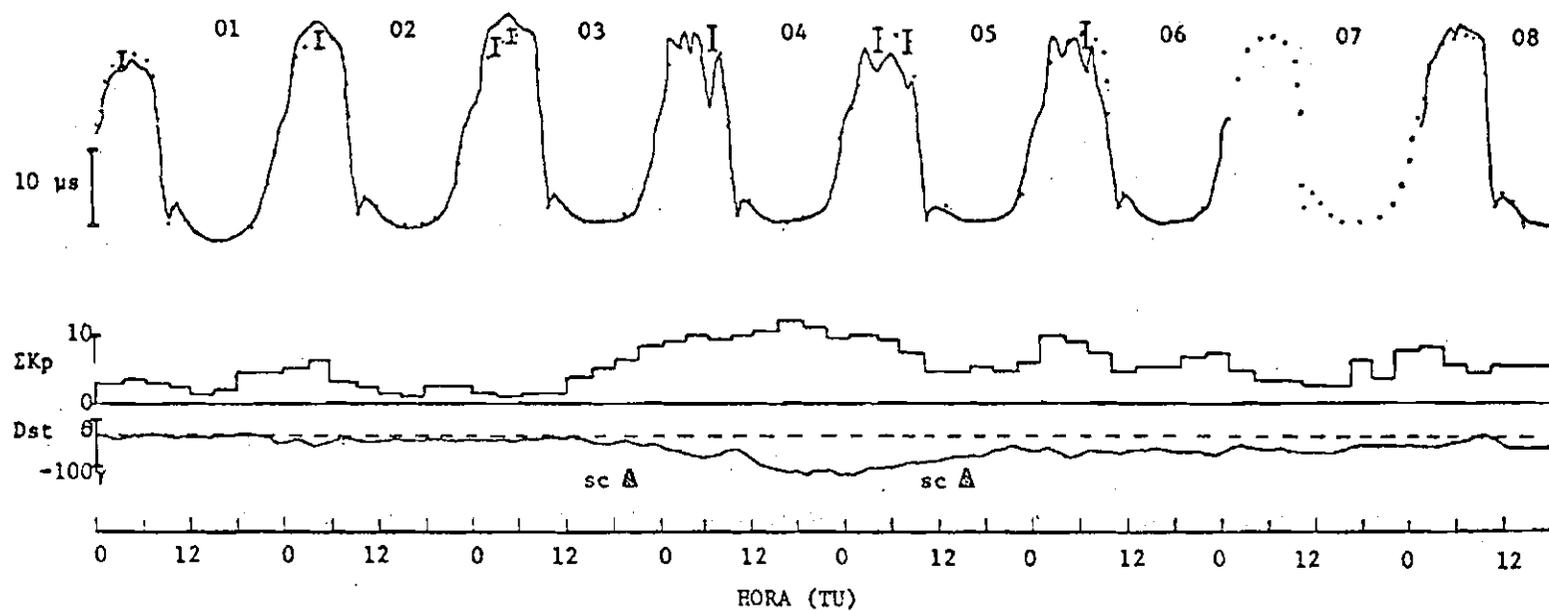


Fig. 3.2 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (13,6 KHz) de 01 a 08 de janeiro de 1978 e os índices magnéticos  $\Sigma Kp$  e Dst.

AGOSTO - 1978  
ARGENTINA - 13,6 kHz

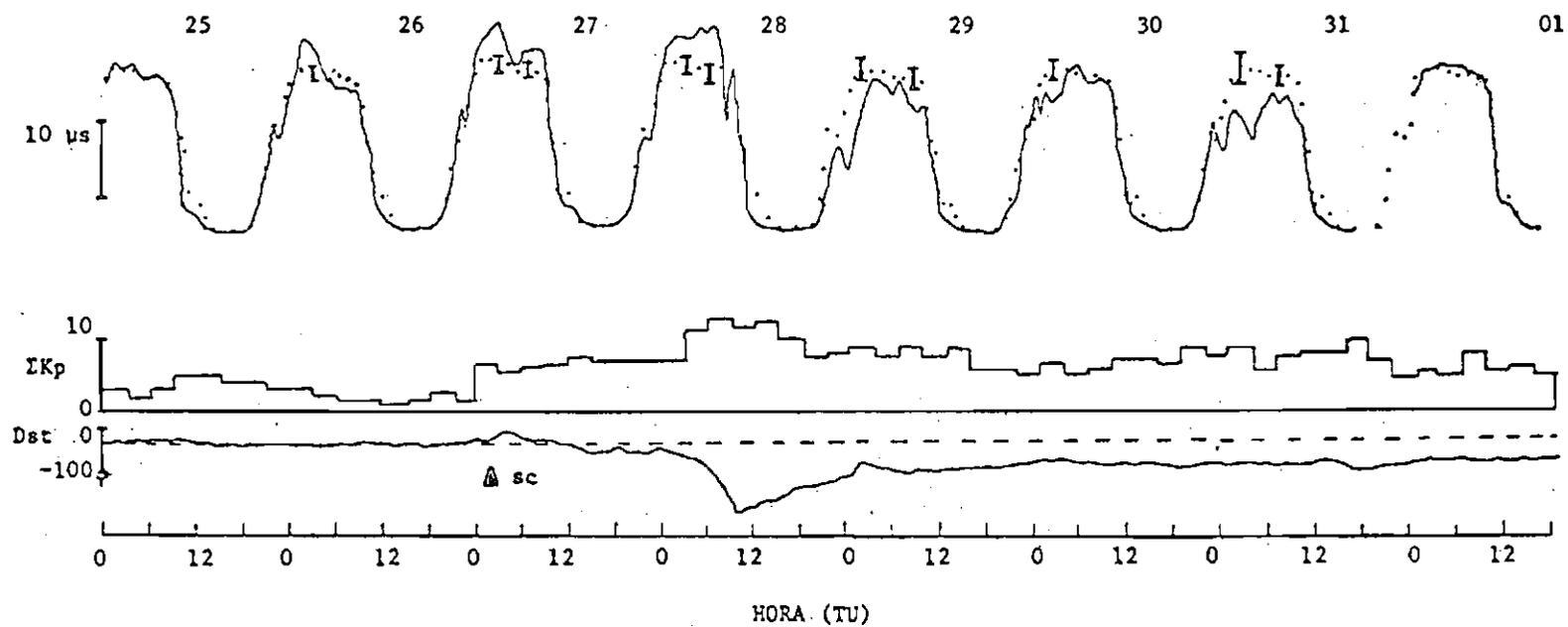


Fig. 3.3 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (13,6 kHz) de 25 de agosto a 01 de setembro de 1978 e os índices magnéticos  $\Sigma Kp$  e Dst.

9-SETEMBRO - 1978

ARGENTINA - 13,6 kHz

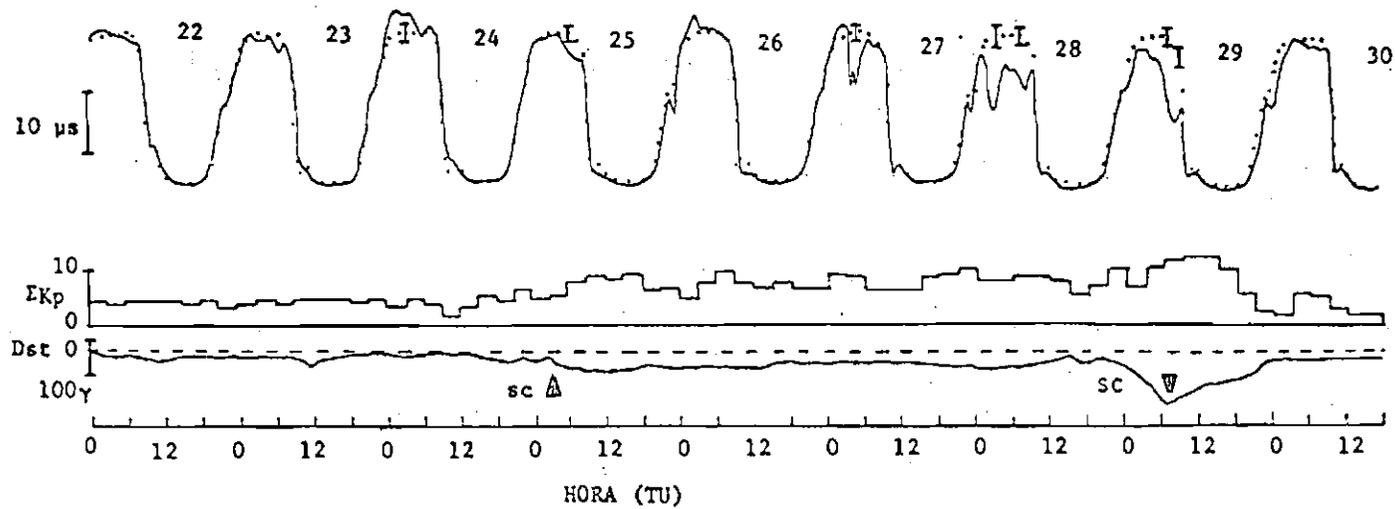


Fig. 3.4 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (13,6 KHz) de 22 a 30 de setembro de 1978 e os Índices magnéticos  $K_p$  e Dst.

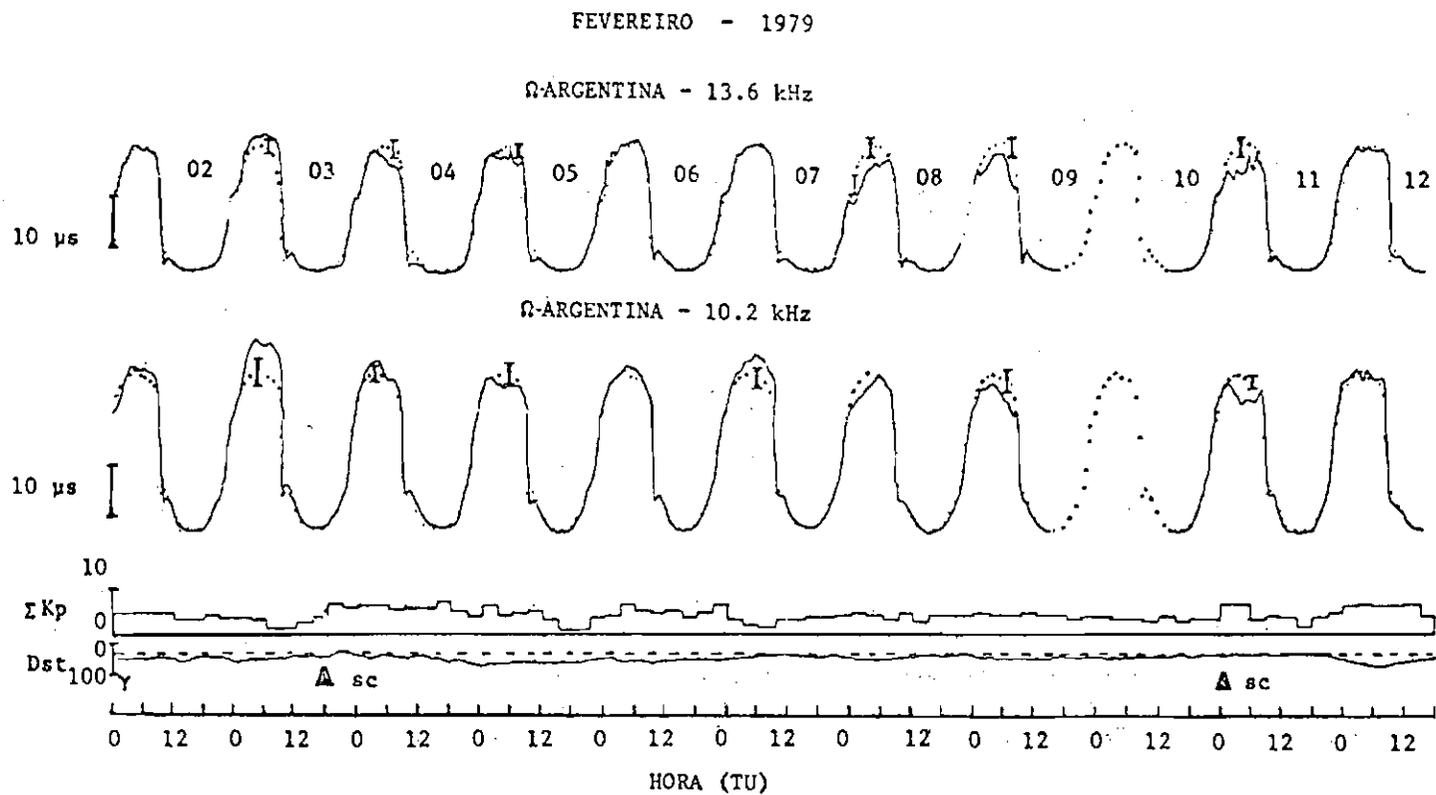
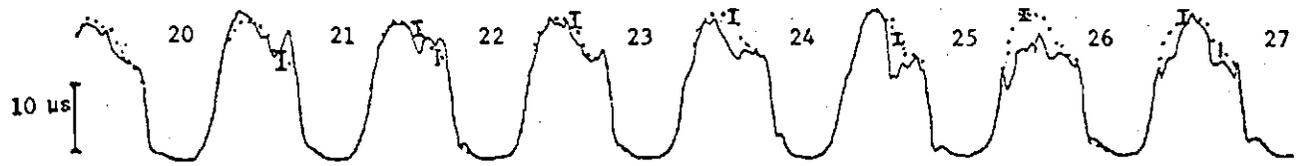


Fig. 3.5 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (13,6 KHz e 10,2 KHz) de 02 a 12 de fevereiro de 1979 e os índices magnéticos Dst e  $\Sigma Kp$ .

ABRIL \_ 1979

$\Omega$ -ARGENTINA - 13,6 kHz



$\Omega$ -ARGENTINA - 10,2 kHz

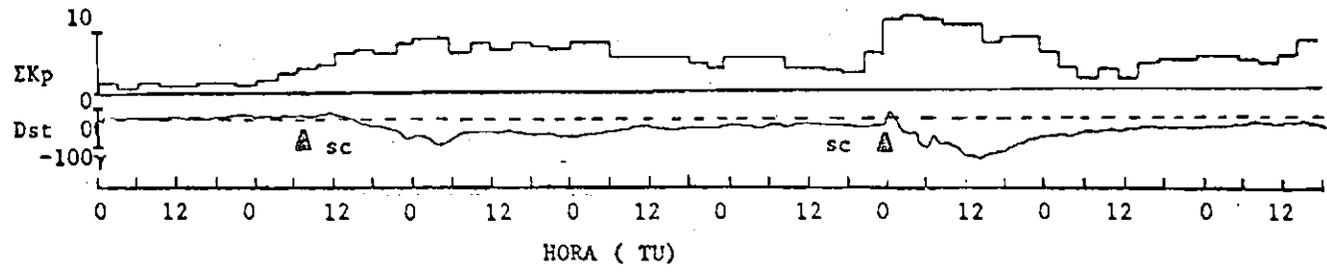
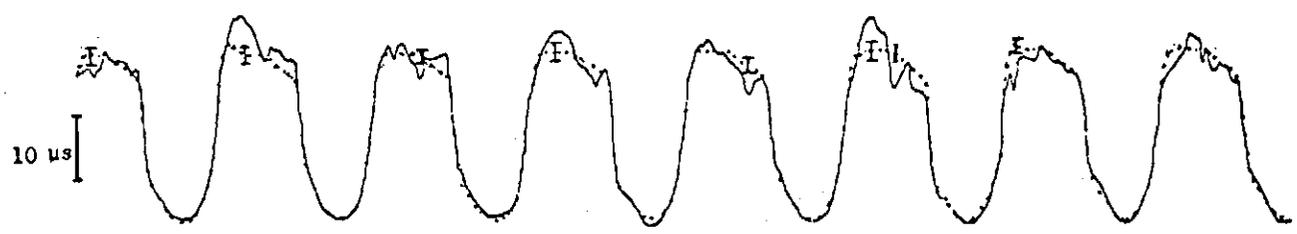


Fig. 3.6 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (13,6 KHz e 10,2 KHz) de 20 a 27 de abril de 1979 e os índices magnéticos  $\Sigma Kp$  e Dst.

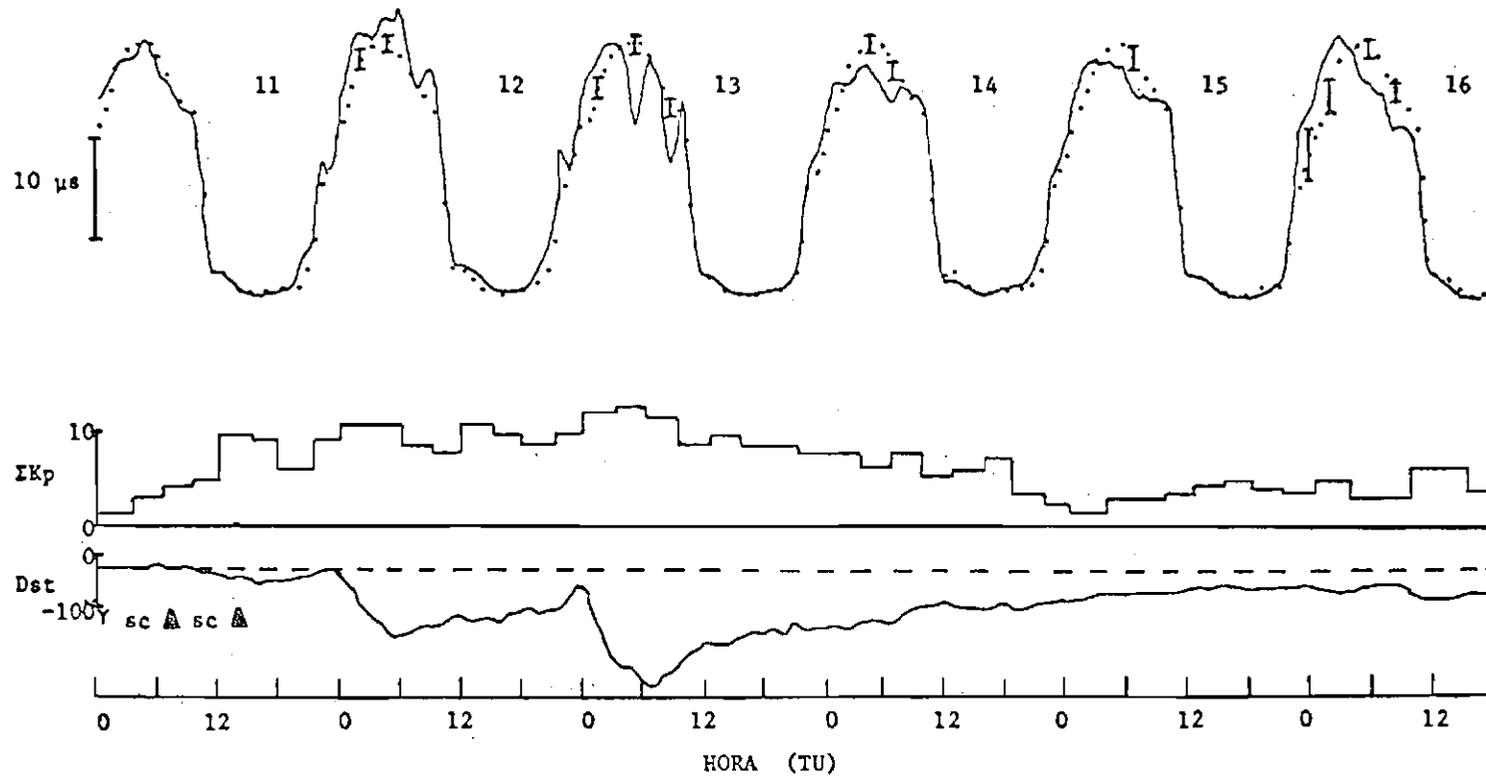


Fig. 3.7 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (13,6 KHz) de 11 a 16 de abril de 1981 e os índices magnéticos  $\Sigma Kp$  e Dst.

Neste estudo, não foram considerados desvios de fase que ocorreram durante as horas do amanhecer e do anoitecer, pois neste período de transição estão presentes mais de um modo de propagação, (Crombie, 1964; Reder, 1979, 1981), provocando uma oscilação na fase e amplitude do sinal (conversão modal). As anomalias diurnas de fase associadas a explosões solares (S.I.Ds. - Sudden Ionospheric Disturbances) também não foram consideradas. Este procedimento foi mantido para a análise de todos os dados deste trabalho.

A Tabela 3.1, mostra os parâmetros do campo magnético perturbado. Os valores apresentados foram obtidos através do Solar Geophysical Data (NOAA, 1977; 1978; 1979; 1980; 1981). Estão indicados o período analisado, o dia e a hora que ocorreu o início súbito (sc) e o valor máximo da variação do campo. A perturbação máxima está expressa através dos índices magnéticos Dst (em gamas) e  $\Sigma Kp$ .

A Tabela 3.2 apresenta as características principais da variação da fase para o período em questão. Estão indicados o dia e a hora em que ocorreu o primeiro desvio de fase (início), a perturbação máxima (máximo) e o último dia em que se observa qualquer perturbação (fim). O avanço de fase está representado por  $\Delta\phi$  ( $\mu s$ ) e  $\Delta h$  (km) com sinal negativo (-), indicando que ocorreu um abaixamento do limite inferior da ionosfera. Para o atraso de fase,  $\Delta\phi$  e  $\Delta h$  apresentam sinal positivo (+) e indicam que a altura do guia de onda aumentou. O valor do gradiente de condutividade  $\beta$  foi calculado para o máximo desvio de fase observado. Uma análise detalhada do modelo adotado para os cálculos dos parâmetros apresentados é feita no Capítulo 4.

TABELA 3.1

PARÂMETROS DO CAMPO MAGNÉTICO

FIGURA	PERÍODO	INÍCIO SÚBITO (SC)		MÁXIMO Dst		MÁXIMA ΣKp	
		DIA	HORA (TU)	DIA	VALOR (γ)	DIA	VALOR
3.1	27 julho - 03 agosto 1977	29	00:27	29	-100	29	40-
3.2	01 - 08 janeiro 1978	03	20:42				
		05	16:28	05	-129	04	49
3.3	25 agosto 01 setembro 1978	27	02:46	28	-233	28	52-
3.4	22 - 30 setembro 1978	25	03:01				
		29	07:18	29	-241	29	47-
3.5	02 - 12 fevereiro 1979	03	18:24	04	-49	04	27-
		11	01:48	12	-58	12	23+
3.6	20 - 27 abril 1979	21	08:00				
		24	23:57	25	-148	25	54-
3.7	11 - 16 abril 1981	11	07:22	13	-273	13	52
		11	13:40				

FONTE: NOAA (1977, 1978, 1979, 1981).

Verifica-se que o atraso de fase ocorreu entre 30 minutos (tempestade de abril de 1979, Figura 3.6) e ~ 26 horas antes do sc (tempestade de agosto de 1978, Figura 3.3). Das 7 tempestades selecionadas, apenas a de abril de 1981 (Figura 3.7) apresentou um atraso de fase após o início do sc. Já o avanço de fase ocorreu entre 08 horas (tempestade de janeiro de 1978, Figura 3.2) a 48 horas após o início da perturbação do campo (tempestade de setembro de 1978, Figura 3.4). É necessário ressaltar que a hora do início, máximo e fim do desvio de fase, é considerada em relação à média, apresentando uma resolução temporal de 10 minutos.

Neste período, duas tempestades apresentaram comportamento singular em relação ao atraso de fase: as tempestades de fevereiro e abril de 1979 (Figuras 3.5 e 3.6). No dia 7 de fevereiro, 77 horas após o sc, ocorre novamente o atraso de fase, porém apenas para a frequência de 10,2 KHz. A análise da atividade magnética mostra que o campo magnético apresenta-se praticamente normal neste dia.

Para a de abril, o atraso de fase do dia 24, aparece simultaneamente com o sc (Tabela 3.1), ocorrendo novamente apenas na frequência 10,2 KHz.

Para a tempestade de fevereiro (Figura 3.5), o atraso de fase inicia-se simultaneamente para as duas frequências (Tabela 3.2). Porém, a variação de fase ( $\Delta\phi$ ) na frequência de 10,2 KHz é maior que em 13,6 KHz, o que corresponde também a uma variação em altura maior. Outro comportamento interessante ocorre no dia 7, apenas na frequência de 10,2 KHz ocorre um atraso de fase, o que sugere perturbações apenas na região de propagação desta frequência.

Analisando o avanço de fase, verificou-se também um comportamento distinto entre as duas frequências. Ele é mais pronunciado na frequência de 13,6 KHz, iniciando antes e apresentando uma recuperação mais lenta que em 10,2 KHz.

TABELA 3.2

CARACTERÍSTICAS E PARÂMETROS OBTIDOS DOS SINAIS DE VLF PARA AS TEMPESTADES MAGNÉTICAS DE JULHO DE 1977; JANEIRO, AGOSTO E SETEMBRO DE 1978; FEVEREIRO E ABRIL DE 1979; ABRIL DE 1981

FIGURA	PERÍODO ANALISADO	FREQUÊNCIA UTILIZADA (KHz)	PERÍODO EM QUE OCORREU O DESVIO DE FASE ( $\Delta\phi$ )						MÁXIMO DESVIO DE FASE OBSERVADO	MÁXIMA VARIACÃO DE ALTURA OBSERVADA	MÁXIMO GRADIENTE DE CONDUTIVIDADE OBSERVADO	DESVIO PADRÃO	DIFERENÇA DE TEMPO (HORAS) ENTRE O INÍCIO SÓBITO (SC) E O INÍCIO DO DESVIO DE FASE					
			INÍCIO		MÁXIMO		FIM						$\Delta\phi$ ( $\mu$ s)	$\Delta h$ (km)	$B$ ( $\text{km}^{-1}$ )	$\{\sigma\}$ ( $\mu$ s)	ANTES	DEPOIS
			DIA	HORA (TU)	DIA	HORA (TU)	DIA	HORA (TU)										
3.1	27 julho-03 agosto 1977	13.6	28* 31**	05:30 00:00	28 31	06:30 04:30	30 02	03:30 -	+3,5 -7,0	+1,8 -4,0	0,44 0,62	1,0 1,0	19 <sup>h</sup> 00 <sup>m</sup>	47 <sup>h</sup> 30 <sup>m</sup>				
3.2	01 - 09 janeiro 1978	13.6	03* 04**	03:00 04:30	03 04	04:00 06:00	03 -	05:30	+3,0 -11,0	+1,5 -5,8	0,47 0,61	1,0 1,2	17 <sup>h</sup> 40 <sup>m</sup>	07 <sup>h</sup> 50 <sup>m</sup>				
3.3	25 agosto-01 setembro 1978	13.6	26* 28**	01:00 23:00	28 31	06:00 03:00	03 31	00:00 09:00	+5,5 -9,0	+2,8 -5,0	0,44 0,63	1,0 1,0	25 <sup>h</sup> 45 <sup>m</sup>	44 <sup>h</sup> 15 <sup>m</sup>				
3.4	22 - 30 setembro 1978	13.6	24* 25**	01:30 03:00	24 28	02:00 02:00	24 29	08:30 08:00	+5,0 -12,5	+2,8 -6,5	0,45 0,70	1,2 1,2	25 <sup>h</sup> 30 <sup>m</sup>	48 <sup>h</sup> 00 <sup>m</sup>				
3.5	02 - 12 fevereiro 1979	13.6	03* 04**	01:30 03:00	03 11	03:45 02:30	11 11	08:00 08:00	+4,0 -6,0	+2,0 -3,5	0,45 0,61	1,0 1,0	16 <sup>h</sup> 55 <sup>m</sup>	08 <sup>h</sup> 35 <sup>m</sup>				
		10.2	03* 05**	01:30 03:00	03 11	04:00 04:00	07 11	07:00 08:00	+7,5 -6,0	+4,2 -2,5	0,64 0,51	1,2 1,2	16 <sup>h</sup> 55 <sup>m</sup>	32 <sup>h</sup> 35 <sup>m</sup>				
3.6	20 - 27 abril 1979	13.6	21* 22**	07:30 02:00	21 25	08:30 04:30	21 -	09:00	+5,0 -9,5	+3,0 -5,4	0,44 0,63	1,0 1,0	30 <sup>m</sup>	18 <sup>h</sup> 00 <sup>m</sup>				
		10.2	21* 22**	01:00 02:00	21 25	01:00 04:30	25 25	02:00 09:00	+6,0 -6,5	+4,3 -3,3	0,49 0,66	1,2 1,0	07 <sup>h</sup> 00 <sup>m</sup>	18 <sup>h</sup> 00 <sup>m</sup>				
3.7	11 - 16 abril 1981	13.6	12* 13**	00:00 01:00	12 13	05:30 04:30	12 16	09:00 08:30	+4,0 -8,5	+2,2 -4,5	0,44 0,57	1,0 1,0	-	16 <sup>h</sup> 40 <sup>m</sup> 40 <sup>h</sup> 40 <sup>m</sup>				

A tempestade de abril (Figura 3.6) mostrou um comportamento similar a de fevereiro. A frequência de 10,2 KHz apresentou maior desvio em relação à média para o atraso de fase e a de 13,6 KHz para o avanço de fase. Tal comportamento sugere que a ionização decorrente de elétrons energéticos precipitados é maior na região de propagação da frequência de 13,6 KHz, enquanto o atraso de fase, que indica um de crescimento da densidade eletrônica, é mais relevante na região onde o sinal de 10,2 KHz se propaga.

Outras cinco tempestades também apresentaram atraso de fase algumas horas antes do sc: 28 de julho de 1977 (Figura 3.1); 03 de janeiro de 1978 (Figura 3.2); 27 de agosto de 1978 (Figura 3.3); 25 de setembro de 1978 (Figura 3.4) e 11 de abril de 1981 (Figura 3.7). Nestes períodos foram observadas tempestades apenas em 13,6 KHz.

A análise do desvio de fase (avanço e atraso) mostrou que não existe uma relação direta entre ele e a intensidade da tempestade magnética. A tempestade que provocou o maior avanço de fase foi a de 28 de setembro de 1978 (Figura 3.4) com  $\Delta\phi = -12,5 \mu s$  (Tabela 3.2), o que corresponde a um  $Dst_{\text{máximo}} = -241\gamma$  (Tabela 3.1), enquanto a tempestade de abril de 1981 (Figura 3.7), com um  $Dst_{\text{máximo}} = -273\gamma$  (Tabela 3.1), provocou um desvio de  $-8,5 \mu s$  na fase do sinal (Tabela 3.2).

Neste período analisado, o maior atraso de fase ocorreu em 03 de fevereiro de 1979 (Figura 3.5), o qual apresentou  $\Delta\phi = +7,5 \mu s$  (Tabela 3.2).

Tanto o atraso como o avanço de fase apresentaram dois tipos de comportamento: uma diminuição rápida da fase em relação aos dias calmos, com um intervalo de tempo entre o início e o fim da perturbação de poucas horas (2 a 3 horas), ou uma variação lenta, podendo a fase permanecer durante 6 a 7 horas abaixo do nível dos dias não-perturbados. Outras vezes verificou-se uma associação destas variações, ou seja, a fase do sinal apresentou uma diminuição em relação ao nível dos dias calmos que durou a noite toda, ocorrendo ao mesmo tempo varia

ções rápidas sobre a fase já perturbada, o que provoca um abaixamento ainda maior em relação ao nível de referência. No entanto, este segundo avanço de fase voltou rapidamente ao nível da primeira perturbação. Um exemplo desses comportamentos pode ser verificado na noite de 28 de setembro (Figura 3.4) e na noite de 25 de abril (Figura 3.6) na frequência de 10,2 KHz.

Um estudo bastante criterioso da fase e amplitude do sinal mostrou que estes efeitos observados não são consequência de conversão modal, mas sim variação real da densidade eletrônica local, sendo que as variações temporais encontradas poderiam estar associadas à precipitação de elétrons de diferentes energias.

No Capítulo 4 será feito um estudo do fluxo e energia dos elétrons necessários para provocar tais desvios de fase. Não é objetivo, no entanto, explicar estas diferenças no tempo de ionização e recuperação da ionosfera, fato este que será analisado em trabalho futuro.

O decréscimo na densidade eletrônica da ionosfera em latitudes médias tem sido extensivamente estudado para a região F (Mendillo et alii, 1970; Jones and Risbeth, 1971; Lanzerotti et alii, 1975; Manzano et alii, 1981 e Paula et alii, 1983) e para a região E (Watts e Brown, 1950, 1951; Lindquist, 1953; Belrose and Thomas, 1968). No entanto, para a região D são poucos os trabalhos que analisaram este fenômeno. Ananthkrishnam e Hackradt (1972), analisando dados de VLF, recebidos em Campos de Jordão, São Paulo, no período de 1966 a 1968, encontraram uma boa correlação entre o atraso de fase observado em eventos distintos (em diferentes trajetos de propagação) e o decréscimo de raios cósmicos (efeito "Forbush"). Entretanto, este estudo evidenciou que nem todos os decréscimos do tipo "Forbush" analisados apresentaram atraso de fase do sinal de VLF associado. De 10 eventos ocorridos entre março de 1966 e maio de 1967 somente 4 apresentaram evidência clara. Durante certos eventos "Forbush", apenas os sinais provenientes de transmissores localizados em altas latitudes apresentaram anomalias de propagação.

Ye Zong-hai e Deng Rong-hua (1984) também estudaram o efeito do decréscimo "Forbush" na região D para o período de abril de 1980. Analisaram dados de fase de VLF na frequência de 16 KHz na trajetória GBR (Inglaterra) e Sian (China) e observaram que, quando a intensidade de raios cósmicos cai abruptamente (02 de abril), a fase do sinal recebido apresenta um atraso, indicando uma relação direta com o decréscimo "Forbush". Este comportamento indica que a contribuição de raios cósmicos como fonte de ionização noturna na região de propagação de VLF é bastante significativa, provocando um atraso de fase na ordem de  $39 \mu s$  no trajeto considerado ( $d = 8.300 \text{ km}$ ), o que implica um aumento da altura do limite inferior da ionosfera de aproximadamente 14 km.

Manzano et alii (1981) fizeram um estudo comparativo do comportamento de diferentes parâmetros da região D, E e F para Tucuman, Argentina. Utilizando uma rede sul-americana de ionossondas verticais (Ilhas Argentinas, Ushuaia, Puerto Stanley, Buenos Aires e Tucumã), dados do satélite INTASAT e dados de sinal de VLF da trajetória NAA (Cutler Maine, EUA), Tucumã (Argentina) em 17,8 KHz ( $d = 8 \text{ Mm}$ ), analisaram o comportamento da ionosfera durante a tempestade de março de 1976. O estudo mostrou que a perturbação ionosférica na região F teve início na zona auroral e se propagou em sentido horizontal para baixas latitudes. Algumas horas antes do sc (~3 horas), a densidade eletrônica diminuiu (fase negativa). A comparação com os dados de VLF indicou que poderia haver um gradiente vertical que afetou até a camada D, tendo como consequência o atraso de fase observado, o que sugere um levantamento de toda região. Supõe-se que a origem da fase negativa na camada F é consequência quase que exclusivamente de mudanças na atmosfera neutra, o que provoca um decréscimo na razão  $[O]/[N_2]$  e, consequentemente, um acréscimo na taxa de perda eletrônica. Este processo foi sugerido por Seaton (1956) e posteriormente confirmado por Prölss (1980).

Outro enfoque interessante é o que associa o atraso de fase do sinal de VLF com a presença de elétrons menos energéticos (espectro mole:  $E_0 \leq 10 \text{ KeV}$ ), os quais são capazes de aumentar o gradiente de altura da densidade eletrônica para 85 km, sem provocar um abai

xamento significativo na camada de reflexão (Potemra and Rosenberg, 1973). Este efeito também foi observado durante algumas explosões solares através de transmissões diurnas de VLF (Crombie, 1964; Ohshio et alii, 1970).

É possível também analisar o atraso de fase observado em algumas tempestades magnéticas através da contribuição de elétrons mais energéticos. Sabe-se que a influência da perturbação magnética sobre uma partícula irá depender de sua posição em termos de tempo local durante a fase inicial (sc). Se o elétron se encontrar ao lado diurno da Terra, ficará no final da tempestade com mais energia e com altura mais baixa; se, do lado noturno, o comportamento será inverso (Roederer, 1970). Portanto, existe a possibilidade de ocorrer uma diminuição no fluxo de elétrons com  $E_0 \geq 30$  KeV, deslocando o máximo de ionização devido a estes elétrons energéticos para regiões mais altas. Gledhill e Hoffman (1981), através de medidas de elétrons de baixa energia (0,2-26 KeV) na região da SAGA, evidenciaram um decréscimo do fluxo relacionado com o aumento da atividade magnética.

Com base nestas hipóteses e objetivando a explicação dos resultados observacionais, fez-se primeiramente uma tentativa de associar o decréscimo "Forbush" com o atraso de fase. A comparação da contagem de nêutrons fornecida pelo Solar Geophysical Data (NOAA, 1977, 1978, 1979 e 1981) com a variação de fase do sinal não apresentou nenhuma correlação. O início do atraso de fase ocorreu um dia antes do decréscimo "Forbush" para todas as tempestades deste período, menos para a de abril de 1981, que ocorreu 4 dias após.

A análise dos dados nas frequências de 10,2 KHz e 13,6 KHz mostrou que o atraso de fase ocorre principalmente em 10,2 KHz, o que sugere que o decréscimo da densidade eletrônica está associado a regiões mais baixas nestes períodos. Portanto, principalmente para as tempestades de fevereiro e abril de 1979 (Figuras 3.5 e 3.6), a hipótese de um acoplamento de toda a camada ionosférica, com o decréscimo da densidade eletrônica na região F, provoca derivas verticais que se es

tendem até a região D, conforme observado por Manzano et alii (1981), não se aplica nestes casos.

O próximo passo, foi analisar a possibilidade de explicar o atraso de fase através da presença de elétrons menos energéticos ( $E_0 \leq 10$  KeV). O estudo mostrou alguma correlação com os resultados experimentais. Analisando a Figura 4.4, observa-se para  $E_0 = 10$  KeV, que para a frequência de 10,2 KHz um fluxo de  $J (\leq 40$  KeV)  $\approx 10^{14}$  el./cm<sup>2</sup>s sr é suficiente para provocar desvios na fase. Para a frequência de 13,6 KHz o fluxo necessário é  $J (< 40$  KeV)  $\approx 10^3$  el./cm<sup>2</sup>s sr. No entanto, apesar de os cálculos mostrarem a possibilidade da presença de elétrons menos energéticos entre 80 e 85 km para um dado fluxo, o desvio de fase para 13,6 KHz é maior que para 10,2 KHz (Figura 4.4), o que contraria as observações. Outro fato que a hipótese de elétrons com  $E_0 \leq 10$  KeV não explica é o atraso de fase ocorrer em algumas ocasiões apenas na frequência de 10,2 KHz, como pode ser observado nos dias 07 de fevereiro (Figura 3.5) e 20 e 25 de abril (Figura 3.6).

Analisando energias maiores ( $E_0 \geq 30$  KeV), observa-se que a partir de 100 KeV o comportamento da curva que expressa o desvio de fase em função do fluxo de elétrons precipitados se inverte, ou seja, elétrons com energia característica  $E_0 \geq 100$  KeV provocam maior desvio de fase em 10,2 KHz.

Sabe-se que a Anomalia Magnética Brasileira apresenta um fluxo contínuo de elétrons se precipitando e que durante períodos magneticamente ativos torna-se mais intensa. Como já citado, Roederer (1970) mostrou que uma partícula pode ganhar mais energia e se deslocar para regiões mais altas dependendo de sua posição no início da perturbação do campo. Se, algumas horas antes do sc, ocorrerem distúrbios na plasmasfera que provocam o deslocamento dos elétrons mais energéticos para regiões fora da zona de precipitação, isto acarretaria uma diminuição no fluxo de elétrons presentes na anomalia, provocando uma diminuição da densidade eletrônica na baixa ionosfera. Esta hipótese parece ser a mais concordante com os resultados teóricos e com os dados

experimentais. Pretende-se futuramente, comparar este resultado com outras técnicas de medidas como também a aplicação de um modelo mais elaborado para a determinação dos parâmetros ionosféricos.

### 3.3.2 - TEMPESTADES MAGNÉTICAS QUE OCORRERAM EM PERÍODOS DE CHUVAS DE METEOROS:

A característica comum dos dados de VLF aqui selecionados é que a anomalia de fase observada provavelmente seja consequência da associação de duas fontes de ionização: elétrons precipitados devido à perturbação magnética e elétrons provenientes da interação de meteoritos com a atmosfera.

O período em questão apresenta cinco tempestades magnéticas: 10 de dezembro de 1977 (Figura 3.8), 14 de dezembro de 1978; (Figura 3.9), 06 de junho de 1979 (Figura 3.10), 22 de outubro de 1979 (Figura 3.11) e 10 de maio de 1981 (Figura 3.12).

As principais características do campo magnético e da variação de fase observada, que estão associadas ao período analisados, são mostradas na Tabela 3.3 e 3.4. O critério para a montagem das tabelas é o mesmo da Seção 3.3.1.

A Tabela 3.3 mostra os parâmetros do campo magnético perturbado. Os valores apresentados foram fornecidos pelo Solar Geophysical Data (NOAA, 1977, 1978, 1979 e 1981). Estão indicados o período analisado, o dia e a hora em que ocorreu o início súbito (sc) e o valor máximo da variação do campo. A perturbação máxima está expressa através dos índices magnéticos Dst (em gamas) e  $\Sigma Kp$ .

A Tabela 3.4 apresenta as características principais do comportamento da fase para o período em questão. Estão indicados o dia e a hora em que ocorreu o primeiro desvio de fase (início), a perturbação máxima (máximo) e o último dia em que se observa qualquer variação (fim). O avanço de fase está representado por  $\Delta\phi$  ( $\mu s$ ) e  $\Delta h$  (km) com

sinal negativo (-), indicando que ocorreu um abaixamento do limite inferior da ionosfera. Para o atraso de fase,  $\Delta\phi$  e  $\Delta h$  apresentam sinal (+) e indicam que a altura do guia de onda aumentou. O valor do gradiente de condutividade  $\beta$  foi calculado para o máximo desvio de fase observado. Como já citado anteriormente (Secção 3.3.1), uma explicação detalhada do modelo adotado para o cálculo dos parâmetros apresentados encontra-se no capítulo seguinte (Capítulo 4).

As tempestades de dezembro de 1977 e dezembro de 1978 (Figuras 3.8 e 3.9) são analisadas para o mesmo período.

Em dezembro de 1977, a variação máxima do campo ocorre dia 11 com  $Dst = -125 \gamma$  (Tabela 3.3) e o avanço máximo de fase, no dia 13 às 06:30 T.U., apresentando  $\Delta\phi = 6,5 \mu s$  e uma variação em altura  $\Delta h = -4,2 \text{ km}$  (Tabela 3.4). Apenas a frequência 13,6 KHz foi registrada neste período.

O avanço de fase observado nas noites de 15 e 16 ocorre durante a fase de recuperação do campo, e no dia 16 outro sc é registrado às 19:00 TU (informação de apenas um observatório: Honolulu, com latitude geomagnética  $21^{\circ}N$ ).

Um aspecto curioso é o desvio de fase nas noites de 16 a 17 (Figura 3.8), quando a variação máxima em relação à média dos dias calmos ocorre no mesmo horário, às 05:00 TU ( $\Delta\phi = -4 \mu s$  e  $\Delta\phi = -5 \mu s$ , respectivamente).

A tempestade de dezembro de 1978 (Figura 3.9) foi observada nas frequências de 10,2 KHz e 13,6 KHz. O sc ocorreu dia 14 às 01:26 TU, e a variação máxima do campo, no dia 15, com o  $Dst = -87 \gamma$  (Tabela 3.3). O avanço máximo de fase ocorre em dias diferentes para cada frequência: dia 14 às 01:00 TU para 13,6 KHz com  $\Delta\phi = 7,0 \mu s$  e  $\Delta h = -4,5 \text{ km}$ , e para a de 10,2 KHz, dia 13 às 02:00 TU com  $\Delta\phi = -9,0 \mu s$  e  $\Delta h = -4,6 \text{ km}$  (Tabela 3.4).

TABELA 3.3

PARÂMETROS DO CAMPO-MAGNÉTICO

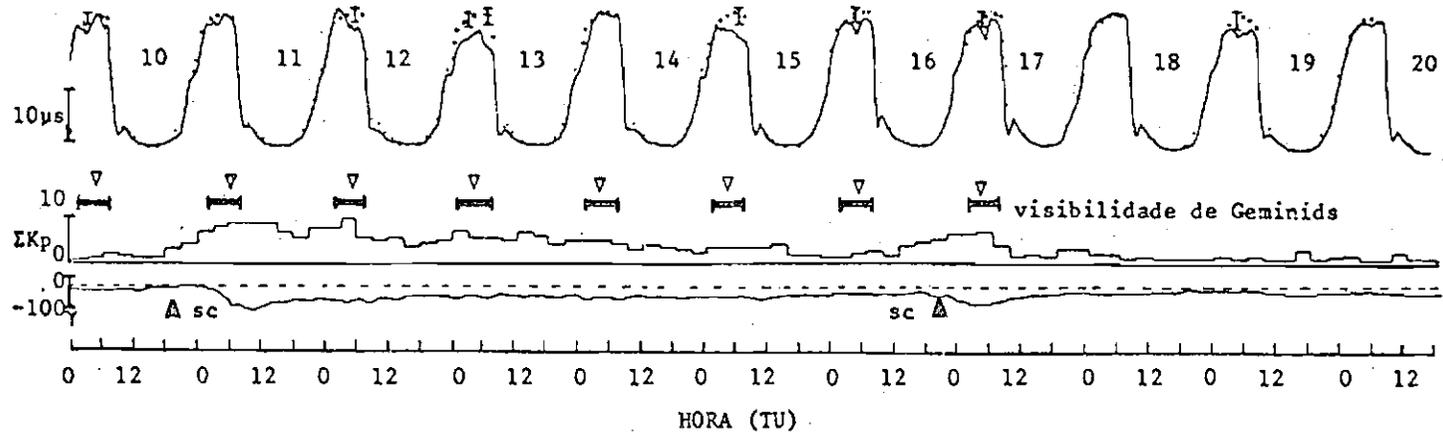
FIGURA	PERÍODO	INÍCIO SÚBITO (SC)		MÁXIMO Dst		MÁXIMA $\Sigma Kp$	
		DIA	HORA (TU)	DIA	VALOR ( $\gamma$ )	DIA	VALOR
3.8	10 - 20 Dezembro 1977	10 16*	20:00 19:00	11	-125	11	36-
3.9	11 - 16 Dezembro 1978	12 14	10:02 01:26	15	-87	15	30-
3.10	04 - 13 Junho 1979	06	19:27	06	+53	07	30
3.11	19 - 26 Outubro 1979	-	-	22	-44	22	22
3.12	03 - 12 Maio 1981	08 10	14:42 22:08	11	-141	11	40

\* SC registrado apenas no Observatório de Honolulu (21°N).

FONTE: NOAA (1977, 1978, 1979, 1981).

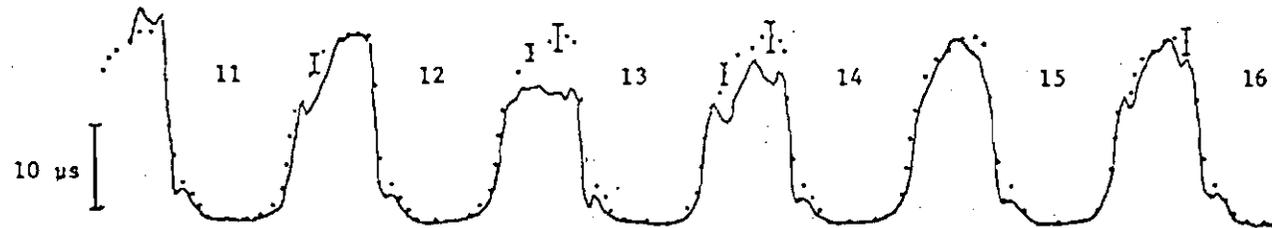
DEZEMBRO - 1977

ARGENTINA - 13,6 kHz



DEZEMBRO - 1978

$\Omega$ -ARGENTINA - 13,6 kHz



$\Omega$ -ARGENTINA - 10,2 kHz

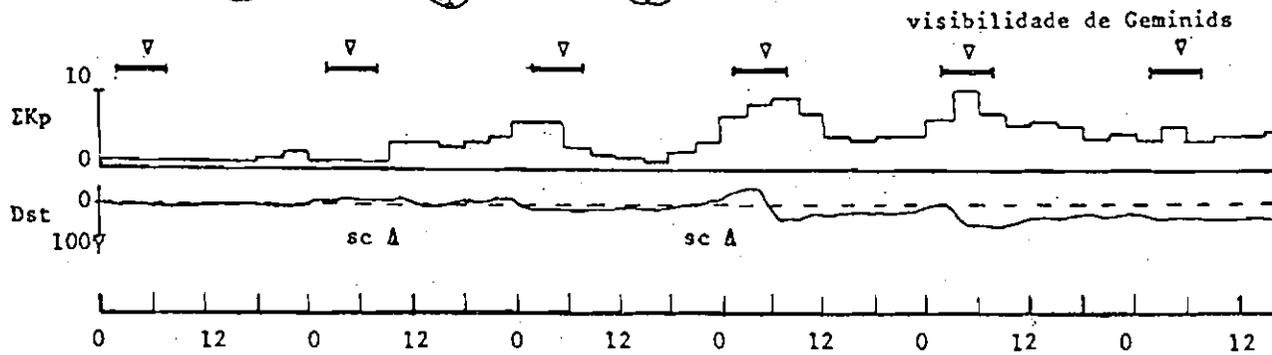
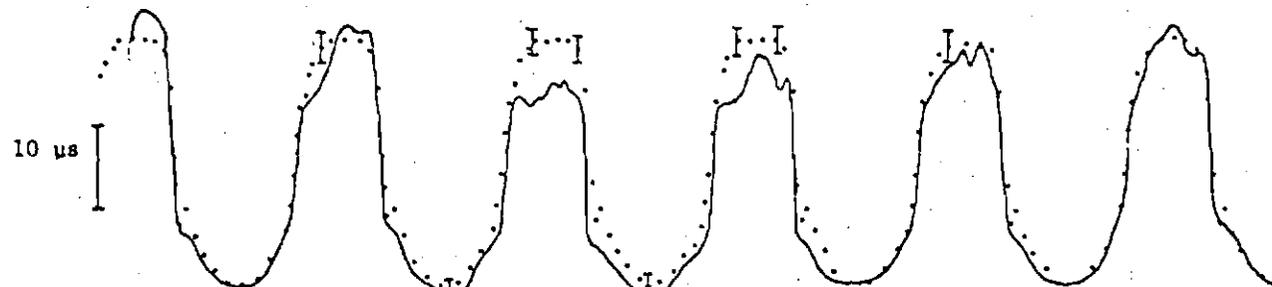


Fig. 3.9 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (13,6 KHz e 10,2 KHz) de 11 a 16 de dezembro de 1978 e os índices magnéticos  $\Sigma Kp$  e Dst.

Nos dias 11 e 12 observa-se, na frequência de 10,2 KHz, um atraso de fase em relação à média dos dias calmos, com  $\Delta\phi = +4 \mu\text{s}$ , o que corresponde a uma variação em altura de  $\Delta h = +2.0 \text{ km}$  para o dia 11 (Tabela 3.4).

Outro aspecto a ressaltar é o avanço de fase, o que indica um aumento ou ionização, que ocorreu antes do sc, tanto para a tempestade de dezembro de 1977 como para a de 1978. Para a de 1977, o avanço de fase se iniciou no dia 10, aproximadamente às 16 horas, antes do sc (Figura 3.8 e Tabela 3.4).

Em dezembro de 1978 não ha registro do sinal de VLF entre 00:00 e 02:00 TU do dia 11. Dia 12 ocorreu um avanço de fase nas duas frequências, antes do sc (Figura 3.9). A atividade solar nestes dias foi moderada, tornando-se mais intensa a partir do dia 12.

As anomalias diurnas observadas entre os dias 12 e 15 são decorrentes da interação de raios X, provenientes das explosões solares, com a ionosfera. Esta interação acarreta um desvio na fase do sinal que é denominado S.I.D. (Sudden Ionospheric Disturbance). Estes efeitos foram normalizados para um nível diurno de referência. Porém, quando ocorrem explosões solares sucessivas, este nível fica abaixo da média dos dias calmos.

A tempestade de junho de 1979 (Figura 3.10) é de fraca intensidade, com  $\text{Dst} = +53 \gamma$  para a perturbação máxima (Tabela 3.3). Foram analisadas as frequências de 10,2 KHz e 13,6 KHz entre os dias 04 a 13. Ocorreu um significativo avanço de fase, antes do sc (dia 5), com  $\Delta\phi = -4,5 \mu\text{s}$  para 13,6 KHz e  $\Delta\phi = -5,0 \mu\text{s}$  para 10,2 KHz.

A fase do sinal em 13,6 KHz apresentou desvios em relação à média dos dias calmos durante todo o período analisado. Já a fase em 10,2 KHz apresentou apenas um pequeno avanço de fase no dia 7, a qual permanece sem perturbação até o dia 11.

TABELA 3.4

CARACTERÍSTICAS E PARÂMETROS OBTIDOS DOS SINAIS DE VLF PARA AS TEMPESTADES MAGNÉTICAS DE  
 DEZEMBRO DE 1977 E 1978,, JUNHO E OUTUBRO DE 1979 E MAIO 1981

FIGURA	PERÍODO ANALISADO	FREQUÊNCIA UTILIZADA (KHz)	PERÍODO EM QUE OCORREU O DESVIO DE FASE ( $\Delta\phi$ )						MÁXIMO DESVIO DE FASE OBSERVADO	MÁXIMA VARIACÃO DE ALTURA OBSERVADA	MÁXIMO GRADIENTE DE CONDUTIVIDADE OBSERVADO	DESVIO PADRÃO	DIFERENÇA DE TEMPO (HORAS) ENTRE O INÍCIO SÚBITO (SC) E O INÍCIO DO DESVIO DE FASE					
			INÍCIO		MÁXIMO		FIM						$\Delta\phi$ ( $\mu\text{s}$ )	$\Delta h$ (km)	$B$ ( $\text{km}^{-2}$ )	$(\sigma)$ ( $\mu\text{s}$ )	ANTES	DEPOIS
			DIA	HORA (TU)	DIA	HORA (TU)	DIA	HORA (TU)										
3.8	10 - 20 dezembro 1977	13.6	10	03:30	13	07:00	19	07:30	-6,5	-4,2	0,65	1,0	16 <sup>h</sup> 30 <sup>m</sup>	-				
3.9	11 - 16 dezembro 1978	13.6	11	00:00	14	01:00	15	00:00	-7,0	-4,5	0,66	1,2	34 <sup>h</sup> 00 <sup>m</sup>	-				
		10.2	11	03:00	11	04:30	14	08:10	+4,0	+2,0	0,46	1,0	31 <sup>h</sup> 00 <sup>m</sup>	-				
			12	00:00	13	02:00	15	00:00	-9,0	-4,6	0,58	1,4	10 <sup>h</sup> 00 <sup>m</sup>	-				
3.10	04 - 13 junho 1979	13.6	05	00:00	12	04:30	-	-	-5,0	-3,1	0,56	1,0	43 <sup>h</sup> 30 <sup>m</sup>	-				
		10.2	05	00:00	12	04:00	-	-	-6,0	-3,0	0,66	1,0	43 <sup>h</sup> 30 <sup>m</sup>	-				
3.11	19 - 26 outubro 1979	13.6	23	01:30	24	05:30	26	00:00	-9,0	-5,0	0,74	1,2	-	-				
		10.2	22	02:00	24	06:30	26	00:00	-10,0	-6,2	0,60	1,0	-	-				
3.12	03 - 12 maio 1981	13.6	03	00:00	11	02:00	-	-	-10,0	-6,5	0,66	1,0	134 <sup>h</sup> 40 <sup>m</sup>	-				

O máximo desvio de fase foi observado no dia 12, para as duas frequências, com  $\Delta\phi = -5,0 \mu\text{s}$  e  $\Delta h = -3,1 \text{ km}$ , para a de 13,6 KHz, e  $\Delta\phi = -6,0 \mu\text{s}$  e  $\Delta h = -3 \text{ km}$ , para a de 10,2 KHz (Tabela 3.4). A análise do campo, contudo, não mostra nenhuma perturbação de grande intensidade, A fase permanece com pequenas anomalias durante todo o mês.

A tempestade de outubro de 1979 também foi analisada através do comportamento da fase das frequências 10,2 KHz e 13,6 KHz (Figura 3.11) e foi de fraca intensidade, com  $\text{Dst} = -44 \gamma$  para a perturbação máxima (Tabela 3.3).

A característica mais importante no comportamento da fase foi o desvio, em relação à média dos dias calmos, que ocorreu nos dias 24 e 25.

O máximo avanço de fase ocorreu no dia 24. A frequência de 13,6 KHz apresentou um  $\Delta\phi = -9,0 \mu\text{s}$  e  $\Delta h = -5,0 \text{ km}$ , às 05:30 TU, e para a de 10,2 KHz, o máximo ocorreu às 06:30 TU com  $\Delta\phi = -10,0 \mu\text{s}$  e  $\Delta h = 6,2 \text{ km}$  (Tabela 3.4).

Outro aspecto importante é a diferença apresentada entre as duas frequências nos dias 22 e 23. A de 10,2 KHz apresentou um desvio maior em relação à média, como também uma perturbação mais demorada.

Um período que também sugere outra fonte de ionizações associada à tempestade magnética é o de maio de 1981.

A Figura 3.12 mostra a variação diurna da fase entre os dias 03 e 14. O campo está bastante perturbado, apresentando uma variação máxima do  $\text{Dst} = -141 \gamma$  (Tabela 3.4).

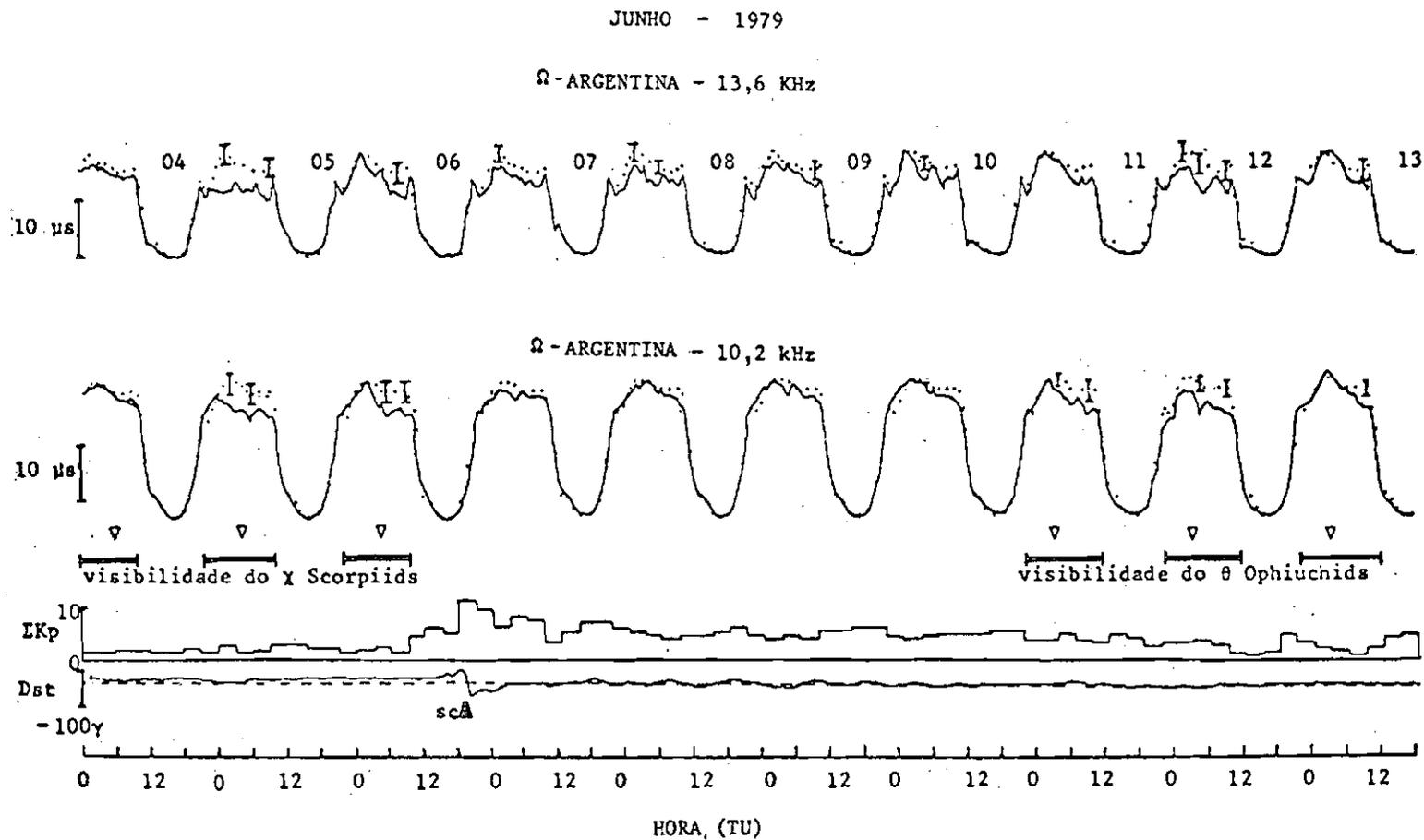


Fig. 3.10 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (13,6 KHz e 10,2 KHz) de 04 a 13 de junho de 1979 e os índices magnéticos  $\Sigma Kp$  e Dst.

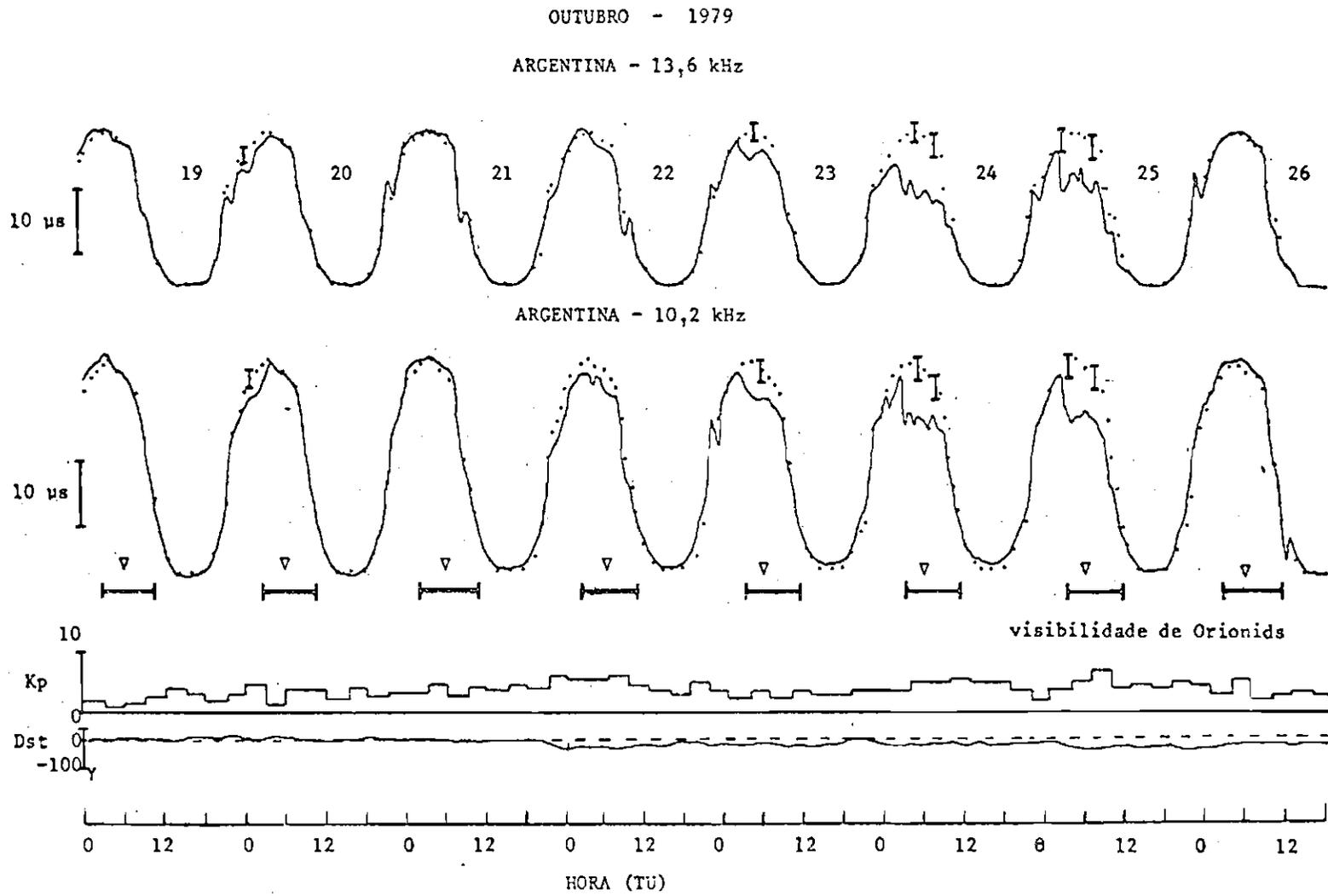


Fig. 3.11 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (13,6 KHz e 10,2 KHz) de 19 a 26 de outubro de 1979 e os índices magnéticos  $\Sigma Kp$  e Dst.

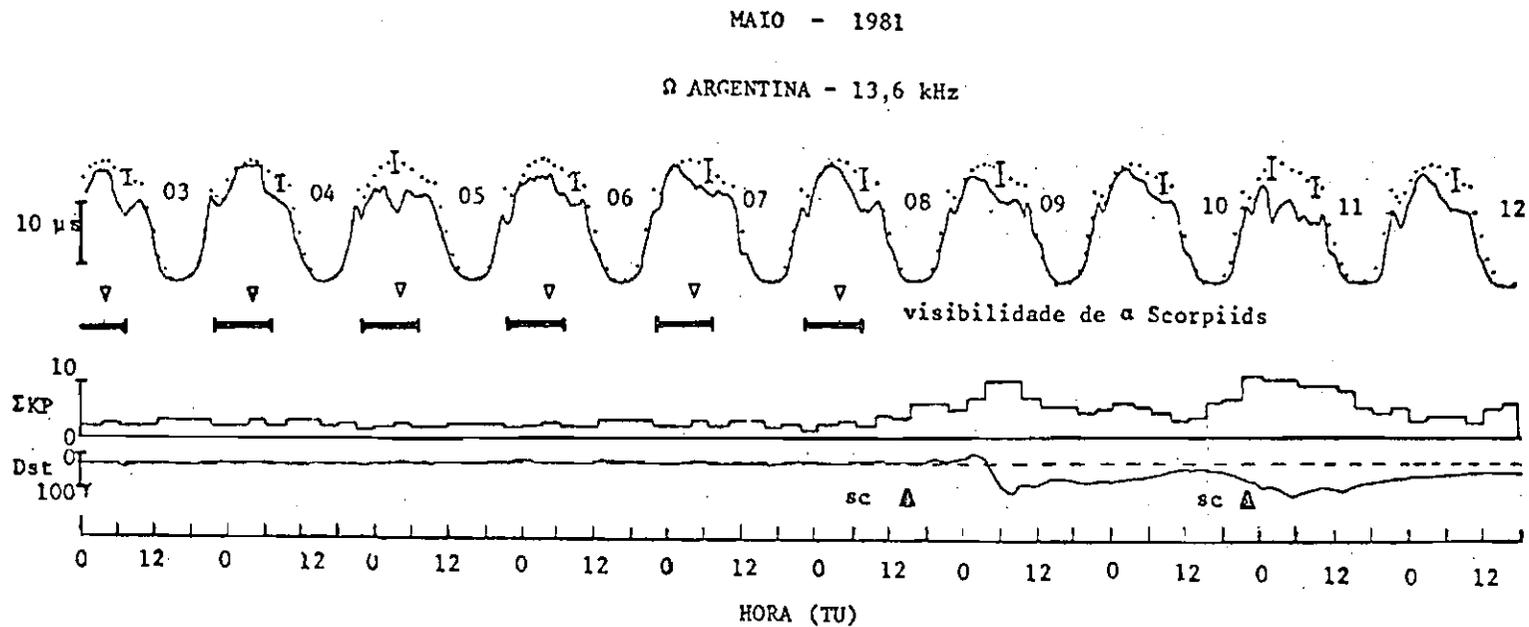


Fig. 3.12 - Variação diurna da fase do sinal VLF (13,6 KHz) de 03 a 12 de maio de 1981 e os índices magnéticos  $\Sigma K_p$  e Dst.

Observa-se que ocorrem anomalias de fase desde o dia 03, antes do sc, quando a atividade magnética encontra-se normal.

A máxima perturbação da fase observada ocorreu no dia 11 às 02:00 TU, apresentando  $\Delta\phi = -10 \mu s$  e  $\Delta h = -6,5 \text{ km}$  (Tabela 3.5). A fase mostrou grandes variações durante todo o período, não recuperando o seu nível normal até o final de maio.

Das tempestades magnéticas aqui apresentadas, é possível observar que, exceto para a de outubro de 1979, o avanço de fase ocorreu antes do início da variação do campo (sc).

Com o objetivo de explicar o desvio de fase observado antes do sc, fez-se uma análise completa da atividade solar no período. Foram verificados os índices magnéticos Ap,  $\Sigma Kp$  e Dst, a variação do vento solar e a detecção de partículas energéticas (prótons e elétrons). Analisaram-se também os magnetogramas registrados em Vassouras, Rio de Janeiro, para verificar a ocorrência de alguma perturbação no campo local. Não foi encontrada nenhuma perturbação no campo antes de sc. Todas as tempestades foram precedidas de no mínimo 5 dias calmos, inclusive a de maio de 1981, período bastante perturbado.

Existem evidências de que pode ocorrer precipitação de partículas em períodos calmos ou durante pequenas perturbações do campo, quando os cinturões de radiação estão saturados (Wentworth, 1964; Lauter and Knuth, 1967). A precipitação de partículas energéticas durante períodos quiescentes tem sido estudada principalmente em latitudes médias-altas,  $L = 4$  (Bembrook et alii, 1983). Na região da Anomalia Magnética Brasileira a presença de elétrons em tais períodos foi analisada por Batista (1975) através de estudo de ocorrência da camada E esporádica (Es), no período de 1973 - 1974. Portanto, existe a possibilidade de que os desvios de fase observados possam ser consequência de precipitação de elétrons.

Outras fontes de ionização também foram pesquisadas. A análise de fontes galácticas de raios X não revelou nenhuma emissão excessiva (flare). Com base nos trabalhos de Chilton (1961), Rumi (1982) e Vilas Boas et alii, (1985), fez-se um levantamento da ocorrência de chuvas de meteoros que estão associadas ao período em questão.

O efeito das chuvas de meteoros na atmosfera superior foi sugerido pela primeira vez por Lindermann e Dobson em 1923 e ficou bem estabelecido por Muller (1972), através da análise de perturbações na propagação de ondas em HF (alta frequência) e VHF (frequência muito alta).

Na baixa ionosfera, o efeito de meteoritos foi detectado pela primeira vez por Chilton (1961), através do estudo de anomalias de fase nos sinais de VLF que se propagam à longa distância. Rumi (1982) analisou dados de VLF e LF em trajetórias de curta distância, observando perturbações noturnas na região D da ionosfera. Vilas Boas et alii (1985) analisaram o comportamento de sinais de VLF se propagando à longa distância em trajetórias distintas (períodos de maio de 1981 e dezembro de 1975) e de sinais de VLF/LF em curta distância (maio de 1981). As anomalias de fase detectadas, que evidenciam um aumento da ionização, foram associadas a efeitos de meteoritos na baixa ionosfera.

Do estudo do período de ocorrência das chuvas de meteoros, através de dados fornecidos por Cook (1973) e Hughes (1978), selecionaram-se as seguintes chuvas de meteoros que estão associadas ao período analisado:  $\alpha$  Scorpiids,  $\chi$  Scorpiids,  $\theta$  Ophiuchids, Orionids e Geminids. As características básicas das chuvas são apresentadas na Tabela 3.5.

O radiante é definido como a região de maior incidência de partículas. O trânsito é considerado a hora (TU) em que o radiante alcança a elevação máxima, ou o ângulo zenital ( $\chi$ ) mínimo, na trajetória considerada. Para os cálculos aqui efetuados (Tabela 3.5), considerou-se o trânsito no ponto médio da trajetória.

TABELA 3.5

CHUVAS DE METEOROS

NOME	PERÍODO DE OCORRÊNCIA	CARACTERÍSTICA DO RADIANTE				
		DATA DO MÁXIMO	ASCENÇÃO RETA (°)	DECLINAÇÃO (°)	TRÂNSITO NO MEIO DA TRAJETÓRIA (TU)	ÂNGULO ZENITAL ( $\chi$ ) NA HORA DO TRÂNSITO (°)
$\alpha$ Scorpiids	11 abril a 12 maio	3 - 5 maio	240	-22	04:18	4
$\chi$ Scorpiids	27 maio a 20 junho	3 - 5 junho	240	-13	03:00	20
$\theta$ Ophiuchids	08 - 16 junho	13 junho	267	-28	04:00	5
Orionids	02 outubro a 07 novembro	21 outubro	95	+16	06:00	50
Geminids	04 - 16 dezembro	14 dezembro	112	+32	04:56	66

FONTE: Cook (1973), p. 184.

A análise das chuvas de meteoros (Cook, 1973; Hughes; 1978) mostrou que é a Geminids (Tabela 3.5) que está associada ao período de dezembro (Figuras 3.8 e 3.9), e o estudo da passagem do radiante revelou que este se encontra acima do horizonte ( $\chi \leq 80^\circ$ ), no ponto médio da trajetória, entre 02:00 e 08:00 TU. Denominou-se este período "visibilidade do radiante", o qual está representado nas Figuras 3.8 e 3.9 através de uma linha cheia. O triângulo aberto ( $\Delta$ ) indica o trânsito do radiante.

Para a tempestade de dezembro de 1977 (Figura 3.8), o desvio de fase observado no dia 10, antes do sc (03:30 TU, Tabela 3.4), apresenta boa associação com o trânsito do radiante (04:56 TU, Tabela 3.5). Esta diferença no tempo entre o máximo desvio de fase e o trânsito do radiante pode ser explicado pela não-homogeneidade do feixe de meteoros. Outro fator a considerar é o ângulo zenital do radiante que, às 03:30 TU, ( $\chi = 67^\circ$ ) difere apenas  $1^\circ$  da elevação máxima ( $\chi = 66^\circ$ ).

Outra anomalia de fase que pode estar associada à chuva Geminids é o avanço de fase que ocorreu no mesmo horário (05:00 TU) nos dias 16 e 17.

A mesma análise foi aplicada para o período de dezembro de 1978 (Figura 3.9). No entanto, a variação do sinal no dia 12, com início às 00:00 TU, não pode ser atribuída à Geminids, pois o radiante neste horário encontra-se abaixo do horizonte ( $\chi \approx 105^\circ$ ). Já o avanço de fase observado nos dias 13 e 14, nas frequências de 10,2 KHz e 13,6 KHz, pode ser consequência de duas fontes de ionização: elétrons precipitados devido à perturbação do campo e elétrons decorrentes da interação de meteoritos com a baixa ionosfera.

A chuva de meteoros associada ao período de junho de 1979, que está correlacionada ao avanço de fase observado aproximadamente 43 horas antes do sc, é a  $\chi$  Scorpiids (Tabela 3.5). O radiante, no ponto médio da trajetória considerada, está visível entre 21:00 - 09:00 TU (Figura 3.10), com o trânsito ocorrendo às 03:00 TU.

O desvio de fase do sinal de VLF no dia 05 teve início às 00:00 TU alcançando o valor máximo às 06:00 TU para a frequência de 10,2 KHz ( $\Delta\phi = -5,0 \mu\text{s}$ ) e às 06:30 TU para a de 13,6 KHz ( $\Delta\phi = 5,0 \mu\text{s}$ ). O ângulo zenital do radiante neste horário é  $\chi \approx 36^{\circ}$ , apresentando portanto uma boa elevação. A diferença observada entre a hora do trânsito do radiante e o máximo desvio de fase ( $\Delta\phi$ ) pode ser explicada pela irregularidade do feixe de meteoros. No dia 06, o máximo desvio de fase ocorre no mesmo horário do dia 05.

Observa-se também que a fase do sinal, principalmente em 13,6 KHz, permanece perturbada até 6 dias após o sc, apresentando um significativo avanço no dia 12 nas duas frequências. Tal comportamento é característico de tempestades de grande intensidade (Dst - 200  $\gamma$ ), o que não ocorre neste caso. Existe, portanto, a possibilidade de haver uma outra fonte de ionização associada ao período.

A análise das chuvas de meteoros mostrou uma boa correlação entre  $\Theta$  Ophiuchids (Tabela 3.5) e as anomalias de fase observadas especialmente nos dias 11 e 12 (Figura 3.10). O período de visibilidade do radiante ocorre entre 21:30 - 10:30 TU e o trânsito às 04:00 TU. Neste horário o radiante apresenta um ângulo zenital  $\chi \approx 5^{\circ}$ . No dia 12 observam-se dois horários em que o desvio de fase é máximo. Para a frequência de 13,6 KHz este ocorre às 04:30 TU com  $\Delta\phi = -5,0 \mu\text{s}$  e às 08:00 TU com  $\Delta\phi = -5,0 \mu\text{s}$ . Em 10,2 KHz o maior avanço de fase é registrado às 04:00 TU com  $\Delta\phi = -6,0 \mu\text{s}$  e às 08:00 TU, com  $\Delta\phi = -5,5 \mu\text{s}$ . O radiante para às 08:00 TU ainda se encontra com boa elevação ( $\chi \approx 50^{\circ}$ ).

O mês de outubro de 1979 (Figura 3.11) apresentou significativas anomalias de fase, as quais em geral estão associadas a grandes perturbações do campo magnético. Como já mencionado, nenhuma atividade solar ou magnética foi registrada.

A chuva de meteoros associada é a Orionids, cujas características estão descritas na Tabela 3.5. O radiante desta chuva apresenta uma elevação máxima de aproximadamente  $\chi \approx 50^{\circ}$ , com visibilidade entre 03:00 - 11:00 TU.

O máximo desvio de fase observado ocorreu no dia 24 às 05:50 TU para a frequência de 13,6 KHz com  $\Delta\phi = -9,0 \mu\text{s}$  e às 06:30 TU com  $\Delta\phi = -10,0 \mu\text{s}$  para a de 10,2 KHz, o qual apresentou boa associação com o trânsito do radiante (06:00 TU). Entretanto, outras perturbações de fase registradas não podem ser atribuídas a esta chuva, como por exemplo as do dia 22 às 02:00 TU (frequência 10,2 KHz) e 23 às 01:30 TU (frequência 13,6 KHz); pois o radiante nestes horários encontra-se abaixo do horizonte ( $\chi > 90^\circ$ ).

Finalmente, para maio de 1981 (Figura 3.12), a chuva de meteoros que apresentou correlação com as perturbações de fase, nos dias que antecedem a tempestade magnética (dias 03 a 07), foi a  $\alpha$  Scorpiids (Tabela 3.5).

Este período foi bem analisado por Vilas Boas et alii (1985), através de dois métodos distintos: estudo de sinais de VLF se propagando à longa distância ( $d = 2.800 \text{ km}$  e  $d = 7.800 \text{ km}$ ) nas frequências de 13,6 KHz e 17,8 KHz e de sinais de VLF/LF (20-60 KHz) em trajetória de curta distância (218 km).

A análise do radiante mostra que este se encontra visível entre 22:00 - 10:15 TU, com a hora do trânsito às 04:18 TU, o qual apresenta neste horário um ângulo zenital  $\chi \approx 11^\circ$ .

Observam-se anomalias de fase desde o dia 03 às 00:00 TU, com um desvio máximo em relação à média ( $\Delta\phi = 6,5 \mu\text{s}$ ) no dia 05 às 05:00 TU, as quais apresentam boa correlação com o trânsito do radiante.

As evidências observacionais apresentadas nesta seção indicam que os desvios de fase observados estão associados também com chuvas de meteoros, o que explica principalmente o aumento de ionização antes do sc. Quando o máximo das chuvas coincide com a perturbação do campo magnético, torna-se muito difícil determina-se o efeito na fase do sinal é decorrente da precipitação de elétrons ou de meteo

ritos, uma vez que não há medidas locais do fluxo destas partículas. Entretanto, durante a fase principal de algumas das tempestades magnéticas, a análise do trânsito do radiante da chuva de meteoros mostrou boa correlação com o máximo avanço de fase observado.

O aumento da densidade eletrônica noturna na baixa ionosfera associada à anomalia magnética brasileira, devido à presença de meteoritos, não é bem conhecida. A primeira estimativa foi feita por Vilas Boas et alii (1985) que encontraram para uma altura de 87 km, uma densidade da ordem de  $10^4$  elétrons/cm<sup>3</sup> no dia de maior perturbação (5 de maio de 1981). Este resultado mostrou boa concordância com o valor encontrado por Nicolet (1955) para a região E noturna (100 km), que foi da ordem de  $10^4$  elétrons/cm<sup>3</sup>.

A densidade de ionização decorrente dos elétrons precipitados foi estimada neste trabalho em aproximadamente  $10^4$  elétrons/cm<sup>3</sup> para altura de aproximadamente 78 - 80 km (região D), para o período de máxima atividade magnética e é apresentada no Capítulo 4.

### 3.3.3 - PERÍODOS QUE INDICAM A PRECIPITAÇÃO DE ELÉTRONS ANTES DO INÍCIO DA PERTURBAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO:

Os dados observacionais aqui selecionados apresentam como característica comum significativos desvios de fase antes do início da tempestade magnética.

Os períodos em questão são: 22 a 28 de março de 1976 (Figura 3.13), 16 a 25 de maio de 1976 (Figura 3.14), 02 a 11 de julho de 1979 (Figura 3.15), 29 de novembro a 08 de dezembro de 1979 (Figura 3.16) e 12 a 23 de fevereiro de 1980.

Os parâmetros básicos do campo magnético são apresentados na Tabela 3.6. Os valores foram obtidos do Solar Geophysical Data (NOAA, 1976, 1979, 1980).

TABELA 3.6

PARÂMETROS DO CAMPO-MAGNÉTICO

FIGURA	PERÍODO	INÍCIO SÚBITO (SC)		MÁXIMO Dst		MÁXIMA $\Sigma Kp$	
		DIA	HORA (TU)	DIA	VALOR ( $\gamma$ )	DIA	VALOR
3.13	22 - 28 março 1976	25	23:00	26	-229	26	55-
3.14	16 - 25 maio 1976	19	16:49	20	-41	20	26
3.15	02 - 11 julho 1979	03* 03** 06	03:00 05:33 19:30	03	+73	07	30
3.16	29 novembro- 08 dezembro 1979	30	07:38	30	-33	04	24
3.17	12 - 23 fevereiro 1980	14 15	03:09 12:34	16	-121	16	34+

\* SC registrado apenas no Observatório de Hyderabad (07°N).

\*\* SC registrado apenas no Observatório de Guam (04°N).

FONTE: NOAA (1976, 1979, 1980).

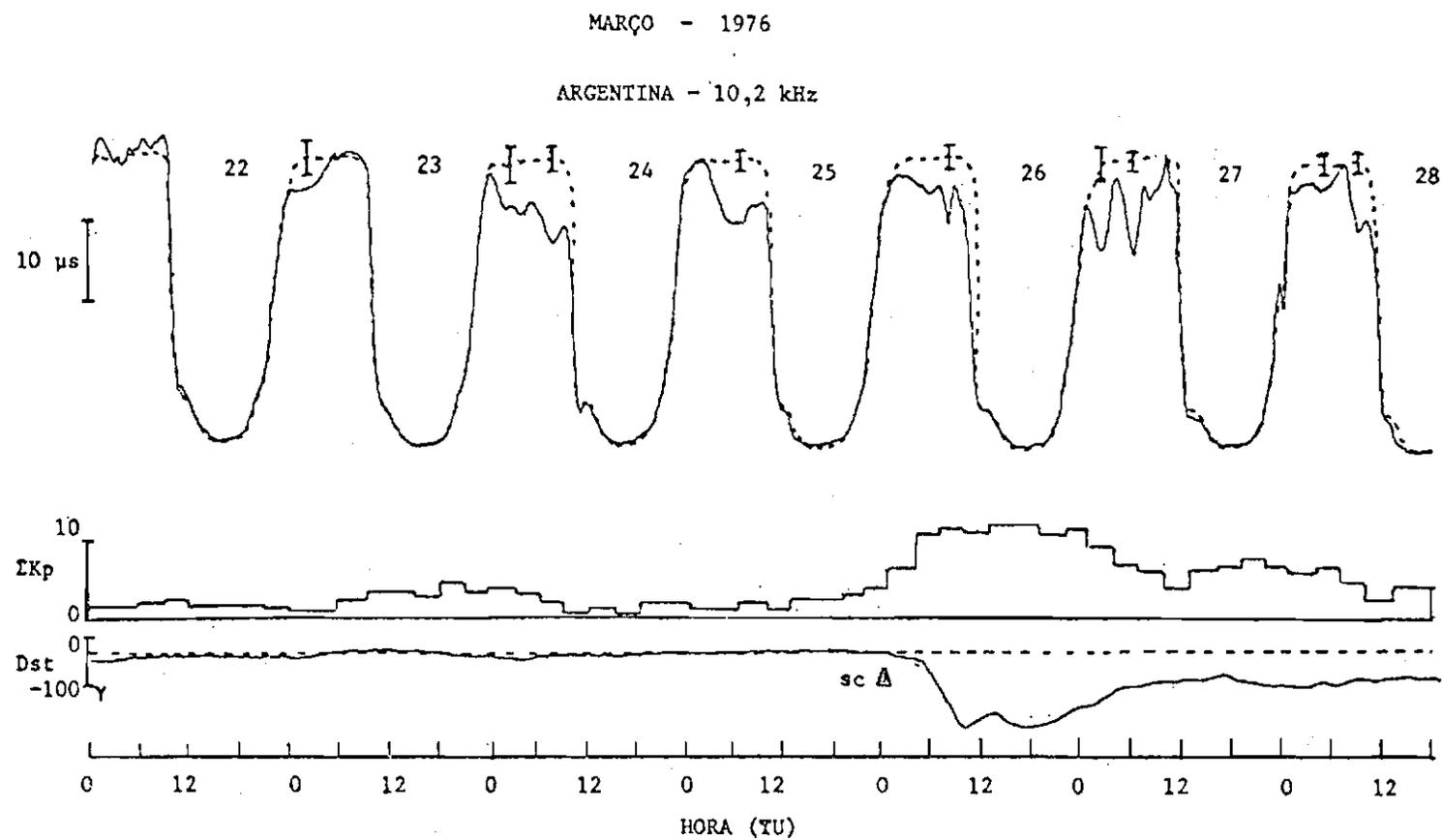


Fig. 3.13 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (10,2 kHz) de 22 a 28 de março de 1976 e os índices magnéticos  $\Sigma K_p$  e Dst.

MAIO - 1976

ARGENTINA - 10,2 kHz

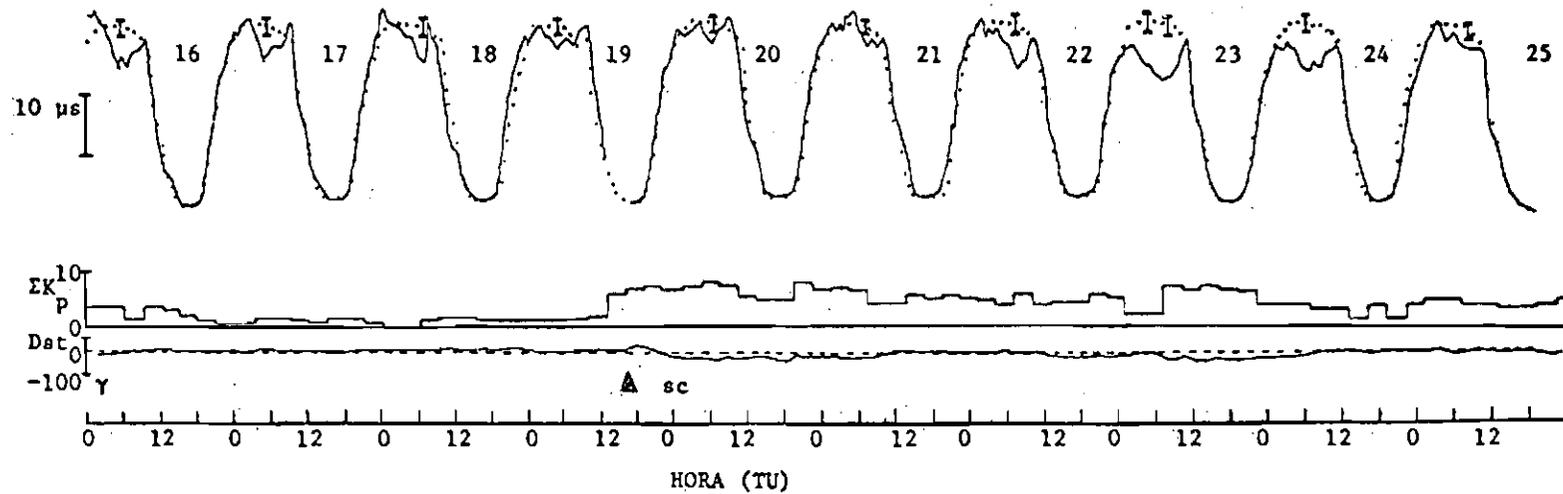
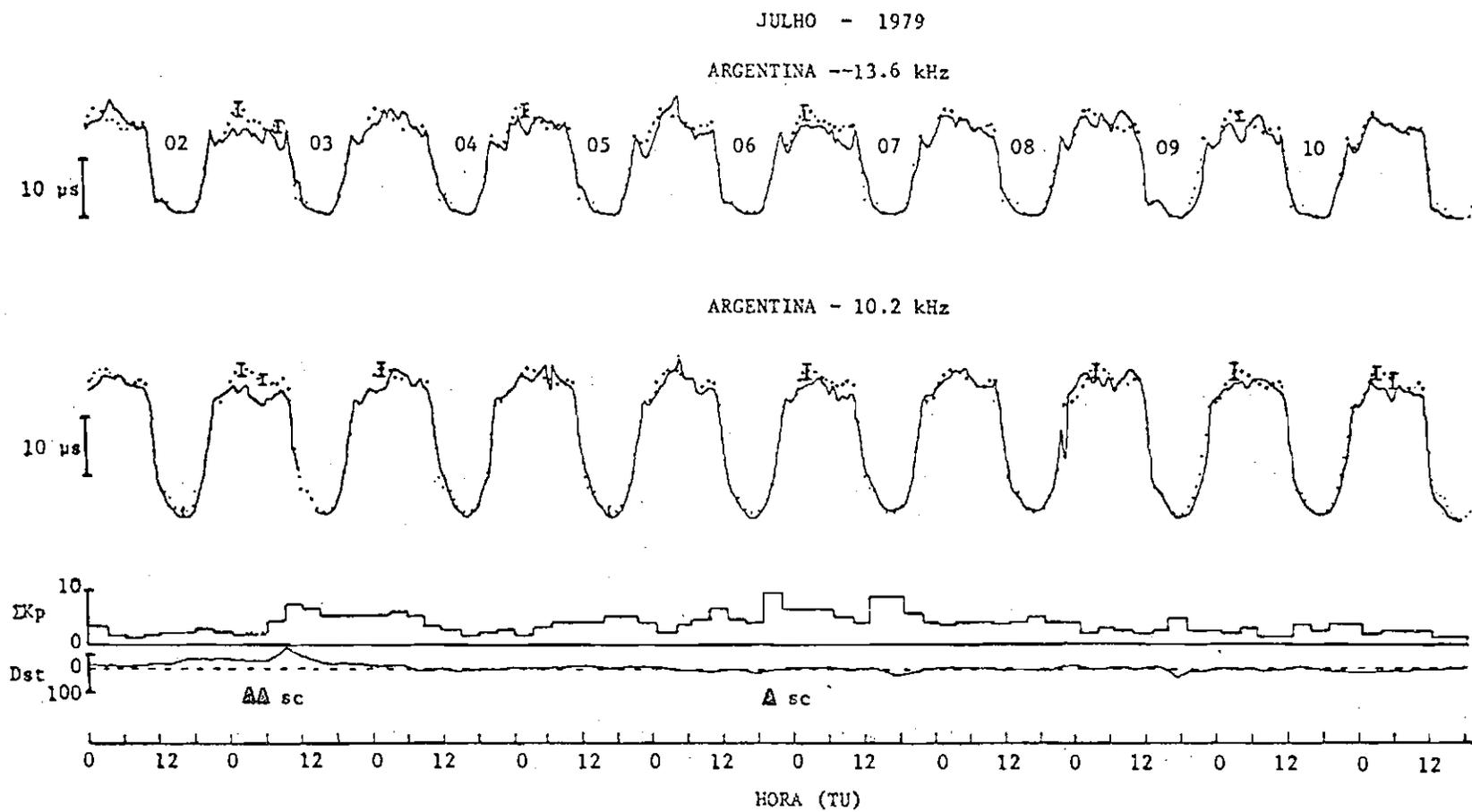


Fig. 3.14 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (10,2 KHz) de 16 a 25 de maio de 1976 e os índices magnéticos  $\Sigma K_p$  e Dst.



- 79 -

Fig. 3.15 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (13,6 KHz e 10,2 KHz) de 02 a 12 de julho de 1979 e os índices magnéticos ΣKp e Dst.

NOVEMBRO - DEZEMBRO - 1979

$\Omega$  - ARGENTINA - 13,6 kHz

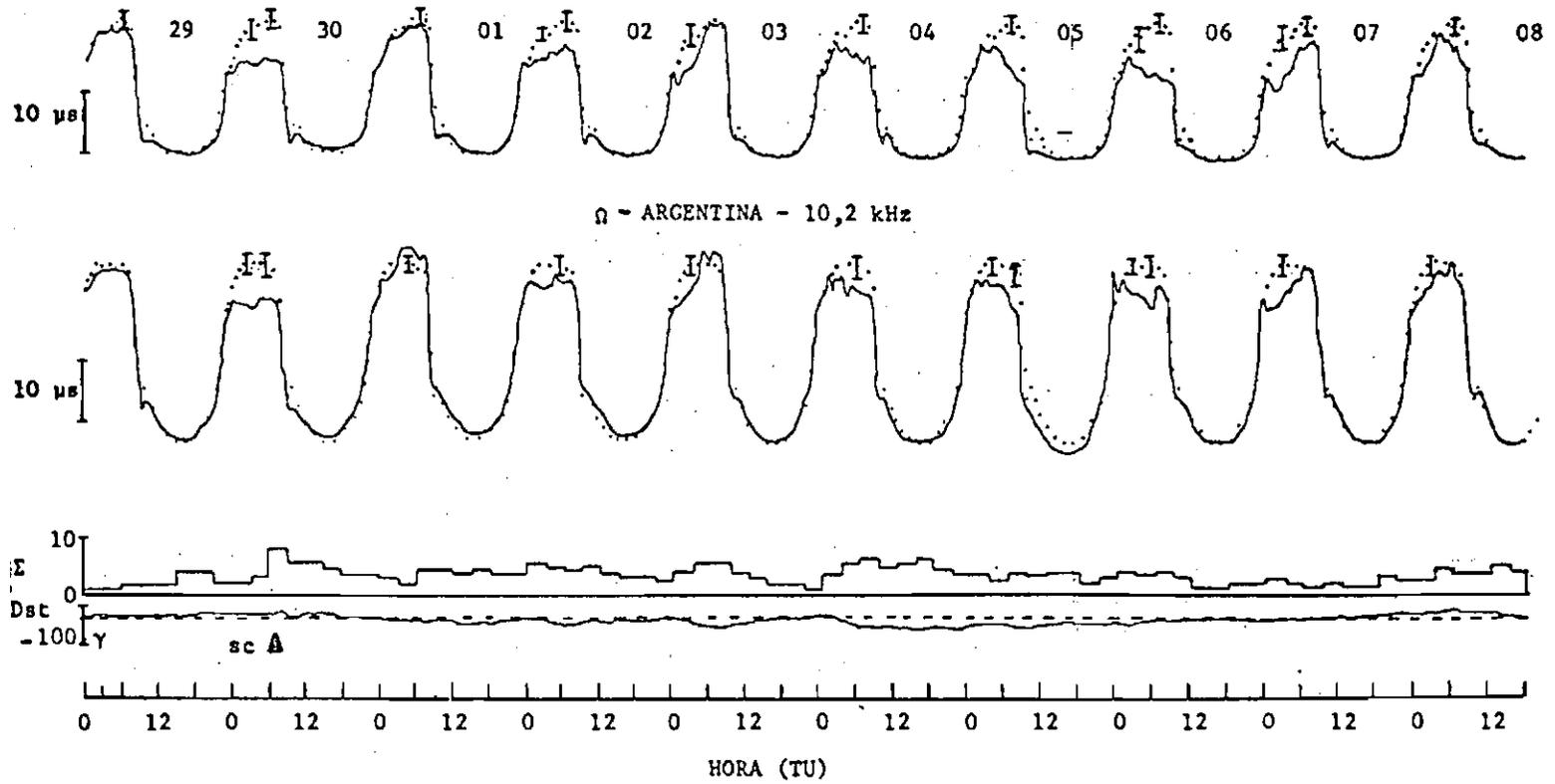
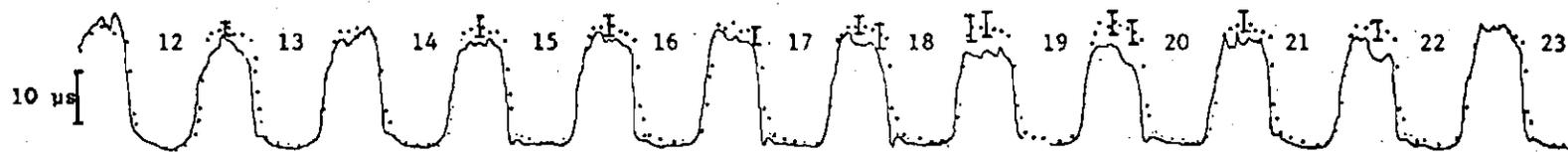


Fig. 3.16 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (13,6 KHz e 10,2 KHz) de 29 de novembro a 8 de dezembro de 1979 e os índices magnéticos  $\Sigma Kp$  e Dst.

FEVEREIRO - 1980

Ω-ARGENTINA - 13,6 kHz



Ω-ARGENTINA - 10,2 kHz

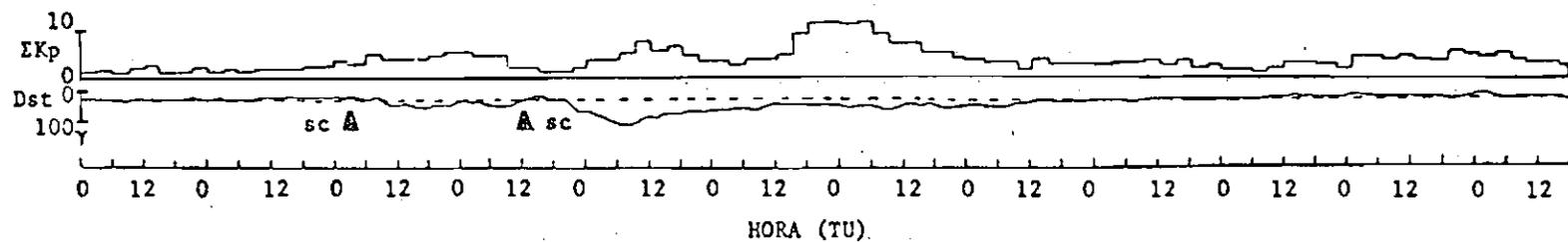
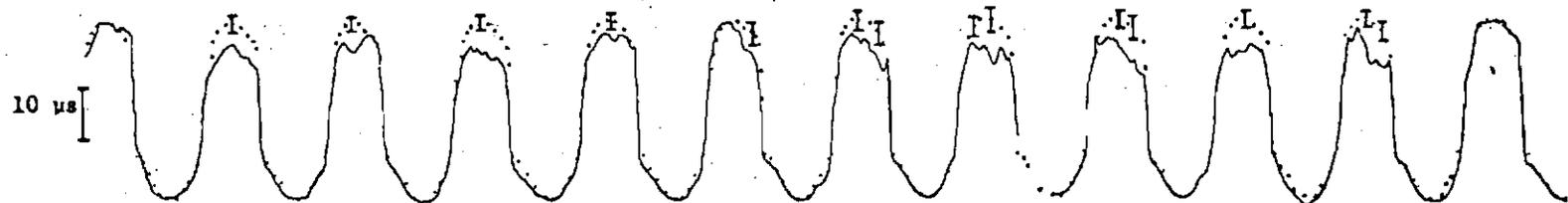


Fig. 3.17 - Variação diurna da fase do sinal de VLF (13,6 KHz e 10,2 KHz) de 12 a 23 de fevereiro de 1980 e os índices magnéticos ΣKp e Dst.

A Tabela 3.7 fornece as características principais da variação de fase. O critério adotado é o mesmo das seções anteriores.

A tempestade de março de 1976 (Figura 3.13) apresentou um sc dia 25 às 23:00 TU, com uma variação máxima dia 26 de  $Dst = -229\gamma$  (Tabela 3.6). Os dados de fase mostram desvios significativos em relação à média dos dias calmos, desde o dia 23, 71 horas antes do sc. (Tabela 3.7).

A análise da perturbação do campo mostrou variações de pequenas intensidades com a ocorrência de 9 tempestades magnéticas entre os dias 6 e 20.

A atividade solar neste período é bastante intensa.

Esta tempestade foi também analisada em outras latitudes. Manzano et alii, (1981) observaram simultaneamente as camadas D, E e F através de técnicas distintas (já mencionadas na Seção 3.3.1) entre as latitudes  $45^{\circ}N - 52^{\circ}S$ . Verificaram um decréscimo da densidade eletrônica em todas as camadas, algumas horas antes do sc (~3 horas). O aumento da concentração dos elétrons foi observado a partir das 06:00 LT do dia 26, iniciando-se nas regiões aurorais e propagando-se para as baixas latitudes.

Muraoka (1979) analisou a propagação de sinais de VLF, cujo trajeto encontra-se entre as latitudes  $48^{\circ}N$  e  $45^{\circ}S$ , com uma distância de 8,0 Mm e dados de ionossonda vertical, localizada em  $45,5^{\circ}N$  e em  $39,5^{\circ}N$ . Os sinais observados apresentaram perturbações logo após o sc, no dia 26, não sendo verificada nenhuma anomalia no dia 25.

Portanto, os desvios de fase dos sinais de VLF, propagando-se na trajetória  $\Omega$ -Argentina/Atibaia, ocorridos entre os dias 23 e 25, parecem indicar perturbações localizadas na Anomalia Magnética Brasileira.

TABELA 3.7

CARACTERÍSTICAS E PARÂMETROS OBTIDOS DOS SINAIS DE VLF PARA AS TEMPESTADES MAGNÉTICAS DE MARÇO E MAIO DE 1976; MAIO E JUNHO DE 1979 E FEVEREIRO DE 1980

FIGURA	PERÍODO ANALISADO	FREQUÊNCIA UTILIZADA (KHz)	PERÍODO EM QUE OCORREU O DESVIO DE FASE ( $\Delta\phi$ )						MÁXIMO DESVIO DE FASE OBSERVADO $\Delta\phi$ ( $\mu s$ )	MÁXIMA VARIACÃO DE ALTURA OBSERVADA $\Delta h$ (km)	MÁXIMO GRADIENTE DE CONDUTIVIDADE OBSERVADA $\beta$ ( $km^{-1}$ )	DESVIO PADRÃO ( $\sigma$ ) ( $\mu s$ )	DIFERENÇA DE TEMPO (HORAS) ENTRE O INÍCIO SÚBITO (SC) E O INÍCIO DO DESVIO DE FASE	
			INÍCIO		MÁXIMO		FIM						ANTES	DEPOIS
			DIA	HORA (TU)	DIA	HORA (TU)	DIA	HORA (TU)						
3.13	22 - 28 março 1976	10,2	23	00:00	27	04:00	-	-	-13,0	-9,0	0,7	1,2	71 <sup>h</sup> 00 <sup>m</sup>	-
3.14	16 - 25 maio 1976	10,2	16	03:00	23	05:30	-	-	-9,0	-6,5	0,63	1,2	85 <sup>h</sup> 50 <sup>m</sup>	-
3.15	02 - 11 julho 1979	13,6	03	00:00	03	01:30	-	-	-5,0	-3,0	0,58	1,0	03 <sup>h</sup> 00 <sup>m</sup>	-
		10,2	03	01:30	03	05:30	-	-	-5,0	-2,0	0,54	1,0	01 <sup>h</sup> 30 <sup>m</sup>	-
3.16	29 nov 08 dez 1979	13,6	30	00:30	06	05:30	-	-	-10,5	-6,5	0,66	1,0	07 <sup>h</sup> 08 <sup>m</sup>	-
		10,2	30	00:30	06	05:30	-	-	-7,5	-4,0	0,60	1,2	07 <sup>h</sup> 08 <sup>m</sup>	-
3.17	12 - 23 fevereiro 1980	13,6	13	00:30	19	03:00	22	09:00	-6,0	-3,5	0,58	1,0	26 <sup>h</sup> 40 <sup>m</sup>	-
		10,2	13	00:30	19	05:00	22	09:00	-11,0	-5,0	0,55	1,0	26 <sup>h</sup> 40 <sup>m</sup>	-

Para maio de 1976 (Figura 3.14), anomalias de fase são verificadas desde o dia 16. Na realidade a fase mostrou perturbações durante todo o mês.

O campo magnético apresenta-se bastante perturbado desde a tempestade de 26 de março. No dia 03 ocorreu uma tempestade magnética de intensidade moderada,  $Dst = 110\gamma$ , com o campo retornando ao normal no dia 10. Pequenas variações no  $Dst$  foram registradas nos dias 11 e 12.

A atividade solar é calma entre os dias 06 e 14, apresentando regiões ativas no dia 15.

Dia 19 ocorre uma pequena variação com o  $Dst = -41\gamma$  para o valor máximo (dia 20, Tabela 3.6).

O maior desvio de fase foi verificado no dia 25 com um  $\Delta\phi = -9,5\mu s$  (Tabela 3.7).

A tempestade de julho de 1979 (Figura 3.15) foi de intensidade moderada com  $Dst = +73\gamma$ . O início da perturbação do campo ocorreu dia 03, registrado apenas em dois observatórios (Tabela 3.6).

Um aspecto interessante é a máxima variação de fase ocorrida antes do sc: às 01:30 TU para a frequência de 13,6 KHz com  $\Delta\phi = -5\mu s$  e às 05:30 para a de 10,2 KHz, com  $\Delta\phi = -5,0\mu s$  (Tabela 3.7). Para o resto do período a fase não apresentou grandes variações. Outro sc é registrado dia 06 às 19:30 TU (Tabela 3.6) com o campo apresentando pequenas perturbações. O máximo valor alcançado pelo  $Dst$  é  $-31\gamma$ .

A atividade solar foi alta entre os dias 01 e 04.

No período de novembro de 1979 (Figura 3.16) ocorreu uma tempestade magnética de fraca intensidade ( $Dst = -33\gamma$ ), com um sc dia 30 às 07:38 TU (Tabela 3.6).

Dados de fase do sinal de VLF, em 10,2 KHz e 13,6 KHz apresentaram significativo avanço em relação a média dos dias calmos para as frequências analisadas ( $\Delta\phi = 8,0 \mu s$ ), aproximadamente 7 horas antes do sc. A fase permanece anômala durante todo o período analisado (Tabela 3.7).

O maior desvio de fase observado ocorreu no dia 06 às 05:30 TU com  $\Delta\phi = -10,5 \mu s$  para a frequência de 13,6 KHz e às 05:30 TU com  $\Delta\phi = -7,5 \mu s$  para a de 10,2 KHz.

A atividade solar foi intensa no período, com a presença de ocorrência de um PCA (Polar Cap Absorption). Entretanto, a análise do Índice Dst registra variações apenas moderadas. Outra tempestade iniciou-se no dia 04 de dezembro, sem a detecção de um sc. O máximo valor do Dst foi  $-44 \gamma$  no dia 04.

Finalmente, para fevereiro de 1980 (Figura 3.17) ocorre uma tempestade de intensidade moderada, Dst =  $-121 \gamma$ , com o registro de dois sc: dia 12 às 03:09 TU e dia 15 às 12:34 TU (Tabela 3.7).

Verificaram-se desvios de fase significativos desde o dia 13 às 00:30 TU, antes do início da perturbação do campo. O maior avanço de fase ocorreu dia 19 nas duas frequências. A de 13,6 KHz apresentou uma variação de  $-6,0 \mu s$  às 03:00 TU e a de 10,2 KHz,  $-11 \mu s$  às 05:00 TU (Tabela 3.7).

Neste período o Sol esteve bastante ativo, com eventos importantes, tendo sido observada no dia 06 a ocorrência de um PCA.

Objetivando explicar os desvios de fase antes do início da tempestade magnética, seguiu-se o mesmo critério da seção anterior. Pesquisou-se a presença de outras fontes de ionização nestes períodos tais como: fontes galácticas de Raios X, chuvas de meteoros, perturbações localizadas do campo magnético. Não foi evidenciado nada que justificasse tais anomalias. No entanto, existe a possibilidade de elas

serem conseqüência de precipitação de elétrons durante a fase não-perturbada do campo.

Existem evidências experimentais que o processo de precipitação pode ocorrer durante a fase quiescente do campo, quando os cinturões de radiação estão saturados. As micropulsações magnéticas, sempre presentes após períodos ativos, podem ser as responsáveis por intensas precipitações, mesmo durante pequenas perturbações do campo (Wentworth, 1964; Lauter and Knuth, 1967; Batista, 1975, Benbrook et alii, 1983).

### 3.4 - OUTRAS ANÁLISES

Fez-se uma correlação entre a ocorrência de PCA (Polar Cap Absorption) com o período que a fase se encontra perturbada. Não foi encontrada nenhuma relação direta entre a detecção de prótons e os desvios de fase.

Nenhum avanço diurno de fase foi detectado, mesmo durante tempestades magnéticas intensas.

Encontrou-se uma variação média da fase, e o número de dias perturbados é maior no verão do que no inverno. Este resultado é consistente com os analisados em latitudes médias. Lauter and Knuth (1967) sugerem que tal fato é decorrente da variação na densidade do ar nos pontos de espelhamento das partículas no cinturão externo de radiação.

### 3.5 - ANÁLISE DAS TEMPESTADES MAGNÉTICAS DE ABRIL E MAIO DE 1981 REALIZADA ATRAVÉS DE DADOS DE IONOSSONDA OBLÍQUA DE VLF/LF

As tempestades magnéticas de abril e maio de 1981 foram também analisadas através de dados de ionossonda oblíqua de VLF/LF (20 KHZ - 60 KHZ).

Como já mencionado no Capítulo 2, esta técnica de observação permite a obtenção de duas ondas (ionosférica e terrestre), as quais são perfeitamente separadas no tempo. Os sinais recebidos são submetidos a uma análise harmônica de Fourier, obtendo-se a fase e amplitude do sinal. Pode-se então calcular as alturas e os coeficientes de reflexão.

Para a representação dos períodos, selecionaram-se 3 frequências de todas as analisadas: 25 KHz, 35 KHz e 45 KHz.

A média dos dias calmos está representada pela linha pontilhada. Foram escolhidos os mesmos dias utilizados para a análise dos dados de VLF.

A leitura dos dados foi feita de 10 em 10 minutos e, dependendo do efeito analisado, de 5 em 5 minutos.

A tempestade de abril de 1981 (Figura 3.18), como já mencionado anteriormente, é de forte intensidade, com  $Dst = -273\gamma$ , apresentando um sc às 07:22, dia 11, e outro às 13:40 TU no mesmo dia (Tabela 3.1).

Na Figura 3.18 estão representadas as alturas de reflexão das frequências de 25, 35, 55 KHz. Para os dias 11, 12, 13 e 14 foi registrado o período das 22:00 às 08:00 TU.

Observa-se um levantamento da altura de reflexão, o que evidencia um decréscimo da densidade eletrônica em todos os dias analisados. Verifica-se que o efeito é mais pronunciado na frequência de 25 KHz.

As linhas tracejadas indicam interferência de sinais, resultando em alturas irrealistas. Este fenômeno é denominado "Dupla Reflexão" e está previsto teoricamente. A causa deste efeito é que a camada ionizada está mais alta que a altura de reflexão da frequência principal. Em geral tal efeito ocorre devido à acomodação da camada ionosférica

rífica ou devido a fases de transição noite - dia, ou ainda decorrente de grandes perturbações ionosféricas. Em geral o efeito tem início em frequências mais altas, ocorrendo um deslocamento no tempo e na frequência (Figura 3.19).

O melhor indicador de mudanças na camada ionizada é o coeficiente de reflexão que está associado com a absorção da onda.

Dados experimentais indicam que o coeficiente de reflexão é um precursor da variação de altura, o qual apresenta perturbações algumas horas antes de a altura se modificar. Isto significa que a densidade eletrônica se alterou, porém não é alta o suficiente para modificar as alturas de reflexão.

Moura and Abrahão (1985) observaram que a dupla reflexão durante tempestades magnéticas é de curta duração; em outras ocasiões apresenta muitas oscilações, as quais podem ter duração de horas.

O coeficiente de reflexão menor que a média indica um aumento de ionização e o de reflexão maior indica menor absorção da onda.

Os dados de abril mostram um forte decréscimo da densidade eletrônica. A altura de reflexão variou de 86 para 90 km.

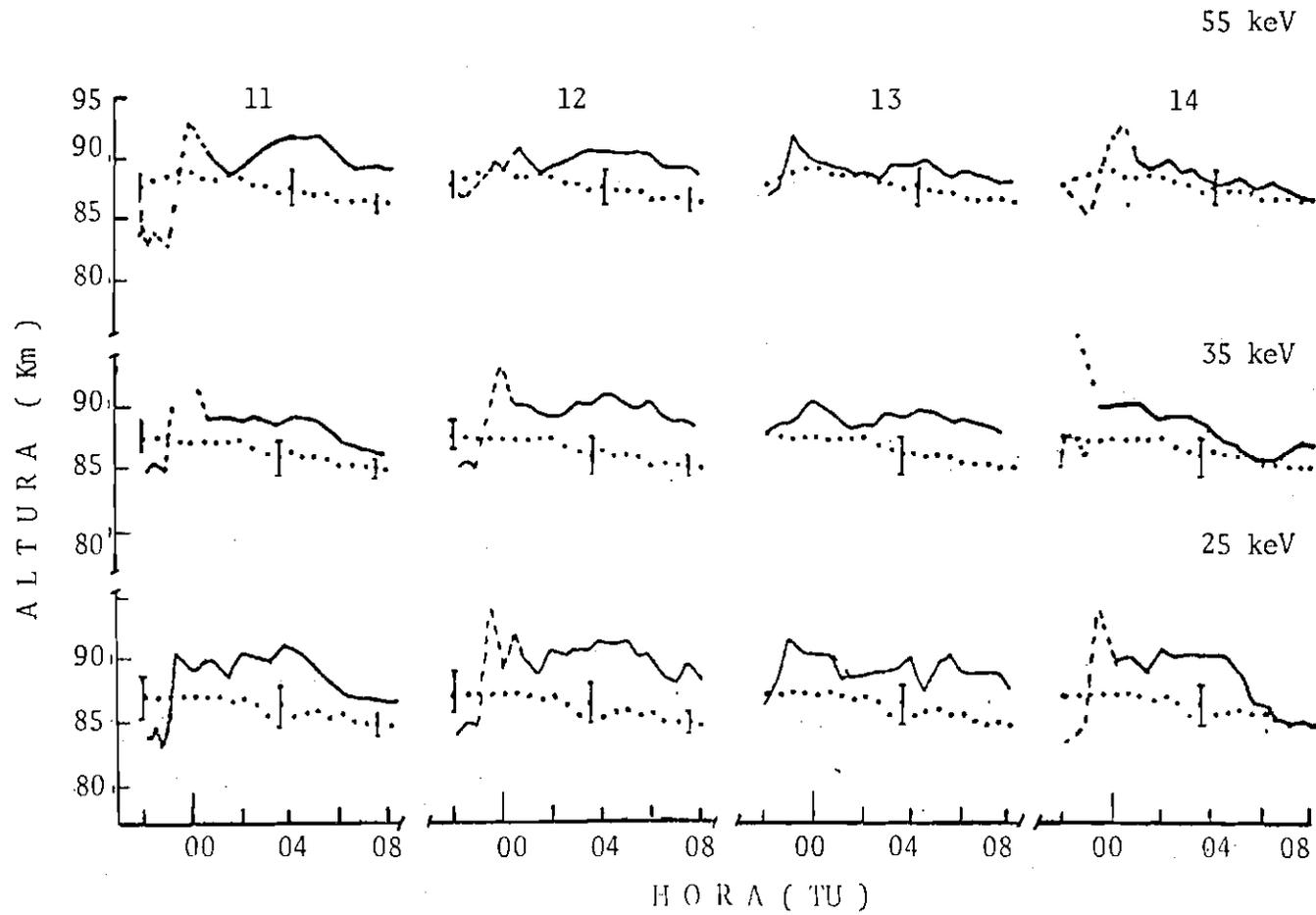


Fig. 3.18 - Alturas de reflexão dos sinais de ionossonda oblíqua de VLF/LF para o período de 11 a 14 de abril de 1981.

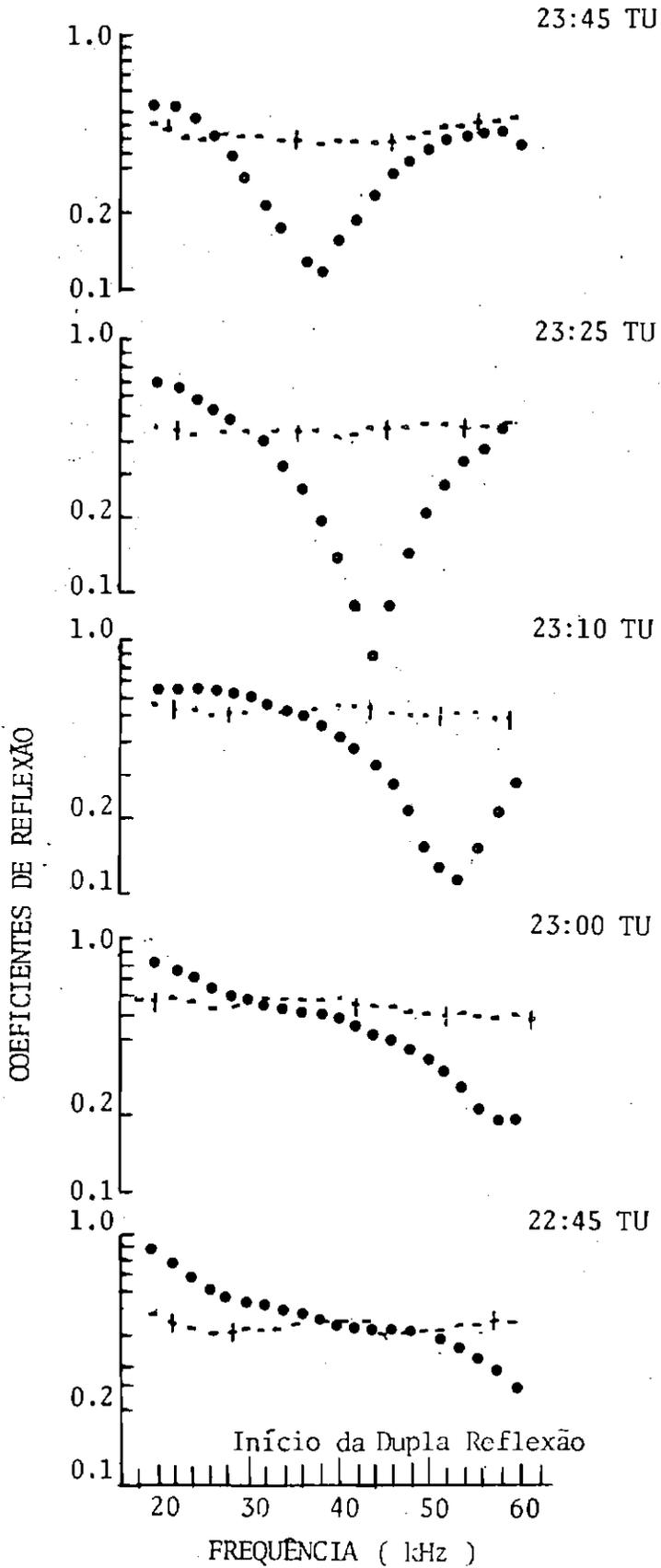


Fig. 3.19 - Coeficiente de reflexão na hora da dupla reflexão.

### 3.5.1 - COMPARAÇÃO ENTRE OS DADOS DE IONOSSONDA E OS SINAIS DE VLF:

Os sinais se propagam em regiões distintas, porém a análise comparativa mostrou alguns aspectos interessantes.

Na Figura 3.20 observa-se que na hora em que ocorreu a dupla reflexão também ocorreu uma conversão modal no sinal (22:30 TU).

No dia 13, grandes desvios de fase estão presentes no sinal da Argentina. Apesar de os sinais de ionossonda ainda apresentarem levantamento da camada de reflexão, a frequência de 25 KHz registra uma queda em altura no mesmo horário. (aproximadamente às 04:30 TU).

Outro fator a considerar é que a frequência de 25 KHz mostrou maior perturbação em relação às outras, sugerindo com isto perturbações localizadas.

Para o período de maio de 1981 observa-se que as alturas de reflexão estão mais perturbadas, ocorrendo alguns abaixamentos significativos (Figura 3.21). Foram selecionados os dois dias mais significativos do período.

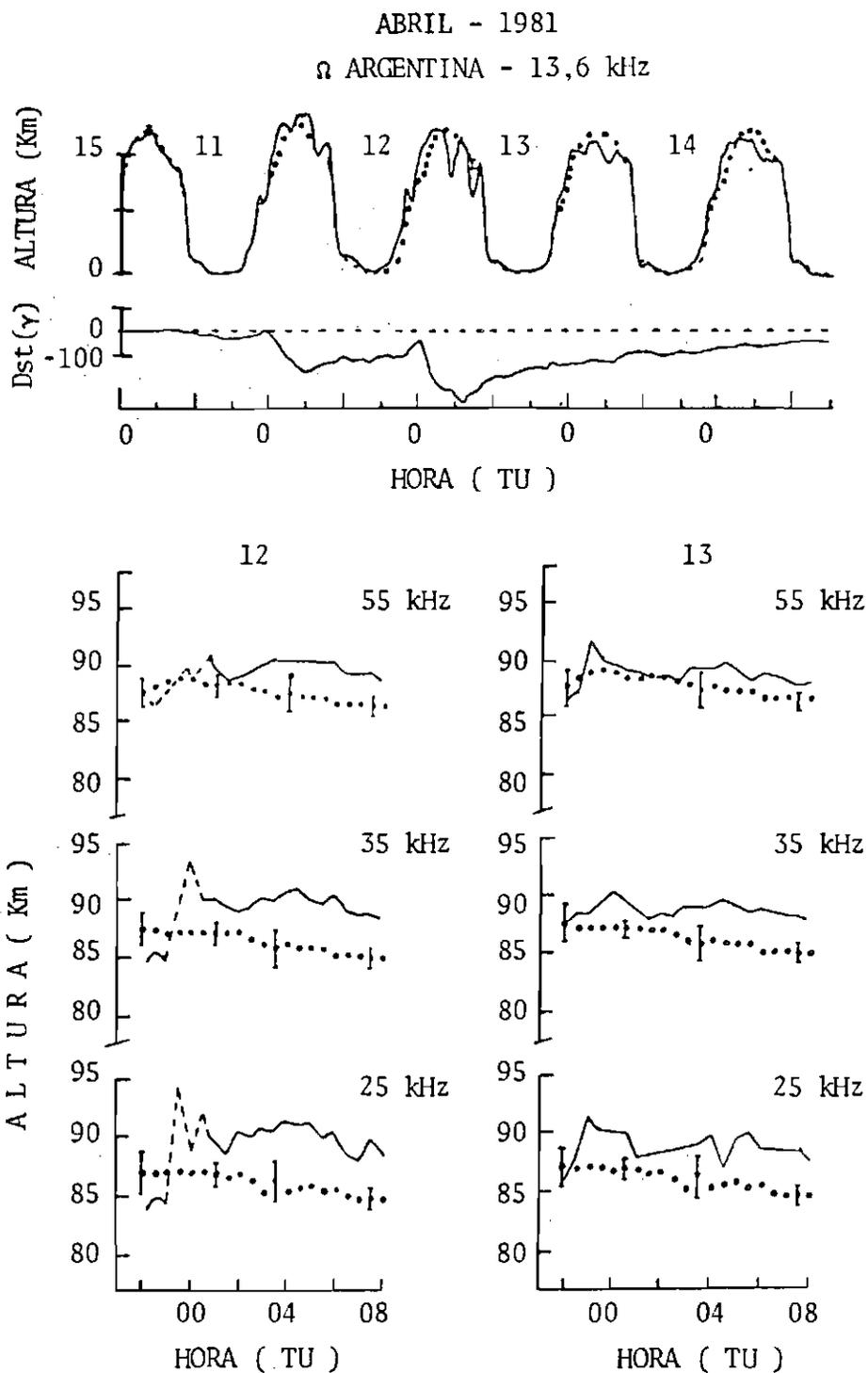


Fig. 3.20 - Comparação das alturas de reflexão dos sinais de curta e longa trajetórias para abril de 1981.

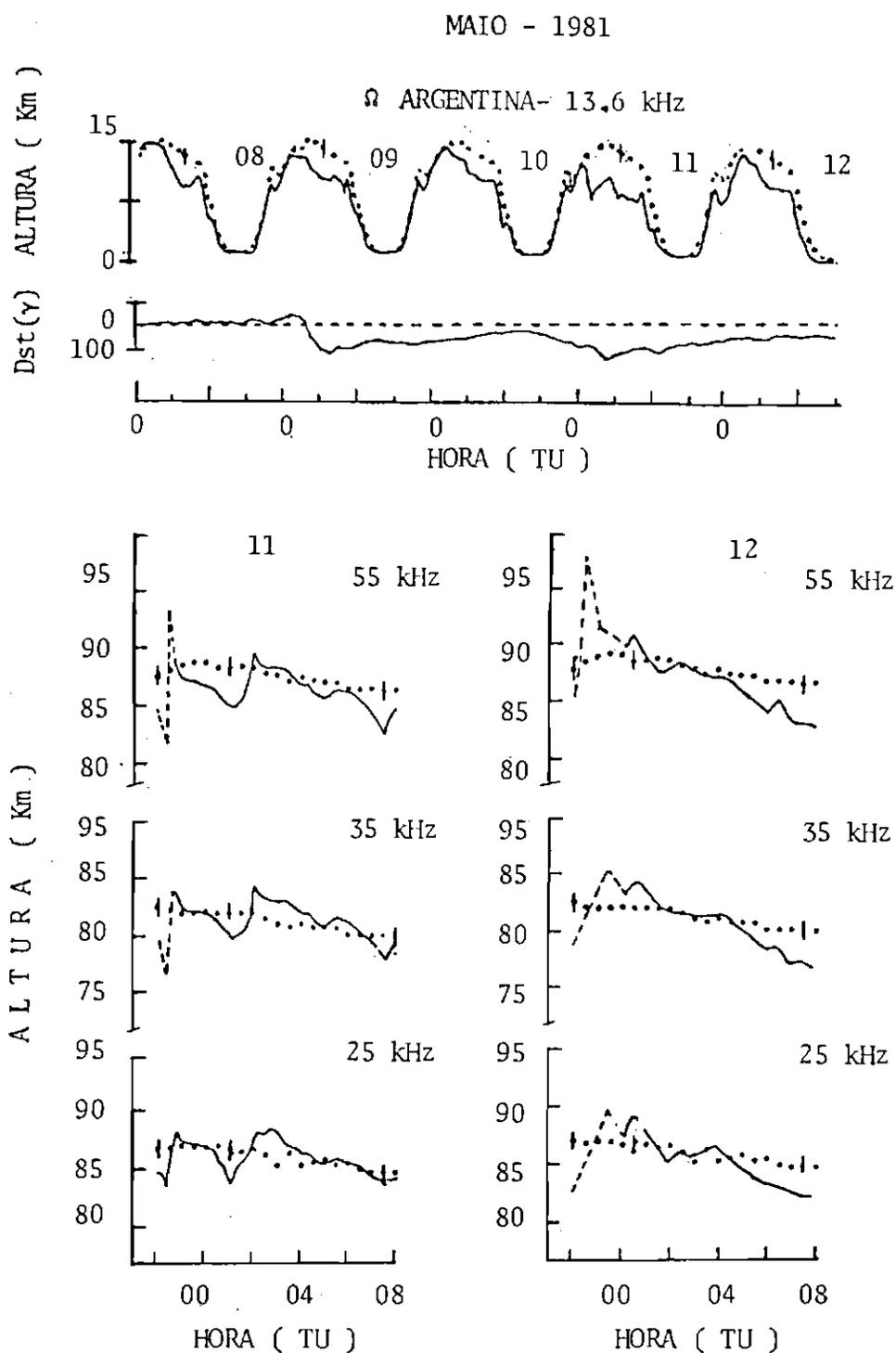


Fig. 3.21 - Comparação das alturas de reflexão dos sinais de curta e longa trajetórias para maio de 1981.

## CAPÍTULO 4

### PROPAGAÇÃO DE SINAIS DE VLF NO GUIA DE ONDA TERRA-IONOSFERA

A propagação de ondas de VLF na atmosfera terrestre pode ser analisada de duas formas: pela teoria dos raios (para distâncias de propagação de  $d < 500$  km) e pela teoria dos modos de propagação (para  $d > 500$  km) (Davies, 1965).

A teoria dos modos de propagação considera a onda eletromagnética se deslocando entre dois condutores (guia de ondas), e o campo total da onda é a soma de todos os modos de propagação. Este processo é vantajoso quando se trabalha com grandes distâncias, pois apenas os primeiros modos de propagação são relevantes, sendo os demais mais fortemente atenuados, (Wait and Spies, 1964).

#### 4.1 - DETERMINAÇÃO DA ALTURA DO GUIA DE ONDA

Um estudo detalhado da propagação de ondas de rádio no guia de onda Terra-ionsfera foi feito por Budden (1961) e Wait (1962). São vários os modelos apresentados e a escolha de um ou outro dependerá do que se deseja analisar e da trajetória de propagação considerada.

O modelo adotado para a ionsfera por Wait e Spies (1964), que apresenta variação exponencial tanto para a densidade eletrônica como para a frequência de colisão, é bastante satisfatório e apresenta boa concordância com os resultados experimentais.

Tal modelo supõe a ionsfera uma superfície refletora difusa, onde a densidade eletrônica ( $N_e$ ) e a frequência de colisão ( $\nu$ ) variam com a altura ( $h$ ) da seguinte forma:

$$N_e(h) = N_e(h_0) \exp [b (h - h_0)] , \quad (4.1)$$

$$\nu (h) = \nu (h_0) \exp [-a (h - h_0)] , \quad (4.2)$$

onde:

$N_e(h_0)$  é a densidade eletrônica na altura de referência  $h_0$ ;  
 $\nu (h_0)$  é a frequência de colisão na altura de referência  $h_0$ ;  
 $a$  e  $b$  são parâmetros físicos relacionados com o gradiente vertical de ionização,  $\beta = (a + b)$ ,  $\text{km}^{-1}$ .

O parâmetro de condutividade  $\omega_r$ , que é proporcional a  $N_e/\nu$ , pode ser expresso na forma (Wait and Spies, 1964):

$$\omega_r (h) = \omega_r (h_0) \exp [\beta (h - h_0)] - \omega_0^2/\nu , \quad (4.3)$$

onde:

$\omega_r (h_0)$  - é a condutividade na altura de referência  $h_0$ ;  
 $\beta$  - é o gradiente de condutividade;  
 $\omega_0$  - é a frequência (angular) de plasma dos elétrons;  
 $\nu$  - é a frequência de colisão efetiva dos elétrons com as partículas neutras.

A altura de referência  $h_0$  é considerada a região onde  $\omega_r = \omega_r (h_0) = 2,5 \times 10^5 \text{ seg}^{-1}$ .

Em condições perturbadas, os parâmetros  $\beta$  e  $h$  irão variar de quantidades  $\Delta\beta$  e  $\Delta h$ , os quais provocarão mudanças na fase e amplitude da onda recebida. Tais variações podem ser calculadas a partir das seguintes expressões (Burgess and Jones, 1967):

$$\Delta h = \left( \Delta A \frac{\partial \phi}{\partial \beta} - \Delta \phi \frac{\partial A}{\partial \beta} \right) \left( \frac{\partial A}{\partial h} \frac{\partial \phi}{\partial \beta} - \frac{\partial \phi}{\partial h} \frac{\partial A}{\partial \beta} \right)^{-1} \quad (4.4)$$

e

$$\Delta \beta = \left( \Delta A \frac{\partial \phi}{\partial h} - \Delta \phi \frac{\partial A}{\partial h} \right) \left( \frac{\partial A}{\partial \beta} \frac{\partial \phi}{\partial h} - \frac{\partial \phi}{\partial \beta} \frac{\partial A}{\partial h} \right)^{-1}, \quad (4.5)$$

onde:

$\Delta A$  - variação da amplitude média;

$\Delta \phi$  - variação da fase medida.

Através dos cálculos de razão de atenuação, velocidade de fase e fatores de excitação (Wait and Spies, 1964), são obtidos os valores  $\frac{\partial \phi}{\partial h}$ ,  $\frac{\partial \phi}{\partial \beta}$ ,  $\frac{\partial A}{\partial h}$  e  $\frac{\partial A}{\partial \beta}$  por interpolação.

Quando se considera a curvatura da Terra para o cálculo da variação da altura e da condutividade, torna-se necessário tomar o co-seno do ângulo de incidência (Wait, 1962):

$$C_n = \frac{(12n-5)\pi/6 - \frac{(2Ka)}{3} \left(\frac{2h}{a}\right)^{3/2} - i\alpha_0^* \left(\frac{2h}{a}\right)^{1/2}}{Ka \left(\frac{2h}{a}\right)^{1/2} + \frac{i\alpha_0^*}{2} \left(\frac{2h}{a}\right)^{-1/2}}, \quad (4.6)$$

onde:

$n$  = nº do modo de propagação;

$K = \frac{2\pi}{\lambda}$  é o número de onda;

$\lambda$  = comprimento de onda;

$a$  = raio da Terra;

$\alpha_0^*$  = coeficiente que aparece no coeficiente de reflexão ionosférico.

O coeficiente  $\alpha_0^*$  é complexo e pode ser expresso da seguinte forma:

$$\alpha_0^* = \alpha_1 + i \alpha_2. \quad (4.7)$$

Os valores  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  são reais e obtidos através do trabalho de Wait e Walters (1963).

O co-seno do ângulo de incidência  $C_n$  pode ser selecionado ao seno,  $S_n$ , da seguinte forma:

$$S_n = (1 - C_n^2)^{1/2}. \quad (4.8)$$

$S_n$  dependerá, de modo complexo, das propriedades elétricas dos limites e da espessura do guia de onda. Spies e Wait (1961) e Wait e Spies (1964) discutiram esta dependência para alguns modelos simplificados da baixa ionosfera.

A parte real de  $S_n$ ,  $\text{Re } S_n$ , está associada à velocidade de fase  $v_f$ , pela relação:

$$v_f = c / \text{Re } S_n, \quad (4.9)$$

sendo

$c$  = velocidade da luz no vácuo.

A parte imaginária de  $S_n$  está associada à atenuação da seguinte forma (Wait, 1962):

$$\text{Atenuação (dB)/1000km de trajetória} = - I_m S_n \frac{2\pi}{\lambda} 8,68 \times 10^6 \quad (4.10)$$

Com estes cálculos é possível determinar as variações da fase  $\Delta\phi$ , em radianos, aplicando (Watt, 1967):

$$\phi = \frac{2\pi fd}{v_f}, \quad (4.11)$$

sendo

d = distância percorrida;

f = frequência da onda.

Torna-se assim possível obter as derivadas necessárias para o cálculo de  $\Delta\phi$  e  $\Delta\beta$  (Equações 4.4 e 4.5 respectivamente) e calcular finalmente a altura de reflexão e o gradiente de condutividade da região D.

Para a escolha dos parâmetros de referência, foram testados diversos valores de altura ( $60 \text{ km} \leq h_0 \leq 90 \text{ km}$ ) e gradientes de condutividade ( $0,3 \leq \beta \leq 0,9$ ). Os valores diurnos foram considerados desde 60 km até 75 km com 10 intervalos de altura e os valores de  $\beta$  diurno, tomados entre  $0,25 \text{ km}^{-1}$  e  $0,4 \text{ km}^{-1}$  com intervalos de  $0,05 \text{ km}^{-1}$ . Foram consideradas todas as 40 combinações possíveis. Para os valores noturnos, a altura de referência variou de 78 km até 90 km com 8 intervalos e o gradiente de condutividade de  $0,4 \text{ km}^{-1}$  até  $0,9 \text{ km}^{-1}$  com intervalos de  $0,05 \text{ km}^{-1}$ , considerando todas as 96 possíveis combinações.

Através do cálculo das velocidades de fase diurnas ( $v_{fd}$ ) e noturnas ( $v_{fn}$ ), determinou-se a variação diurna da fase através da equação (Blackband, 1964):

$$\frac{\Delta\phi}{d} = \frac{[(v_{fd}/c) - 1] - [(v_{fn}/c) - 1]}{c}. \quad (4.12)$$

Calculou-se também a variação diurna da amplitude ( $\Delta A/d$ ) e, comparando-a com os resultados experimentais do período de 1976 a 1981, o modelo que mais se ajustou foi o que considera  $\beta$  diurno =  $0,3 \text{ km}^{-1}$ ,  $h_0$  diurno = 70 km,  $\beta$  noturno =  $0,5 \text{ km}^{-1}$  e  $h_0$  noturno = 80 km.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados para as frequências de 10,2 KHz e 13,6 KHz, onde o valor médio da variação diurna da fase e amplitude foi calculado considerando como período de inverno os meses de abril a agosto e verão de outubro a fevereiro. Os valores teóricos representam apenas o modelo selecionado.

TABELA 4.1

COMPARAÇÃO DOS VALORES TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS DA FASE E AMPLITUDE DOS SINAIS DE VLF EM 13,6 KHZ E 10,2 KHZ

FREQUÊNCIA	PERÍODO	VALORES EXPERIMENTAIS		VALORES TEÓRICOS*	
		TAXA $\Delta\phi/d$	TAXA $\Delta A/d$	TAXA $\Delta\phi/d$	$\Delta A/d$
KHz		$\mu s/Mm$	dB/Mm	$\mu s/Mm$	dB/Mm
10,2	Verão (out-fev)	10,7±0,5	2,11±0,3	10,0	1,83
10,2	Inverno (abr-ago)	8,6±0,5	1,58±0,3	10,0	1,83
10,2	Anual	9,7±0,5	1,85±0,3	10,0	1,83
13,6	Verão (out-fev)	8,2±0,4	2,45±0,4	7,3	1,13
13,6	Inverno (abr-ago)	6,4±0,4	1,79±0,4	7,3	1,13
13,6	Anual	7,2±0,4	1,9±0,4	7,3	1,13

\* Modelo utilizado  $\beta_d = 0,3 \text{ km}^{-1}$ ,  $h_d = 70 \text{ km}$ ,

$\beta_n = 0,5 \text{ km}^{-1}$ ,  $h_n = 80 \text{ km}$ .

A comparação dos valores da Tabela 4.1 com as curvas experimentais de Blackband (1964) e de Reder (1981) com as curvas teóricas obtidas a partir dos dados de Wait e Spies (1964) é apresentada na

Figura 4.1, Nota-se que a variação diurna da fase, é bem menor que o valor encontrado por Blackband (1964). Comparando-a com a curva de Reider (1981), os valores de verão e a média anual apresentaram um bom ajuste, mostrando discrepância apenas no período de inverno. Para uma análise mais precisa desta diferença no inverno, é necessário maior número de medidas que abranjam o período de mínima atividade solar, pois para o ano de 1985  $\Delta\phi/d$  (13,6 KHz) = 8,0  $\mu$ s e  $\Delta\phi/d$  (10,2 KHz)=10,5  $\mu$ s para os meses de junho e julho. Entretanto, não é objetivo deste trabalho o estudo do comportamento sazonal como também a variação de  $\Delta\phi/d$  com o ciclo solar.

Pelo modelo teórico adotado, a variação diurna da altura,  $\Delta h$ , é da ordem de 16 km para a frequência de 13,6 KHz e de 12 km para a 10,2 KHz. Apenas a frequência 13,6 KHz, parece concordar com o valor teórico de 16 km, estimado por alguns autores (Blackband, 1964):

O limite inferior do guia de onda noturno para esta frequência foi calculado aproximadamente em 83 km de altura e para 10,2 KHz, em 80 km. Durante o dia estas alturas (calculadas) foram de 67 km, apresentando uma boa concordância com os dados obtidos pela ionossonda de LF/VLF, localizada em Blumenau.

Cardoso (1982) analisou também estas duas frequências (nesta mesma trajetória) para o período de 1976 a 1977, o qual determinou a altura do guia de onda através de dois processos: a) pela equação desenvolvida por Wait (1962), onde apenas a variação de fase é considerada, e b) através de interpolação gráfica, onde a taxa de observação em função da altura efetiva do guia de onda foi parametrizada em  $\beta$  e  $\Omega$ .

As alturas determinadas através do primeiro processo foram:  $\Delta h(10,2 \text{ KHz}) = 13,4 \pm 1 \text{ km}$  (valor anual),  $\Delta h(10,2 \text{ KHz}) = 14,3 \pm 1 \text{ km}$  (valor trimestral) e  $\Delta h(13,6 \text{ KHz}) = 15,2 \pm 0,5 \text{ km}$  (valor trimestral). Pela interpolação gráfica, as alturas obtidas foram bem menores:

$\Delta h(10,2 \text{ KHz}) = 6,8 \pm 1,2 \text{ km}$  (valor anual);  $\Delta h(10,2 \text{ KHz}) = 7,5 \pm 1,5 \text{ km}$  (valor trimestral) e  $\Delta h(13,6 \text{ KHz}) = 14,0 \pm 1,5 \text{ km}$  (valor trimestral). Observa-se que os valores encontrados por Cardoso (1982) são menores que os calculados neste trabalho. Porém todos os modelos utilizados apresentam concordância no fato de a frequência de 13,6 KHz se propagar numa região mais alta durante a noite, apresentando parametrização distinta.

Entretanto, estes modelos apresentam limitações, decorrentes das simplificações consideradas no guia de onda. Para determinação mais precisa dos parâmetros ionosféricos será utilizado, futuramente, o método "wave-hop" (Berry, 1964; Piggott et alii, 1965; Bain and Harrison, 1972; Bain, 1985).

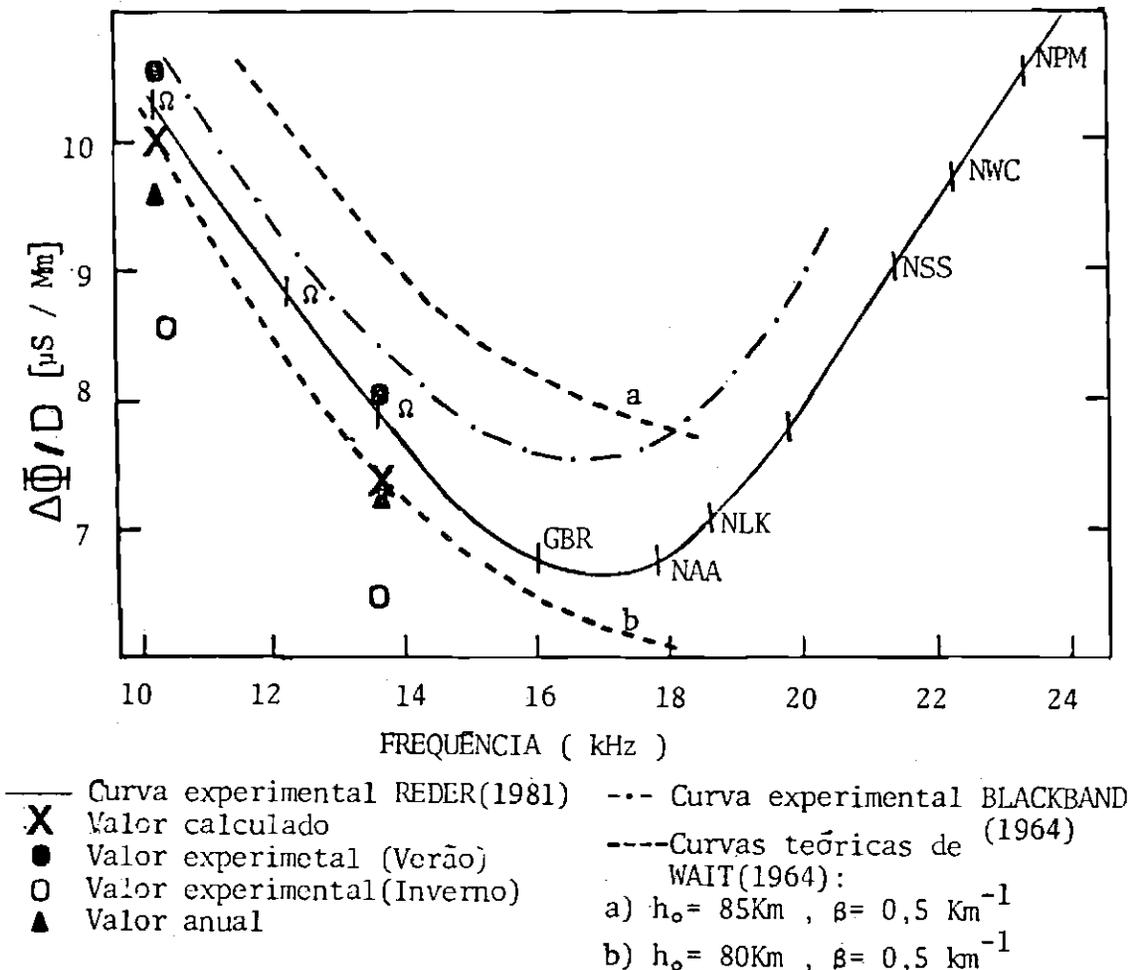


Fig. 4.1 - Variação diurna da fase de VLF por unidade de distância percorrida.

#### 4.2 - ESTIMATIVA DO FLUXO DE ELÉTRONS E DA DENSIDADE ELETRÔNICA NA REGIÃO D NOTURNA:

O comportamento da densidade eletrônica na região da Anomalia Brasileira ainda não é bem conhecido. Alguns trabalhos analisaram o perfil da densidade nesta região em épocas distintas: Batista (1975) com a finalidade de observar os efeitos causados por elétrons precipitados durante períodos magneticamente calmos (1973-1974) na região E (~ 100 km), calculou a densidade eletrônica entre 60 e 200 km de altura. Paula et alii (1982) determinaram o perfil eletrônico  $N(h)$  para o período de 1978, através de dados de ionossonda vertical, localizada em Cachoeira Paulista (22°S; 45°W). Calcularam também a concentração de elétrons para a região entre 75 e 375 km de altura, porém o modelo aplicado (International Reference Ionosphere - IRI 79) apresenta limites inferiores para a determinação dos perfis: 80 km à noite e 65 km durante o dia, devido aos poucos dados experimentais em regiões mais baixas. Moura and Abrahão (1985), utilizando dados de ionossonda oblíqua de VLF/LF, localizada em Gaspar, Santa Catarina, fizeram os primeiros estudos para a região D noturna, do centro da anomalia, no período de 1980 e 1981. Pintado e Radicella (1984), através de dados de propagação de sinais de VLF, determinaram a densidade eletrônica diurna da baixa ionosfera na trajetória Ômega - Argentina (43°S; 65°W). Tucumã, Argentina (26°S; 66°W) para o período de 1980 a 1981.

É de interesse deste trabalho estimar a densidade eletrônica da região D noturna, para o período de 1976 a 1981, que engloba época de sol ativo e calmo.

O cálculo da ionização por elétrons precipitados é feito estimando a taxa de produção de pares de íons por unidade de volume para um fluxo unitário de elétrons incidentes.

Foi utilizado o método desenvolvido por Rees (1963, 1964), onde se considera uma distribuição isotrópica entre 0° e 80° do feixe de elétrons incidentes.

A taxa de ionização por unidade de volume,  $q_z$ , por fluxo unitário de elétrons incidentes,  $J$  é dada por (Rees, 1963):

$$\frac{q_z}{J} = \frac{\epsilon_0/r_0}{\Delta E_{ion}} \lambda' \left(\frac{z}{R}\right) \frac{n(M)_z}{n(M)_R}, \quad (4.13)$$

onde

$\epsilon_0$  é a energia inicial do elétron;

$\Delta E_{ion}$  é a perda média de energia por par de íon formado;

$n(M)_z$  é a densidade numérica de átomos ou moléculas ionizáveis na profundidade atmosférica  $z$ ;

$n(M)_R$  é a densidade numérica de átomos ou moléculas ionizáveis na profundidade atmosférica  $R$ ;

$z/R$  é a profundidade de penetração atmosférica normalizada;

$r_0 = \frac{R}{\rho}$  é o "range" (em atm.cm) no "topo da atmosfera", onde  $\rho$  é a densidade de massa ( $g/cm^3$ ) na altura de penetração mais baixa;

$\lambda' \left(\frac{z}{R}\right)$  é a função de distribuição normalizada de dissipação de energia.

A profundidade atmosférica é obtida dividindo-se a pressão pela aceleração da gravidade tendo como unidade  $g/cm^2$ .

A profundidade atmosférica  $R$  está relacionada com a energia inicial,  $\epsilon_0$ , no intervalo de energia entre 1 KeV e 300 KeV pela lei de potência (Rees, 1963):

$$R = 4,57 \times 10^{-6} \epsilon_0^{1,75} \quad (4.14)$$

onde  $\epsilon_0$  é expresso em KeV e  $R$  em  $g/cm^2$ .

Para elétrons com energia acima de 500 eV,  $\Delta E_{ion} = 35$  eV (Banks and Kockarts, 1973),

Adotando-se um modelo atmosférico (COSPAR, 1965; Berger e Seltzer, 1972), obtêm-se finalmente a taxa de produção de íons por unidade de volume, por fluxo unitário de elétrons incidentes para diferentes valores da energia inicial  $\epsilon_0$  dos elétrons, como mostra a Figura 4.2.

A análise de modelos atmosféricos mais recentes (COSPAR, 1972) não apresentou nenhuma alteração significativa nos resultados.

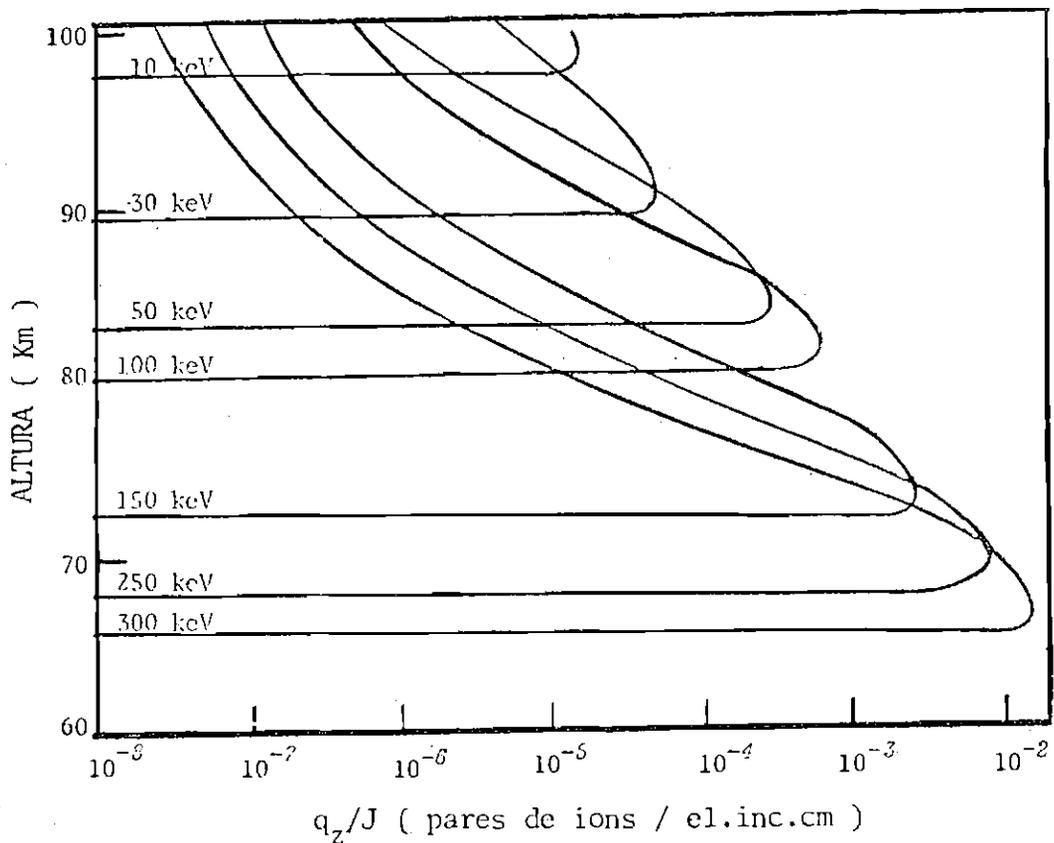


Fig. 4.2 - Taxa de produção de íons para um fluxo unitário de elétrons com diferentes valores de energia inicial.

A Tabela 4.2, contém a altura de ionização máxima para elétrons de diferentes energias, precipitados na atmosfera.

TABELA 4.2

LIMITE DE PENETRAÇÃO PARA ELÉTRONS NO AR

ENERGIA (KeV)	LÍMITE DE PENETRAÇÃO (km)
10	100
20	93
30	89
40	85
50	83
100	80
150	74
200	71
250	68
300	66

FONTE: Evans (1955), p. 712.

Não se têm medidas do fluxo de elétrons responsável pela ionização da região D da ionosfera. Vários autores têm sugerido que elétrons com energia  $\geq 40$  KeV são os responsáveis pelo aumento da ionização nesta região (Lauter and Knuth, 1967; Belrose and Thomas, 1968; Potemra and Zmuda, 1970; Potemra and Rosenberg, 1973). Fez-se uma ex

interpolação das medidas dos fluxos de elétrons nesta região (Imhof and Smith, 1966; Paulikas, 1966; Imhof, 1968; Gledhill and Hoffmann, 1981; Vampola and Gorney, 1983) considerando que o fluxo apresenta uma variação exponencial da forma;

$$J (> E) = J_0 \exp [- E/E_0] , \quad (4.15)$$

onde

$J_0$  é o fluxo total em  $\text{el/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr} \cdot \text{KeV}$ ;

$E_0$  é a energia característica;

$J$  é o fluxo de elétrons com energia  $E$ .

Com base nos trabalhos de Vampola e Gorney (1983) e Gledhill e Hoffmann (1981), considerou-se o fluxo de elétrons precipitados na anomalia em período de sol calmo como:

$$J (E) = 2,3 \times 10^4 E^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \text{ KeV} \quad (4.15a)$$

para elétrons com energia entre 0,2 - 26 KeV (Gledhill and Hoffmann, 1981) e

$$J (E) = 1,34 \times 10^5 E^{-2,27} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \text{ KeV} \quad (4.15b)$$

para energias maiores que 35 KeV (Vampola and Gorney, 1983).

Considerou-se que durante o período de alta atividade magnética o fluxo aumentou em uma ordem de grandeza.

Calcula-se o fluxo de elétrons para vários valores de  $E_0$ , considerando que o fluxo total  $J_0$  não deve variar.

Através das equações acima e da taxa de produção total de íons por unidade de volume para um fluxo unitário de elétrons incidentes

tes (Figura 4.2) obtêm-se a produção total de pares de íons por unidade de volume.

A Figura 4.3 mostra a taxa de ionização noturna (pares de íons para um dado fluxo de elétrons) em função da altitude, para diferentes energias no período de mínima e de máxima atividade solar. Apresenta também a curva de ionização, devido a raios cósmicos que representam várias latitudes e às duas épocas de atividade solar (Vampola and Gorney, 1983), e a ionização do óxido nítrico pelo H Lyman  $\alpha$  solar espalhado (Meira Filho, 1971; Strobel, 1972).

A ionização por raios cósmicos certamente domina, em latitudes médias, a precipitação de elétrons abaixo de 65 km de altura. Entre 70 e 80 km, a fonte mais importante de ionização são os elétrons precipitados, os quais competem com o H Lyman  $\alpha$  direto (Vampola and Gorney, 1983). Na região D noturna, a precipitação de elétrons domina em todas as latitudes, o que evidencia ser a fonte mais importante de ionização (Vampola and Gorney, 1983).

Com os resultados obtidos da variação de altura, da velocidade de fase e do fluxo unitário de elétrons, foi possível calcular a variação da fase para a trajetória  $\Omega$ -Argentina/Atibaia em função do fluxo de elétrons  $J (> 40 \text{ KeV})$  para diferentes energias características (Figura 4.4), conforme sugerido por Potemra and Rosenberg (1973). A Figura 4.4 mostra o avanço de fase (em  $\mu\text{s}$ ) para as frequências de 10,2 KHz e 13,6 KHz em relação aos valores noturnos não perturbados e em função do fluxo de elétrons para os valores de  $E_0$  mostrados na Figura 4.3. A linha tracejada indica o maior desvio de fase observado no período ( $\Delta\phi = 12,5 \mu\text{s}$  para a tempestade de setembro de 1978, Figura 3.4).

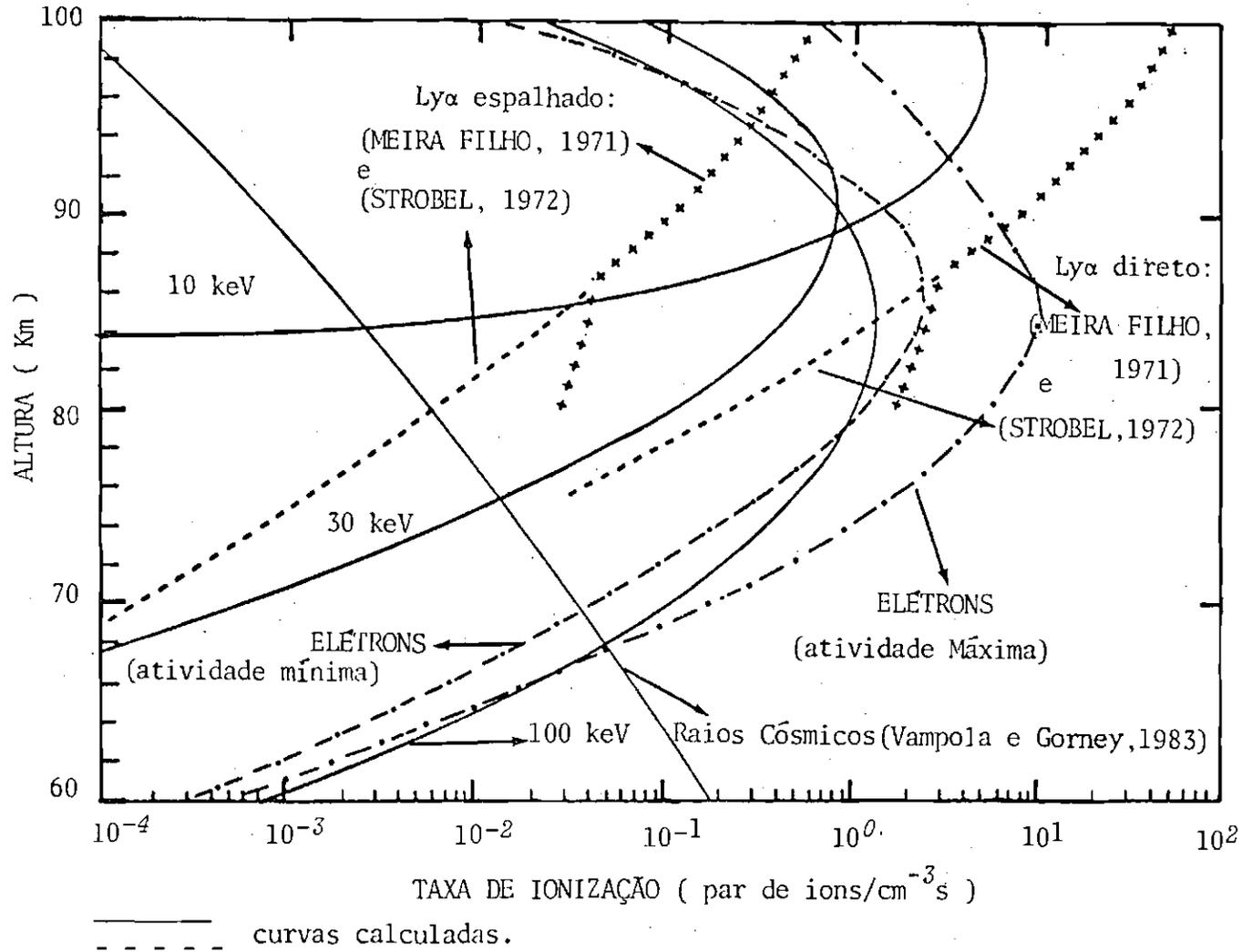


Fig. 4.3 - Taxa de ionização noturna em função da altitude para diferentes fontes ionizantes (pares de ions/cm<sup>3</sup>s).

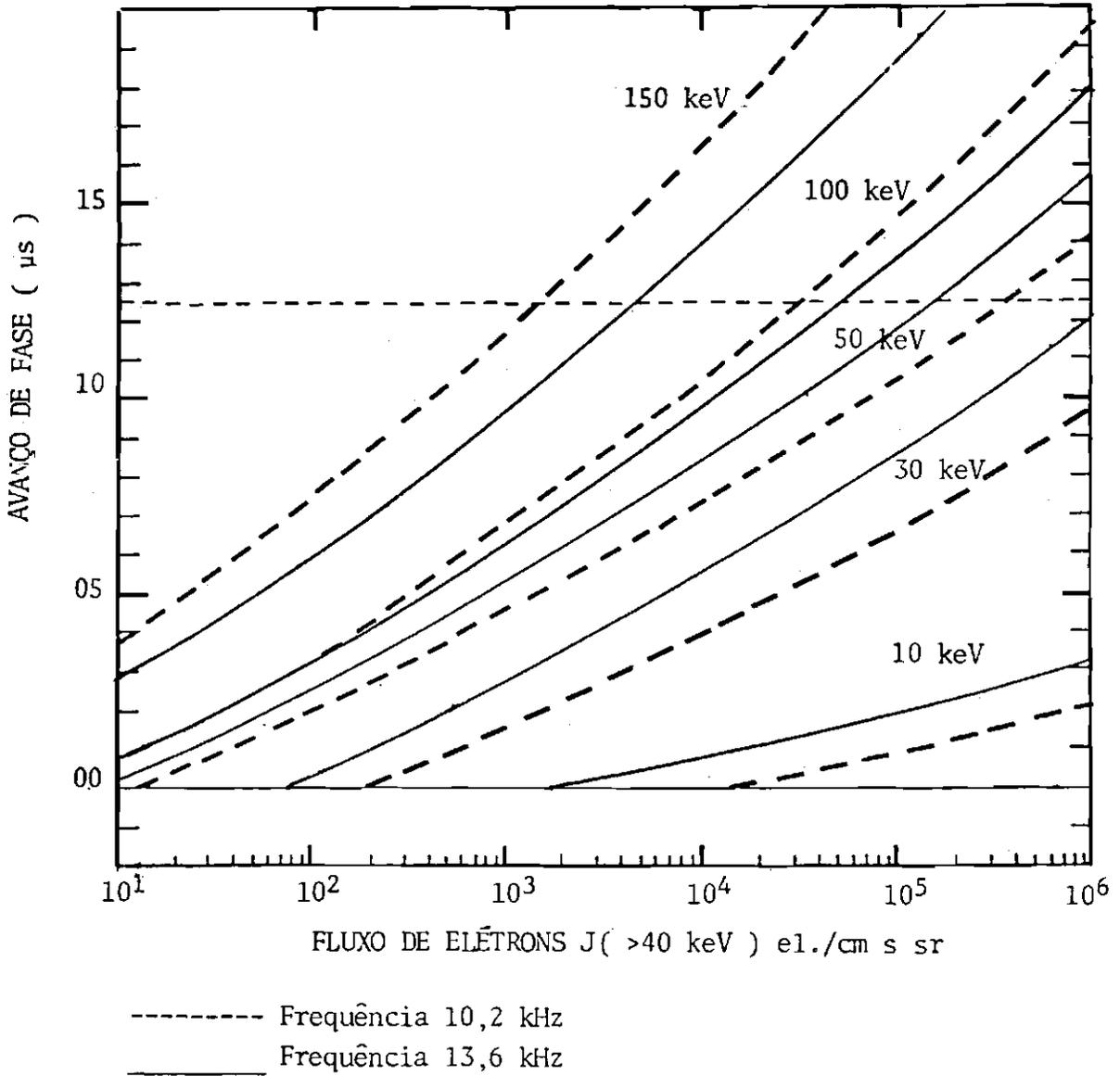


Fig. 4.4 - Variação de fase computada para a trajetória  $\Omega$ -ARGENTINA/ATI BAIA nas frequências de 10,2 KHz e 13,6 KHz em função do fluxo de elétrons  $J( > 40 \text{ KeV} )$  para diferentes valores de energia inicial.

Observa-se que elétrons com  $E_0 \leq 10$  KeV produzem um pequeno desvio de fase ( $\Delta\phi \approx 3,5 \mu s$ ) o que provoca um efeito maior em 13,6 KHz. Como já citado no Capítulo 3, pág 55, a presença de elétrons nesta faixa de energia pode aumentar o gradiente de altura da densidade eletrônica, sem abaixar significativamente a altura de reflexão de sinais de VLF. Este efeito pode provocar um atraso de fase, que já foi observado durante algumas explosões solares em propagações diurnas de VLF (Crombie, 1964; Oshio et alii, 1970) e durante anomalias noturnas associadas a tempestades magnéticas, observadas por Potemra e Rosenberg (1973).

Para espectro mais duro ( $E_0 > 10$  KeV), o avanço de fase é proporcional ao logaritmo da integral do fluxo de elétrons  $J$  ( $> 40$  KeV).

Nota-se que não é necessário um fluxo grande para produzir distúrbios na fase durante a noite. Entretanto, é muito difícil estimar o fluxo de elétrons unicamente através das variações na fase do sinal de VLF. Muitos trabalhos têm sugerido que elétrons com  $E \geq 200$  KeV são a fonte de perturbações na fase de VLF durante o dia e que  $E \geq 40$  KeV ou  $E \geq 60$  KeV são a causa das anomalias noturnas (Svensson, 1973; Potemra and Rosenberg, 1973; Westerlung and Reder, 1973). Estas conclusões foram obtidas considerando que a altura de reflexão de VLF está entre 80 e 90 km à noite e 70 km durante o dia. Kikuchi (1981) estimou que elétrons com  $E \geq 190$  KeV são os responsáveis por um típico desvio de fase,  $\Delta\phi \sim 10 \mu s$ , para a  $\Omega$ -aldrá, na trajetória Aldra, Noruega ( $66^\circ N$ ;  $13^\circ E$ ) Inubo, Japão ( $35^\circ N$  -  $140^\circ E$ ), considerando uma altura de reflexão em 80 km. Entretanto, Kikuchi and Evans (1983), correlacionando medidas de elétrons precipitados e anomalias de fase para esta mesma trajetória, observaram que elétrons com  $E \geq 300$  KeV são a fonte mais importante, tanto a noite como durante o dia.

Para a determinação da densidade eletrônica, deve-se levar em conta a produção de íons obtida e a perda por recombinação:

$$N_e = (q/\alpha_{ef})^{1/2}, \quad (4.16)$$

onde

$\alpha_{ef}$  é o coeficiente efetivo de recombinação ( $\text{cm}^3/\text{seg}$ );  
 $q$  é a taxa de ionização.

Os valores de  $\alpha_{ef}$  para a região entre 80 e 90 km foram os calculados por Reid (1970) para períodos calmos e em latitude média. Acima de 90 km,  $\alpha_{ef}$  não varia muito.

Foi utilizado o valor de  $2 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{s}$  que está de acordo com os valores obtidos por Potemra et alii (1970) Mitra (1968; 1975) e Belrose et alii (1972).

Com estes valores, para o coeficiente de recombinação e usando várias taxas de produção de elétrons, foram calculados perfis de densidade eletrônica devido à ionização produzida por elétrons monoenergéticos entre 1 KeV e 300 KeV, considerando vários fluxos da forma dada pela Equação 4.15 e apresentados na Figura 4.5.

Pode-se, portanto, estimar a densidade eletrônica da baixa ionosfera durante período calmo e período ativo. É preciso lembrar que para alturas menores de 65 km a resolução não é boa.

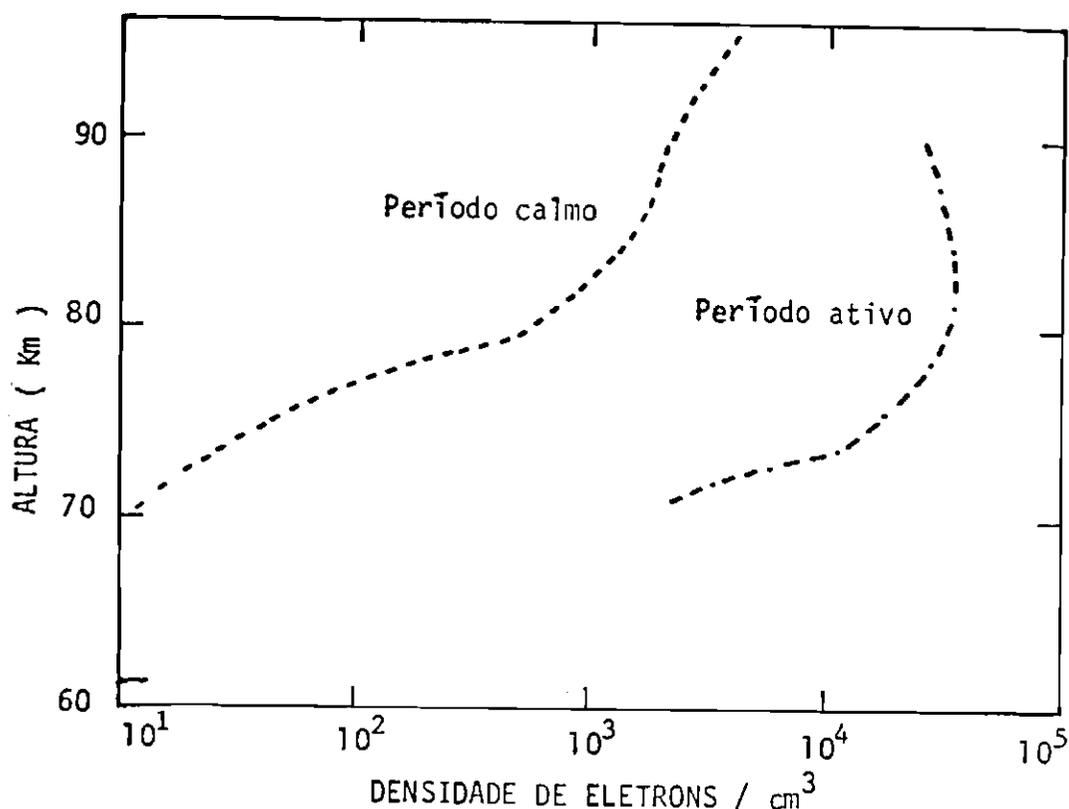


Fig. 4.5 - Perfil de densidade eletrônica para os períodos de alta e baixa atividades magnéticas.

#### 4.2.1 - CÁLCULO DA DENSIDADE ELETRÔNICA PARA DADOS OBTIDOS COM IONOS Sonda OBLÍQUA DE VLF/LF

O cálculo da densidade eletrônica através dos dados da ionossonda oblíqua de VLF/LF foi feito considerando que o gradiente de condutividade  $\beta$  varia exponencialmente com a altura. Este modelo denominado  $\beta$ -H, de acordo com Wait e Spies (1964), é representado pela expressão:

$$N_e = 1,43 \times 10^7 \exp [\beta - 0,15) h - \beta_{ho}] . \quad (4.17)$$

A frequência de colisão efetiva varia exponencialmente com a altura de acordo com:

$$\gamma = 1,82 \times 10^{11} \exp(-0,15 h) , \quad (4.18)$$

Este método, para o cálculo da densidade eletrônica através de aproximações sucessivas, é realizado usando os cálculos de "full-wave" e a técnica computacional iterativa (Sechrist, 1974; Kossey et alii, 1983 e Moura and Abrahão, 1985). Os valores teóricos obtidos das médias e da variação diurna do coeficiente de reflexão e da altura foram comparados com os dados experimentais.

Existem, entretanto, duas restrições na aplicação do modelo: a) os parâmetros deduzidos não são únicos e b) existe baixa resolução em altura (Sechrist, 1974).

Os valores obtidos representam o perfil de densidade eletrônica para as tempestades magnéticas de abril e maio de 1981 (Figuras 4.6 e 4.7)

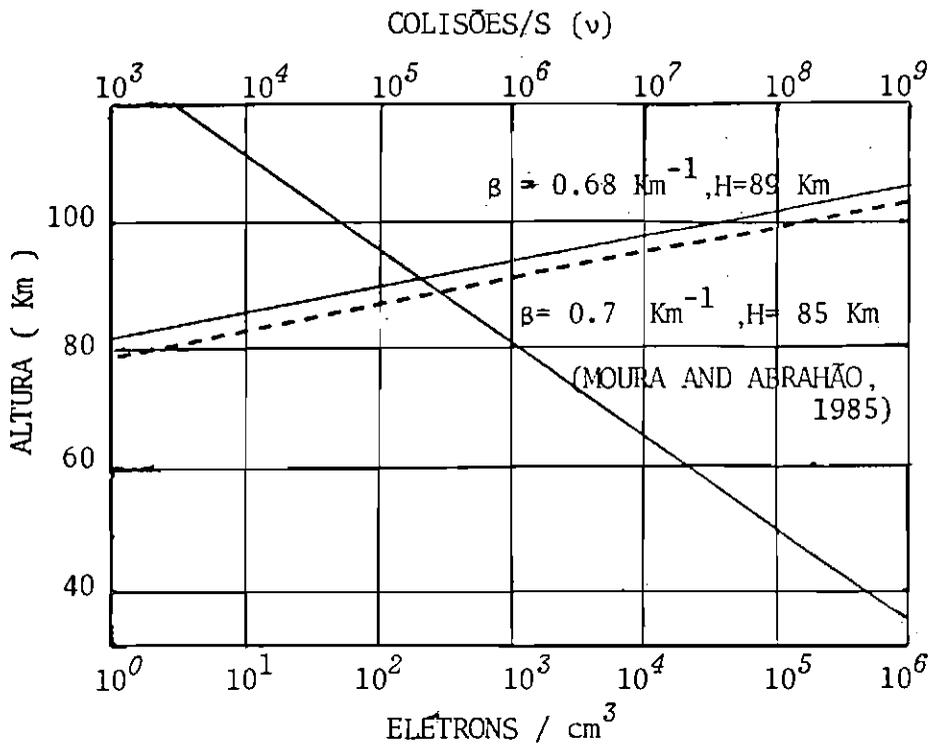


Fig. 4.6 - Perfil de densidade eletrônica utilizando dados de ionossonda oblíqua de VLF/LF para a tempestade magnética de abril de 1981.

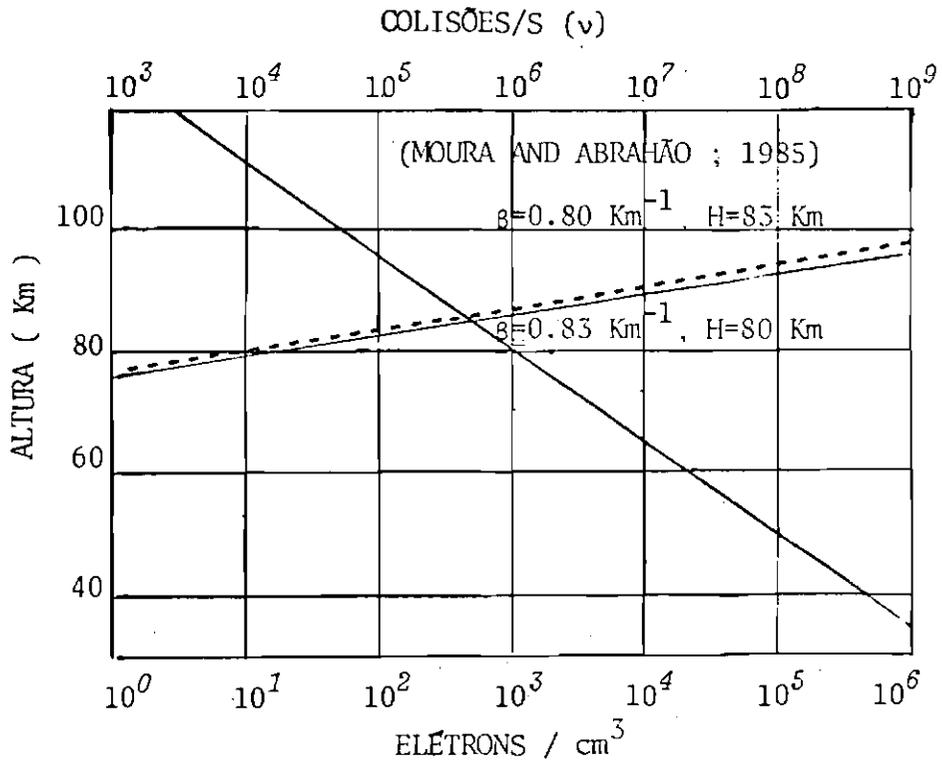


Fig. 4.7 - Perfil de densidade eletrônica utilizando dados de ionossonda oblíqua de VLF/LF para a tempestade magnética de maio de 1981.

Comparam-se estes resultados com os perfis mensais do mesmo período obtidos por Moura and Abrahão (1985), Figuras 4.6 e 4.7.

O perfil eletrônico para a tempestade de abril de 1981 indica menor densidade eletrônica em relação ao valor mensal. Moura, por sua vez, salientou o fato de o período de abril apresentar uma menor densidade em relação àquela dos meses de maio e julho. Foi calculada a variação sazonal da altura de reflexão e encontrou-se que  $h_0$  (outono e inverno) é menor que  $h_0$  (primavera e verão). Encontrou-se uma altura de aproximadamente 88 - 89 km de agosto a março e 86 a 87 km para maio, junho e julho.

O perfil eletrônico para o período da tempestade de maio de 1981 indica um aumento da concentração de elétrons em relação à média.

As densidades eletrônicas apresentadas nas Figuras 4.6 e 4.7 apresentam boa aproximação apenas até 90 km de altura. Acima deste limite o modelo ( $\beta$ -H) adotado para os cálculos não é adequado (valores de densidade eletrônica muito altos) sugerindo outro tipo de variação do gradiente de condutividade ( $\beta$ ) e da frequência de colisão efetiva ( $\gamma$ ) com a altura (H).

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

O estudo da propagação de sinais de VLF durante 40 tempestades magnéticas ocorridas entre 1976 e 1981 revelou as seguintes características:

- 1) Para a trajetória considerada ( $1,15 \leq L \leq 1,5$ ), a variação da fase de VLF mostrou ser bastante semelhante às observações em LF e VLF feitas em latitudes médias ( $2 \leq L \leq 4$ ):
  - a) O início súbito (sc) da perturbação do campo magnético apresentou em algumas ocasiões boa correlação com as variações no sinal, por exemplo o atraso de fase de algumas tempestades.
  - b) O avanço de fase, que indica aumento da ionização e consequentemente o abaixamento da altura do guia de onda Terra-Ionosfera, foi observado ocorrer entre 8 e 45 horas após o início do sc, com uma duração de um a vários dias.
  - c) Em 40% das tempestades analisadas verificou-se, em algumas horas antes do sc/entre 30 minutos a 29 horas, um atraso de fase que indica uma diminuição da densidade eletrônica.
  - d) Não foi encontrada nenhuma relação entre a ocorrência de PCA e a anomalia de fase, o que sugere que a ionização da baixa ionosfera nesta região não é devida à penetração direta de partículas energéticas e sim a elétrons precipitados dos cinturões de radiação.
  - e) A variação da fase parece estar mais associada ao período em que ocorreu a tempestade do que à sua intensidade. Por exemplo, em período calmo, uma pequena perturbação do campo pode provocar grandes variações na fase do sinal de VLF. Tempestades de mesma intensidade parecem provocar um desvio de fase maior durante o verão. Entretanto, é neces

sário um estudo mais criterioso, pois outras fontes ionizantes podem estar associadas ao período (por exemplo, chuvas de meteoros).

- 2) Variação da altura ( $\Delta h$ ) e do gradiente de condutividade ( $\Delta \beta$ ) foi determinada utilizando o modelo de Wait (1962) com as seguintes condições de contorno do guia de onda: para o período noturno,  $\beta_n = 0,5 \text{ km}^{-1}$  e  $h_n = 80 \text{ km}$  e para o diurno  $\beta_d = 0,3 \text{ km}^{-1}$  e  $h_d = 70 \text{ km}$ . A altura do guia de onda na trajetória considerada,  $\Omega$ -Argentina/Atibaia, foi determinada variando entre 80 km (para a frequência de 10,2 KHz) e 83 km (frequência de 13,6 KHz) durante a noite e 67 km durante o dia (para as duas frequências). O gradiente de condutividade  $\beta$  foi calculado entre  $0,3 \text{ km}^{-1}$  (valor diurno) e  $0,6 \text{ km}^{-1}$  (valor noturno). Estes resultados apresentam boa concordância com os valores encontrados por Pintado e Radicella (1984) e Moura e Abrahão (1985).
- 3) Encontrou-se durante o período perturbado abaixamento da altura do guia de onda até 6,5 km. O fluxo de elétrons necessários para explicar tais variações é de aproximadamente  $10^3 \text{ el/cm}^2$  com energia  $E_0 \geq 150 \text{ KeV}$ .
- 4) A comparação entre as frequências de 10,2 KHz e 13,6 KHz mostrou que estas se propagam em regiões distintas, apresentando características bem diferentes. A frequência de 13,6 KHz apresentou em média avanço de fase maior, enquanto a de 10,2 KHz apresentou maior atraso de fase em relação à média dos dias calmos.
- 5) As diferenças encontradas entre o comportamento dos sinais de VLF que se propagam à longa distância e os da ionossonda oblíqua de VLF/LF, durante as tempestades de abril e maio de 1981, sugerem que a ionização maior ocorreu em regiões mais baixas e que a precipitação de elétrons não é um fenômeno associado apenas ao centro da anomalia.

- 6) Em suma, a região D da ionosfera, associada à Anomalia Geomagnética Brasileira, mostrou ser ionizada por elétrons precipitados dos cinturões de radiação com energia que varia entre 10 e 200 KeV e a densidade eletrônica que varia de  $10^3$  a  $10^4$  elétrons/cm<sup>3</sup> durante períodos de maior atividade.
  
- 7) A análise dos dados de refletividade da ionossonda (VLF/LF) mostraram correlação com as anomalias observadas em sinais de VLF se propagando à longa distância o que sugere que para o período analisado a perturbação na ionosfera ocorreu na região próxima ao centro da anomalia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDU, M.A. Batista, I.S. Sporadic E-layer phenomena in the Brazilian geomagnetic anomaly: evidence for a regular particle ionization source. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 39(6):723-731, Jun., 1977.
- ABDU, M.A.; BATISTA, I.S.; PIAZZA, L.R.; MASSAMBANI, O. Magnetic storm associated enhanced particle precipitation in the South Atlantic Anomaly: evidence from VLF measurements. *Journal of Geophysical Research*, 86(A9):7533-7542, Aug., 1981.
- ABDU, M.A.; ANHANTHAKRISHNAN, S.; COUTINHO, E.F.; KRISHNAN, B.A.; REIS, E.M. Azimuthal drift and precipitation of electrons into the South Atlantic Geomagnetic Anomaly during an sc magnetic storm. *Journal of Geophysical Research*, 78(25):5830-5835, Sep., 1973.
- ANHANTHAKRISHNAN, S.; HACKRADT, B. Forbush decreases in the flux of galactic cosmic rays and associated VLF nighttime propagation phenomena. *Planetary and Space Science*, 20(1):81-87, Jan., 1972.
- ANDERSON, C.N. Correction of long wave transatlantic radio transmission with others factors affected by solar activity. *Proceedings of Institute Electric Engineering*, 16(1):297-347, Jan., 1928.
- BAIN, W.C. Wave-hop method of calculating propagation at LF and VLF and stationary phase. *Proceedings of Institute Electric Engineering*, 132(2):138-140, Apr., 1985.
- BAIN, W.C.; HARRISON, M.D. Model ionosphere for D region at summer noon during sunspot maximum. *Proceedings of Institute Electric Engineering*, 119(6):790-796, Nov., 1972.
- BANKS, P.M.; KOCKARTS, G.L. *Aeronomy*. New York, N.Y., Academic Press, 1973.
- BATISTA, I.S. *Precipitação de partículas e efeitos ionosféricos associados na região da Anomalia Geomagnética Brasileira*. Dissertação de Mestrado na área de Ciência Espacial e da Atmosfera, São José dos Campos, INPE, Dezembro 1975, 86 p. (INPE-800-TPT/020).

- BATISTA, I.S.; ABDU, M.A. Magnetic storm associated delayed sporadic E enhancements in the Brazilian geomagnetic anomaly. *Journal of Geophysical Research*, 82(9):4777-4783, Oct., 1977.
- BELROSE, J.S. *Propagation of radio waves at frequencies below 300 kc/s.* London, Pergamon, 1964, 149-165, (AGARD graph 74).
- BELROSE, J.S.; ROSS, D.B.; McNAMARA, A.G. Ionization changes in the lower ionosphere during the solar eclipse of 7 march 1970. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 34(4):627-640, Apr., 1972.
- BELROSE, J.S.; THOMAS, L. Ionization changes in the middle latitude D-region associated with geomagnetic storm. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 30(7):1397-1413, July, 1968.
- BENBROOK, J.R.; BRING, E.A.; LEVERENZ, H.; ROEDER, J.L.; SHELDON, W.R. Quiet-time electron precipitation at L = 4 in the South Atlantic Anomaly. *Journal of Geophysical Research*, 88(A1):189-199, Jan., 1983.
- BERRY, L.A. Wave hop theory of long-distance propagation of low-frequency radio waves. *Radio Science Journal Research, NBS*, 68D(12):1275-1284, Dec., 1964.
- BERGER, M.J.; SELTZER, S.M. Bremsstrahlung in the atmosphere. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 34(1):85-108, Jan., 1972.
- \_\_\_\_\_. *Tables of energy losses and ranges of electrons and positrons.* Washington, D.C., NASA, 1964 (NASA-SP-3012).
- BERGER, M.J.; SELTZER, S.M.; MAEDA, K. Energy deposition by auroral electrons in the atmosphere. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 32(6):1015-1045, June, 1970.
- \_\_\_\_\_. Some new results on electron transport in the atmosphere. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 36(4):591-617, Apr., 1974.

- BLACKBAND, T.W. *Propagation of radiowaves below 300 kc/s.* London, Pergamon, 1964, 345-450. (AGARD graph 74).
- BOYD, T.J.M.; SANDERSON, J.J. *Plasma dynamics.* New York, N.Y., Barnes e Nobles, 1969.
- BRACEWELL, R.N.; BUDDEN, K.G.; RATCLIFFE, J.A.; STRAKER, T.W.; WEEKES, K. *Proceedings Institute Electric Engeneering*, 98(3):221-235, May, 1951. *Apud* Belrose and Thomas (1968).
- BUDDEN, K.G. *Radio waves in the ionosphere.* London, Cambridge University Press, 1961.
- BURGESS, B.; JONES, T.B. Solar flare effects and VLF radio wave observations of the lower ionosphere. *Radio Science*, 2(6):619-625, June, 1967.
- CARDOSO, A.H. Análise de alguns parâmetros ionosféricos na Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul mediante ondas "VLF". *Revista Brasileira de Física*, 12(2):229-246, Feb., 1982.
- CHILTON, C.J. VLF phase perturbations associated with meteor shower ionization. *Journal of Geophysics Research*, 66(2):379-383, Feb., 1961.
- CLADIS, J.B. Acceleration of geomagnetically trapped electrons by variations of ionospheric currents. *Journal of Geophysical Research*, 71(21):5019-5025, Nov., 1966.
- COOK, A.F. *Evolutionary and physical properties of meteoroids.* Washington, D.C., 1973. p. 183. (NASA-SP-319).
- COUTINHO, E.F. Introdução às partículas presas e à Anomalia Geomagnética Brasileira. *Ciência e Cultura*, 26(4):329-339, Apr., 1973.
- COSPAR. Mean atmospheric structure in the region from 30 to 300 Km. In: \_\_\_\_\_. *International reference atmosphere.* Amsterdam, 1965. Part 1, p. 3-26.
- CRAVEN, J.D. Temporal variation of electron intensities at low altitudes in the outer radiation zone as observed with satellite Injun 3. *Journal of Geophysical Research*, 71(23):5643-5663, Dec., 1966.

- CROMBIE, D.D. Periodic fading of VLF signals received over long paths during sunrise and sunset. *Radio Science Journal of Research NBS*, 68D(1):27-34, Jan., 1964.
- DA COSTA, J.M. *Particle precipitation and atmospheric x and gamma rays in the South Atlantic Magnetic Anomaly by Balloon Experiment*. São José dos Campos, INPE, Jun., 1981. (INPE-2119-RPE/343).
- DAVIES, K. *Ionospheric radio propagation*, New York, N.Y., U.S. Government Printing Office, 1965.
- DESSLER, A.J. Effects of magnetic anomaly on particle radiation trapped in geomagnetic field. *Journal of Geophysical Research*, 7(2):713-715, Feb., 1959.
- ESPENSHIED, L.; ANDERSON, C.N.; BAILEY, A. Trans-Atlantic radio telephone transmission. *Proceedings Institute Radio Engineering*, 14(1):7-10, Jan., 1926.
- EVANS, R.D. *The atomic nucleus*. New York, N.Y., McGraw-Hill, 1955.
- FILZ, R.C.; HOLEMAN, E. Time and altitude dependence 55 MeV trapped protons, August 1961 to June 1964. *Journal of Geophysical Research*, 70(35):5807-5822, Dec., 1965.
- FREDEN, S.C.; PAULIKAS, G.A. Trapped protons at low altitudes in the South Atlantic Magnetic Anomaly. *Journal of Geophysical Research*, 69(7):1259-1269, Apr., 1964.
- GLEDHILL, J.A. Aeronomy effects of the South Atlantic Anomaly. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 14(2):173-187, May, 1976.
- GLEDHILL, J.A.; HOFFMAN, R.A. Nighttime observations of 0.2- to 26 KeV electrons in the South Atlantic Anomaly made by atmosphere Explorer C. *Journal of Geophysical Research*, 86(A8):6739-6744, Aug., 1981.
- GOLD, T. Motions in the Magnetosphere of the Earth. *Journal of Geophysics Research*, 64(9):1219-1225, Sept., 1959.

- GOUGH, M.P. Particle precipitation in the South Atlantic Anomaly deduced from VLF propagation path measurements. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 37(10):1379-1383, Oct., 1975.
- GOUGH, M.P.; COLLIN, H.L. Energetic electron precipitation as a source of ionization in the nighttime D-region over the mid-latitude rocket range, South Uist. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 35(5):835-850, May, 1973.
- HAFSTAD, L.R.; TUVE, Y.M.A. Note of Kennelly-Heaviside layer observations during a magnetic storm. *Terrestrial and Magnetospheric Atmosphere*, 34(1):39-43, Jan., 1929.
- HESS, W.N. *The radiation belt and magnetosphere*. Waltham, MA., Blaisdel, 1968.
- HUGHES, P.W. *Cosmic dust*. New York, N.Y., John Wiley, 1978. p. 166.
- INTERNACIONAL REFERENCE IONOSPHERE MODEL - IRI 79, Washington, DC., *World Data Center A*, Nov., 1981. (Report UAG 82) Report of URSI Working Group G.4 (identical with COSPAR task group on International Reference Ionosphere).
- IMHOF, W.L. Electron precipitation in the radiation belts. *Journal of Geophysical Research*, 73(13):4167-4184, July, 1968.
- IMHOF, W.L.; SMITH, R.V. Low altitude measurements of trapped electrons. In: McCORMAC, B.M. ed. *Radiation trapped in the earth's magnetic field*. Dordrecht, D. Reidel, 1966. Part 2, p. 101-111 (Astrophysics and Space Science Library, 5).
- \_\_\_\_\_. The behaviour of trapped electrons and protons at the lower edge of the inner radiation belt. *Journal of Geophysical Research*, 71(17):4157-4171, Sep., 1966.
- IMHOF, W.L.; GAINES, E.E.; REAGAN, J.B. Dynamic variations in intensity and energy spectra of electrons in the inner radiation belt. *Journal of Geophysical Research*, 78(22):4568-4577, Aug., 1973.

- \_\_\_\_\_. Evidence for the resonance precipitations of energetic electrons from the slot region of the radiation belts. *Journal of Geophysical Research*, 79(22):3141-3146, Aug., 1974.
- \_\_\_\_\_. L dependent peaks in the energy spectra of electrons precipitating from the inner belt. *Magnetospheric Physics*. Boston, MA. McCORMAC, B.M., 1974a. p. 129-133.
- \_\_\_\_\_. The energy selective precipitation of inner zone electrons. *Journal of Geophysical Research*, 83(A9):4245-4254, Sept., 1978.
- IMHOF, W.L.; REAGAN, J.B.; SMITH, R.V. Long-term study of electrons trapped on low L shells. *Journal of Geophysical Research*, 72(9):2371-2377, May, 1967.
- JONES, K.L.; RISBETH, H. The origin of storm increases of mid-latitude F-layer electron concentration. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 33(3):391-401, March, 1971.
- KANE, R.P. Geomagnetic field variation. *Space Science Reviews*, 18(4):413-540, Apr., 1976.
- KENNEL, C.F.; PETSCHKEK, H.E. Limit on stably trapped particle fluxes. *Journal of Geophysical Research*, 71(1):1-28, Jan., 1966.
- KIKUCHI, T. VLF phase anomalies associated with substorm. *Memoriam National Institute Polar Research Special Issue Japanese*, 3(18):319-325, March, 1981.
- KIKUCHI, T.; EVANS, D.S. Quantitative study of substorm associated VLF phase anomalies and precipitating energetic electrons on November 13, 1979. *Journal of Geophysical Research*, 88(A2):871-880, Feb., 1983.
- KOSSEY, P.A.; TURTLE, J.P.; PLAGLIARULO, R.P.; KLEMETTI, W.I.; RASMUSSEN, J.E. VLF reflection properties of the normal and disturbed polar ionosphere in northern Greenland. *Radio Science*, 18(6):907-916, Nov., 1983.

- LANZEROTTI, L.J.; COGGER, L.L.; MENDILLO, M. Latitude dependence of ionosphere total electron content: observations during sudden commencement storms. *Journal of Geophysics Research*, 80(7):1287-1306, Mar., 1975.
- LAUTER, E.A.; HRUSKOVA, J.; NESTOROV, G.; SPRENGER, K. Space and time variations of long wave ionosphere absorption at small solar heights and at night. *Geomagnetismo and Aeronomy*, 5(6):813-825, Dec., 1965.
- LAUTER, E.A.; KNUTH, R. Precipitation of high energy particles into the upper atmosphere at medium latitudes after magnetic storms. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 29(3):411-417, Mar., 1967.
- LEWIS, E.A. *Electromagnetic wave propagation*. New York, N.Y., Academic Press, 1960.
- LEWIS, E.A.; RASMUSSEN, J.E.; STAHMANN, J.R. Waveforms and relative phase stability of transients radiated from a helicopter-supported antenna wire. *IEEE Transactions Antennas and Propagation*, 13(2):257-290, Feb., 1965.
- LEWIS, E.A.; RASMUSSEN, J.E.; ROSSEY, P.A. Measurements of ionospheric reflectivity from 6 to 35 KHz. *Journal of Geophysical Research*, 78(19):3903-3912, July, 1973.
- LIEMOHN, H.B. Cyclotron-resonance amplification of VLF and ULF Whistlers. *Journal Geophysics Research*, 72(1):39-55, Jan., 1961.
- LINDEMANN, F.A.; DOBSON, G.M.B. A theory of meteors and the density and temperature of the outer atmosphere to which it lead. *Proceedings of the Royal Society of London*, 102(A):411-437, Apr., 1923.
- LINDQUIST, R. An interpretation of vertical incidence equivalent height versus time recording on 150 kc/s. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 4(1):10-27, Aug., 1953.

- LUHMANN, J.G. Auroral electron spectra in the atmosphere. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 38(6):605-610, June, 1976.
- LUHMANN, J.G.; VAMPOLA, A.L. Effects of localized sources on quiet time plasmasphere electron precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 82(19):2671-2676, July, 1977.
- LYONS, L.R.; THORNE, R.M. Equilibrium structure of radiation belt electrons. *Journal of Geophysical Research*, 78(13):2142-2149, May, 1973.
- LYONS, L.R.; THORNE, R.M.; KENNEL, C.F. Pitch-angle diffusion of radiation belt electrons within the plasmasphere. *Journal of Geophysical Research*, 77(19):3455-3474, July, 1972.
- LYONS, L.R.; WILLIAMS, D.J. The storm and poststorm evolution of energetic (35-560 KeV) radiation belt electron distributions. *Journal of Geophysical Research*, 80(28):3985-3994, Oct., 1975.
- MAEDA, K. Diffusion of low energy auroral electrons. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 27(2):259-275, Feb., 1965.
- McILWAIN, C.E. Coordinates for mapping the distribution of magnetically trapped particles. *Journal of Geophysical Research*, 66(11):3681-3691, Nov., 1961.
- McILWAIN, C.E. The radiation belts natural and artificial. *Science*, 142(1):355-361, Jan., 1963.
- MANZANO, J.R.; PINTADO, O.I.M.; ESQUER, R.G.; MARTINEZ DE GARAT, A.C. Acoplamiento de la alta y baja ionosfera durante la tormenta geomagnetica del 26 de marzo de 1976. *Geoacta*, 11(1):233-244, Oct., 1981.
- MARTIN, I.M.; RAI, D.B.; PALMEIRA, R.A.R.; TRIVEDI, N.B.; DA COSTA, J.M. Enhanced electron precipitation in Brazilian Magnetic Anomaly in association with sudden commencement. *Nature Physics Science*, 240(1):84-85, Jan., 1972.
- \_\_\_\_\_. Enhanced low energy gamma rays at balloon altitude in the Brazilian Magnetic Anomaly. *Nature*, 252:25-27, June, 1974.

- MASSAMBANI, O. *O conteúdo eletrônico ionosférico em baixas latitudes e sua dependência com a anomalia geomagnética do Atlântico Sul*. Dissertação de Mestrado, Centrô de Rádio Astronomia Mackenzie (CRAAM), Junho, 1977.
- MEIRA FILHO, L.G. Rocket measurements of upper atmospheric nitric oxide and their consequences to the lower ionosphere. *Journal of Geophysical Research*, 76(1):202-212, Jan., 1971.
- MENDES, A.; ANANTHAKRISHNAN, S. VLF phase changes produced by particle precipitation into the geomagnetic anomaly during solar proton events. *Radio Science*, 7(4):465-468, Apr., 1972.
- MENDES, A.T.M.; ANANTHAKRISHNAN, S.; PAES DE BARROS, M.H. Phase and amplitude changes of VLF signals associated with PCA events, with reference to the South Atlantic Geomagnetic Anomaly. *Annales de Geophysique*, 26(2):483-492, Feb., 1970.
- MENDILLO, M. A study of the relationship between geomagnetic storms and ionospheric disturbances at mid-latitudes. *Planetary and Space Science*, 21(3):349-358, Mar., 1973.
- MENDILLO, M.; PAPAGIANNIS, M.; KLOBUCHAR, J.A. Ionospheric storms at mid-latitudes. *Radio Science*, 5(6):895-898, June, 1970.
- MENDONÇA, F. Ionospheric electron content measurements in region of low magnetic dip and through the Brazilian Magnetic Anomaly. *Space Research*, 5(5):687-701, May, 1965.
- MITRA, A.P. A review of D-region processes in non-polar latitudes. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 30(8):1065-1114, Aug., 1968.
- \_\_\_\_\_. D region in disturbed conditions, including flares and energetic particles. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 37(5):895-913, May, 1975.
- MOURA, M.S.M.; ABRAHÃO, J.R.C. Nighttime electron density of the lower ionosphere in the South Atlantic Geomagnetic Anomaly region obtained through LF/VLF oblique ionosonde. Accepted for publication in *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, Dec., 1985.

- MURAOKA, Y. Lower ionospheric disturbances observed in long-distance VLF transmission at middle latitude. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 41(9):1031-1042, Sept., 1979.
- NESTOROV, G.; KRIVSKY, L.; LETFUS, V. Night lower ionosphere at geomagnetic latitude  $40^{\circ}$ N as indicator of corpuscular radiation phenomena. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 28(1):121-125, Jan., 1966.
- NICOLET, M. Meteor ionization and the nighttime E-layer. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 2(1):99-110, 1955, Special Supplement. *Apud* Chilton (1961).
- NUNES, J. *Precipitação de partículas carregadas na anomalia geomagnética brasileira*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Blumenau, Maio, 1982.
- OHSHIO, M.; ISHI, T.; TERAJIMA, Y. Negative sudden phase anomaly its prediction and discovery. *Journal of the Radio Research Laboratories*, 17(89):69-82, Jan., 1970.
- PAULA, E.R.; ABDU, M.A.; KANTOR, I.J. *Comportamento do conteúdo eletrônico total da ionosfera em São José dos Campos durante tempestades magnéticas em 1980*. São José dos Campos, INPE, jul., 1983. (INPE-2810-PRE/368).
- PAULA, E.R.; SOUZA, A.C.R.; KANTOR, I.J.; DUTRA, S.L.G. *Comparação entre perfis de densidade eletrônica da ionosfera, obtidos pelo modelo IRI-79 e observados em Cachoeira Paulista*. São José dos Campos, INPE, set., 1982. (INPE-2540-PRE/202).
- PAULIKAS, G.A. Precipitation of particles at low and middle latitudes. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 13(5):709-734, Nov., 1975.
- PAULIKAS, G.A.; BLAKE, J.B.; FREDEN, S.C. Precipitation of energetic electrons at middle latitudes. *Journal of Geophysical Research*, 71(13):3165-3172, July, 1966.

- PFITZER, K.; KANE, S.; WINCKLER, J.R.; the spectra and intensity of electrons in the radiation belts. *Space Research*, 6(5):702-715, May, 1966.
- PINTADO, O.; RADICELLA, S.M. Experimental estimates of electrons density variations at the height of VLF signals reflection compared with the IRI-79 model. *Proceedings of XII URSI General Assembly*, Florence, Italy, 1984.
- PIGGOT, W.R.; PITTEWAY, M.E.V.; THRANE, E.V. The numerical calculation of wave-fields reflections coefficients and polarizations for long radio waves in the lower ionosphere. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 257(2):219-271, Mar., 1965.
- PIZZELLA, G.; McILWAIN, C.E.; VAN ALLEN, J.A. The time variations of intensity in the earth's inner radiation zone, October 1959 through December 1960. *Journal of Geophysical Research*, 67(7):1235-1253, July, 1962.
- POERVELEIN, H. The earth's magnetosphere. *Handbuch der Physik*, 49(4):120-350, 1972.
- POTEMRA, T.A.; ROSENBERG, T.J. VLF propagation disturbances and electron precipitation at mid-latitudes. *Journal of Geophysical Research*, 78(10):1572-1579, Apr., 1973.
- POTEMRA, T.A.; ZMUDA, A.J. Precipitating energetic electrons as an ionization source in the mid-latitude nighttime D region. *Journal of Geophysical Research*, 75(34):7161-7167, Dec., 1970.
- POTEMRA, T.A.; ZMUDA, A.J.; SHAW, B.W.; HAAVE, C.R. VLF Phase disturbances, HF absorption, and solar protons in the PCA events of 1967. *Radio Science*, 5(8):1137-1145, Aug., 1970.
- PRÖLSS, G.W. Magnetic storm associated perturbations of the upper atmosphere: recent results obtained by satellite-borne gas analyzers. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 18(1):183-202, Jun., 1980.

- RADICELLA, S.M.; RESTBERGS, V. Oxygen allotropes concentrations and electron density profiles in the nighttime D-region. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 43(1):1-6, Jan., 1981.
- RASMUSSEN, J.E.; KOSSEY, P.A.; LEWIS, E.A. Evidence of an ionospheric reflecting layer below the classical D region. *Journal of Geophysical Research*, 85(A6):3037-3044, June, 1980.
- RATCLIFFE, J.A. *An introduction to the ionosphere and magnetosphere*. Cambridge, University Press, 1972.
- RATCLIFFE, J.A.; WEEKES, K. *The ionosphere; physics of the upper atmosphere*. London, Academic Press, 1960.
- REDER, F.H. Propagation effects on omega signals and methods of reducing them. ANNUAL MEETING OF THE INTERNATIONAL OMEGA ASSOCIATION, 4., San Diego, Sept., 1979.
- \_\_\_\_\_. Omega and VLF propagation. ANNUAL MEETING OF THE INTERNATIONAL OMEGA ASSOCIATION, 6., Montreal, Canada, Aug., 1981.
- REES, M.H. Auroral ionization and excitation by incident energetic electrons. *Planetary and Space Science*, 11(4):1209-1218, Nov., 1963.
- \_\_\_\_\_. Note on the penetration of energetic electrons in the earth's atmosphere. *Planetary and Space Science*, 12(3):722-725, July, 1964.
- REID, G.C. Production and loss of electrons in the quiet daytime D-region of the ionosphere. *Journal of Geophysical Research*, 75(13):2551-2562, May 1970
- ROBERTS, C.S. Cyclotron and bounce-resonance scattering of electrons trapped in the earth's magnetic field. In: CAROVILLANO, R.L.; MCCLAY, J.F.; RADOSKI, H.R. ed. - *Physics of the magnetosphere*. Dordrecht, D. Reidel, 1968, Part 2, p. 514-533. (Astronomy and Space Science Library, 10).

- \_\_\_\_\_. Electron losses from De Van Allen zone due to pitch-angle scattering. In. MCCORMAC, B.M., ed. *Radiation trapped in the earth's magnetic field*. Dordrecht, D, Reidel, 1966. Part 5, p. 403-421. (Astrophysics and Space Library, 5).
- \_\_\_\_\_. Pitch-angle diffusion of electrons in the magnetosphere. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 7(1):305-337, Feb., 1969.
- ROEDERER, J.G. *Dynamics of geomagnetically trapped radiation*. New York, N.Y., Springer Verlag 1970. (Physics and Chemistry in Space, 2).
- \_\_\_\_\_. Longitude dependence of geomagnetically trapped electrons. *Journal of Geophysical Research*, 72(17):4431-4447, Sept., 1967.
- \_\_\_\_\_. Geomagnetic field distortions and their effects and radiations belt particles. *Reviews of Geophysical and Space Physics*, 10(2):599-630, Mar., 1972.
- ROEDERER, J.G.; WELCH, J.A. Theoretical description of trapped electron diffusion in the South American Anomaly. *Space Research*, 6(1):148-164, Jan., 1966.
- ROSEN, A.; SANDERS, N.L. Loss and replenishment of the electrons in the inner radiation zone during 1965-1967. *Journal of Geophysical Research*, 76(1):110-121, Jan., 1979.
- ROSTOKER, G. Geomagnetic Indices. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 10(4):935,950, Nov., 1972.
- RUMI, G.C. Identification of D-region ledges of ionization by LF/VLF observations during a meteor shower. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 44(9):773-783, Sept., 1982.
- SEATON, M.J. A possible explanation of the drops in F region critical densities accompanying major ionospheric storm. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 8(1):122-124, Jan., 1956.
- SECHRIST, C.F. Comparison of techniques for measurements of D-region electron densities. *Radio Science*, 9(1):137-149, Jan., 1974.

- SCHULZ, M.; LANZEROTTI, L.J. *Particle diffusion in the radiation belts*. New York, N.Y., Springer-Verlag, 1974. (Physics and Chemistry in Space, 7).
- SOLAR GEOPHYSICAL DATA. Comprehensive reports, n. 383-455, Part II, Boulder, Colorado, USA, 1976-1982.
- SOLAR GEOPHYSICAL DATA. Prompt reports, n. 378-499, Part I, Boulder, Colorado, USA, 1976-1982.
- SPIES, K.P.; WAIT, J.R. Mode calculations for VLF propagation in the earth-ionosphere waveguide. National Bureau of Standards, Boulder, Colorado, 1961. Technical note n° 114.
- SPJELDIK, W.M.; THORNE, R.M. The case of storm after effects in the middle latitude B-region. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 37(5):777-795, May, 1975.
- STROBEL, D.F. Nitric oxide in the D-region. *Journal of Geophysical Research*, 77(7):1337-1339, March, 1972.
- TRIVEDI, N.B.; RAI, D.B.; MARTIN, I.M., DA COSTA, J.M. Particle precipitation in Brazilian Geomagnetic Anomaly during magnetic storms. *Planetary and Space Science*, 21(4):1699-1704, Apr., 1973.
- TORR, D.G.; TORR, M.R.; WALKER, J.C.G.; HOFFMAN, R.A. Particle precipitation in the South Atlantic Geomagnetic Anomaly. *and Space Science*, 23(1):15-26, Mar., 1975.
- VAMPOLA, A.L., GORNEY D.J. Electron-energy deposition in the middle atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 88(A8):6267-6274, Aug., 1983.
- VAN ALLEN, J.A. Some general aspects of geomagnetically trapped radiation. In: MCCORMAC, B.M., ed. *Radiation trapped in the earth's magnetic field*. Dordrecht, Holland, D. Reidel, 1966. Part 2, p. 65-67. (Astrophysics and Space Science Library, 5).

- VAN ALLEN, J.A.; FRANK, L.A.; O'BRIEN, B.J. Satellite observations of the artificial radiation belt of July, 1962. *Journal of Geophysical Research*, 68(3):619-627, Feb., 1963.
- VERNOV, S.N.; CHUDAKOV, A.E. Terrestrial corpuscular radiation and cosmic rays. *Space Research*, 1:754-796, May, 1960.
- VILAS BOAS, J.W.S.; PAES LEME, N.M.; PIAZZA, L.R.; MENDES DA COSTA, A.; MACEDO MOURA, M.S.S. Local and long-distance effects of meteor showers in the low terrestrial ionosphere. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 48(7):643-648, Jul., 1986.
- YEIZONG HAI; DENG RONG HUA. The mid-latitude ionosphere D-region disturbance initiated by the galactic cosmic ray, INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON EQUATORIAL AERONOMY, 7., Hong Kong, Mar., 1984.
- WAIT, J.R. Electromagnetic waves in stratified media. Pergamon Press, Oxford, 1962. Chap. 9, p. 264-287.
- WAIT, J.R.; SPIES, K.P. Characteristics of the earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves, London National Bureau of Standards, (Technical Note n<sup>o</sup> 300), Dec. 1964.
- WAIT, J.R.; WALTERS, L.G. A Reflection of VLF radio waves from an inhomogeneous ionosphere, Part I: Exponentially varying isotropic model. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 67D(3):361-367, May, 1963.
- WATT, A.D. *VLF radio engineering* New York, N.Y., Pergamon Press, 1967.
- WATTS, J.M.; BROWN, G.D.N. Ionosphere observations at 50 kc. *Journal of Geophysical Research*, 55(2):179-181, June, 1950. (Apud Belrose and Thomas (1968)).
- WELCK, J.A.; WITTHAKER, W.A. Theory of geomagnetically trapped electrons from an artificial source. *Journal of Geophysical Research*, 54(4):909-922, Feb., 1959.
- WENTWORTH, R.C. Enhancement of hydromagnetic emissions after geomagnetic storms. *Journal of Geophysical Research*, 69(11):2291-2298, June, 1964.

- WEST, H.I.; BUCK, R.M.J.; WALTON, J.R. Electron Pitch angle distribution throughout the magnetosphere as observed on Ogo 5. *Journal of Geophysical Research*, 78(7):1064-1081, Mar., 1973.
- WESTERLUNG, S.; REDER, F.H. VLF propagation at auroral latitude. *Journal the Atmospheric and Terrestrial Physics*, 35(8):1453-1474, Aug., 1973.
- WHITE, R.S. *Space Physics*. New York, N.Y.; Gordon and Breach, 1970, p. 2.
- WILLIAMS, D.J.; ARENS, J.F.; LANZEROTTI, L.J. Observations of trapped electrons at low and high altitudes. *Journal of Geophysical Research*, 73(17):5673-5696. Sept., 1968.
- ZMUDA, A.J. Ionization enhancement from Van Allen electrons in the South Atlantic Magnetic Anomaly. *Journal of Geophysical Research*, 71(7):1911-1917, Apr., 1966.