



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**INPE-13943-TDI/1059**

## **A INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO VENTO SOLAR NA EMISSÃO DA AKR DURANTE TEMPESTADES MAGNÉTICAS**

Edio da Costa Junior

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, orientada pela Dra. Maria Virgínia Alves e pelo Dr. Walter Demétrio González Alarcon, aprovada em 20 de fevereiro de 2006.

523.4-854

COSTA JUNIOR, E.

A influência dos parâmetros do vento solar na emissão da AKR durante tempestades / E. Costa Junior – São José dos Campos: INPE, 2006.

95 P. ; (INPE-13943-TDI/1059).

- 1.Radiação Quilométrica Auroral (AKR).
- 2.Tempestades magnéticas. 3.Interações sol-terra.
- 4.Plasmas espaciais. 5.Radiação eletromagnética.
- 6.Atividade auroral. 7.Vento solar. I.Título

Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de Mestre em  
**Geofísica Espacial**

Dr. Jonas Rodrigues de Souza

  
-----  
Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dra. Maria Virgínia Alves

  
-----  
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Walter Demetrio Gonzalez Alarcon

  
-----  
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Ezequiel Echer

  
-----  
Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Luiz Fernando Ziebell

  
-----  
Convidado(a) / UFRGS / Porto Alegre - RS

Aluno (a): Edio da Costa Júnior

São José dos Campos, 20 de fevereiro de 2006



*“O idiota nunca aprende... O inteligente aprende com os próprios erros... O sábio aprende com os erros dos outros”.*

SABEDORIA POPULAR



À minha mãe, meu irmão e minha princesa Flavia.





## AGRADECIMENTOS

Agradeço a tudo e a todos que me ajudaram durante mais esta fase da minha vida.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo auxílio financeiro durante os dois anos de bolsa de mestrado.

À orientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Virgínia Alves pelo apoio, orientação na realização deste trabalho e principalmente por ter se mostrado uma pessoa tão amiga e extremamente sensata.

Ao orientador Prof. Dr. Walter Demétrio Gonzalez pelas ótimas idéias propostas para o desenvolvimento do trabalho e também por ter se mostrado uma pessoa muito acessível.

Ao Laboratório Associado de Plasma e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pela oportunidade de estudos e utilização de suas instalações.

Aos amigos de curso Fernando Jaques pela grande ajuda dada na parte computacional e Fernando Guarnieri pelas dicas sobre o MATLAB.

À Flavia por dividir os melhores e piores momentos desta caminhada comigo, amplificando as alegrias e minimizando as decepções.

À minha mãe e meu irmão, pelo apoio incondicional e por sempre acreditarem em mim e na importância dos estudos.

A todos os amigos, dentro e fora do INPE, que fizeram com que essa jornada fosse mais prazerosa.

E finalmente a todos aqueles que dividiram horas de academia e treinamento comigo, onde eu relaxava (batia e apanhava) e recarregava as baterias.



## RESUMO

Vários fenômenos puderam ser melhor estudados ou até mesmo foram descobertos depois do desenvolvimento dos satélites e espaçonaves. Dentre esses fenômenos podemos destacar a Radiação Quilométrica Auroral (AKR). O fenômeno foi descoberto apenas há pouco mais de 30 anos; suas frequências típicas são muito baixas para penetrar na ionosfera em direção à Terra. É gerada através de interações onda-partícula na região noturna do planeta, acima da região auroral. A energia necessária para sua geração provém dos feixes de elétrons que se precipitam nas regiões aurorais. É gerada principalmente no modo extraordinário (modo-X), no intervalo de frequências de  $\approx 20\text{-}800$  kHz, próximo da frequência local ciclotrônica de elétrons. Atualmente, sabe-se muito bem que a AKR é intensificada durante subtempestades magnéticas, sendo bem correlacionada com o índice AE. Entretanto, estudos recentes têm mostrado que a radiação desaparece nas fases inicial e principal de algumas tempestades magnéticas, apesar do grande aumento do índice AE e de correntes alinhadas ao campo. Nesses casos a radiação volta a ser emitida na fase de recuperação. Esse comportamento sugere que o campo elétrico alinhado ao campo magnético que acelera os elétrons que se precipitam e induz correntes alinhadas não é formado nas fases inicial e principal de algumas tempestades magnéticas. Nesse estudo o interesse é quantificar a AKR e estudar a influência dos parâmetros do vento solar nas emissões durante tempestades magnéticas. Para esse fim foi desenvolvido um índice numérico baseado na intensidade da radiação auroral exibida nos espectrogramas dinâmicos. Esse índice numérico representa a intensidade da AKR e foi chamado índice AKR. Foram selecionados alguns eventos para os quais estão disponíveis os espectrogramas da AKR e os parâmetros do plasma interplanetário e os índices geomagnéticos AE e Dst. Dentre os eventos selecionados, em alguns a AKR é emitida durante todo o tempo da tempestade e em outros observa-se o desaparecimento da AKR nas fases iniciais da tempestade. A análise dos eventos revelou que o parâmetro determinante para a presença ou ausência da AKR é a densidade de plasma da lâmina de plasma, enquanto o parâmetro que melhor se correlaciona com a AKR é a velocidade do vento solar.



# THE INFLUENCE OF THE SOLAR WIND PARAMETERS ON THE AKR EMISSION DURING MAGNETIC STORMS

## ABSTRACT

Several phenomena could be better studied and even disclosed after the development of the satellites and spacecrafts. Auroral Kilometric Radiation (AKR) is one of these phenomena. AKR was first detected only about thirty years ago; its typical frequencies are too low to penetrate earthward across the ionosphere. This radiation is generated through wave-particle interactions, in the nightside region above the auroral ionosphere. It grows at the expense of free energy from the precipitating auroral electron beam. It is generated mainly in the extraordinary (X) mode, in the frequency range of  $\approx 20$ -800 kHz, near the local electron cyclotron frequency. Nowadays, it is well known that AKR is intensified during magnetic substorms and has a good correlation with the AE magnetic index. However, recent studies showed that the radiation disappears in the initial and main phases of some magnetic storms, in spite of the large enhancement of the AE index and field aligned currents. The radiation activates strongly in the recovery phase. This behavior suggests that the field-aligned electric field, which accelerates precipitating electrons and drives field-aligned currents, is not formed in the initial and main phases of some magnetic storms. In this work, we are interested in quantify the AKR emission and study the influence of the solar wind parameters on AKR during magnetic storms. In order to do this, a numerical AKR index was developed, based on the intensity of the auroral radiation shown by AKR dynamical spectra. This numerical AKR index represents the intensity of AKR and we called it AKR index. We selected a few events for which we have available the AKR spectrum along with the interplanetary plasma parameters and the geomagnetic indices Dst and AE. Among the selected events we found some where AKR is present all the way during a magnetic storm, but others where AKR is suppressed during the initial and main phases of the storms. By analyzing the events we observe that the main parameter to determine the presence or absence of AKR is the plasma density of the plasma sheet. However, the parameter that best correlates to AKR was found to be the solar wind velocity.



## SUMÁRIO

Pág.

### LISTA DE FIGURAS

### LISTA DE TABELAS

### LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b>	<b>25</b>
<b>CAPÍTULO 2 - RADIAÇÃO QUILOMÉTRICA AURORAL</b>	<b>31</b>
2.1 - Ondas Eletromagnéticas do Modo-O (Ordinário) e do Modo-X (Extraordinário) . . . . .	40
<b>CAPÍTULO 3 - RADIAÇÃO QUILOMÉTRICA AURORAL E SUBTEMPESTADES AURORAIS</b>	<b>45</b>
3.1 - Subtempestades Magnéticas e o índice AE . . . . .	45
3.2 - Radiação Quilométrica Auroral Durante Subtempestades Magnéticas . . . . .	47
<b>CAPÍTULO 4 - RADIAÇÃO QUILOMÉTRICA AURORAL E TEMPESTADES MAGNÉTICAS</b>	<b>53</b>
4.1 - Tempestades Magnéticas . . . . .	53
4.1.1 - O Índice Dst e as Fases das Tempestades . . . . .	54
4.2 - AKR Durante Tempestades Magnéticas . . . . .	56
<b>CAPÍTULO 5 - METODOLOGIA</b>	<b>63</b>
5.1 - Definição do Índice AKR e Quantificação do Fenômeno . . . . .	63
5.2 - Definição de Correlação . . . . .	68
<b>CAPÍTULO 6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>71</b>
6.1 - Informações Gerais Sobre os Eventos . . . . .	71
6.2 - Resultados . . . . .	72
6.2.1 - Evento 1 . . . . .	73
6.2.2 - Evento 2 . . . . .	74
6.2.3 - Evento 3 . . . . .	74

6.2.4 - Evento 4 . . . . .	75
6.2.5 - Evento 5 . . . . .	76
6.2.6 - Evento 6 . . . . .	77
6.2.7 - Evento 7 . . . . .	78
6.2.8 - Evento 8 . . . . .	79
6.2.9 - Evento 9 . . . . .	80
6.3 - O Que Significam os Resultados? . . . . .	81
<b>CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES</b>	<b>87</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>91</b>



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 a) Diagrama esquemático das regiões de plasma da magnetosfera da Terra, vista no plano que contém o meridiano do meio-dia e da meia-noite. b) Corte tridimensional da magnetosfera terrestre mostrando as principais correntes e regiões de plasma . . . . .	28
2.1 Medidas simultâneas das intensidade dos campos elétrico e magnético feitas pelo satélite IMP 6, mostrando que a AKR consiste de ondas eletromagnéticas. A linha tracejada mostra a relação entre <b>E</b> e <b>B</b> para uma onda eletromagnética no vácuo. . . . .	32
2.2 Dados de campo elétrico do satélite IMP 6 para o dia 14 de setembro de 1971, mostrando vários períodos de intensa emissão de AKR nos canais de 100 e 178 kHz. . . . .	33
2.3 Espectro de potência da Radiação Quilométrica Auroral observado pelo satélite IMP 8 a uma distância radial de 25,2 raios terrestres, na parte noturna do planeta. . . . .	34
2.4 Porcentagem de ocorrência da AKR em 178 kHz, como função da latitude magnética e do tempo magnético local. . . . .	35
2.5 Fluxo de potência observado pelo satélite IMP 6 em 178 kHz e os correspondentes envelopes de magnetogramas obtidos por estações no solo para o dia 25 de janeiro de 1973 . . . . .	36
2.6 Índices AU e AL para uma subtempestade típica bem estudada. As três fases dessa subtempestade (crescimento, expansão e recuperação) podem ser identificadas pelo comportamento dos índices. O horário correspondente ao início de cada fase é indicado pelas linhas verticais. . . . .	38

2.7	A dispersão de ondas extraordinárias, analisada a partir do comportamento da velocidade de fase e da frequência. Não existe propagação nas áreas sombreadas. . . . .	42
3.1	a) Sequência de imagens para um período de subtempestade moderada em 29 de dezembro de 1996, obtidas pelo UVI. b) Espectro temporal de ondas de plasma, obtido pelo PWI para a mesma data. . . . .	48
3.2	Diferença temporal entre o início de subtempestades aurorais e o aumento da AKR para 136 eventos isolados. . . . .	49
4.1	Relação entre os índices AE e Dst obtida através da superposição de 15 tempestades magnéticas entre 1990 e 1993. . . . .	55
4.2	Desaparecimento da AKR observada com o satélite Geotail para o período de 21 a 23 de fevereiro de 1994. O painel superior mostra o espectro no intervalo de frequência de 12,5 a 800 kHz, o do meio o índice AE e o inferior o índice Dst. . . . .	57
4.3	Probabilidade de desaparecimento da AKR em função da magnitude do índice Dst . . . . .	58
4.4	Espectros de energia entre (a) 19:09:41 e 19:09:46 UT do dia 11 de fevereiro de 1994 e (b) 10:51:15 e 10:51:20 do dia 12 de fevereiro de 1994. . . . .	60
5.1	Representação esquemática do método utilizado para o cálculo do valor horário do índice AKR. . . . .	63
5.2	a) Valores do índice para os dias 21, 22 e 23 de fevereiro de 1994. b) Espectro obtido pelo PWI a bordo do Geotail. . . . .	64
5.3	a) Valores do índice para os dias 21, 22 e 23 de fevereiro de 1994. b) Espectro obtido pelo PWI entre 150 e 300 kHz. A escala de intensidade do espectro é a mesma da figura 5.2. . . . .	65

5.4	a) Valores do índice da atividade de AKR para os dias 11 e 12 de janeiro de 1994. b) Espectro obtido pelo PWI. c) Velocidade do vento solar $km/s$ . d) Densidade do vento solar (partículas por $cm^3$ ). e) Índice Dst. f) Índices AU e AL ( $AE = AU - AL$ ). g) densidade da lâmina de plasma. . . . .	67
6.1	Valores de correlações para o índice Dst para os nove eventos. Os valores representados com um "x" correspondem aos casos de não desaparecimento da AKR. Em a) estão os valores para todas as frequências e em b) para o intervalo entre 150 e 300 kHz . . . . .	81
6.2	Valores de correlações para Bz para os nove eventos. Os valores representados com um "x" correspondem aos casos de não desaparecimento da AKR. Em a) estão os valores para todas as frequências e em b) para o intervalo entre 150 e 300 kHz . . . . .	82
6.3	Valores de correlações para a velocidade do vento solar para os nove eventos. Os valores representados com um "x" correspondem aos casos de não desaparecimento da AKR. Em a) estão os valores para todas as frequências e em b) para o intervalo entre 150 e 300 kHz . . . . .	83
6.4	Valores de correlações para a densidade do vento solar para os nove eventos. Os valores representados com um "x" correspondem aos casos de não desaparecimento da AKR. Em a) estão os valores para todas as frequências e em b) para o intervalo entre 150 e 300 kHz . . . . .	83
6.5	Valores de correlações para a densidade da lâmina de plasma para os nove eventos. Os valores representados com um "x" correspondem aos casos de não desaparecimento da AKR. Em a) estão os valores para todas as frequências e em b) para o intervalo entre 150 e 300 kHz . . . . .	84



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
5.1 Classificação dos valores numéricos de correlação. . . . .	70
6.1 Datas, estruturas interplanetárias causadoras, valores mínimos de Dst e nomes utilizados para descrever as tempestades investigadas nesse trabalho.	71
6.2 Dados que foram utilizados em cada um dos eventos estudados no trabalho.	72
6.3 Correlações entre os parâmetros do vento solar e a AKR entre 9 e 11 de dezembro de 1997. . . . .	74
6.4 Correlações entre os parâmetros do vento solar e a AKR entre 9 e 11 de dezembro de 1997, para o intervalo de frequências entre 150 e 300 kHz. .	75
6.5 Correlações entre os parâmetros do vento solar e a AKR entre 16 e 18 de fevereiro de 1998. . . . .	75
6.6 Correlações entre os parâmetros do vento solar e a AKR entre 16 e 18 de fevereiro de 1998, para o intervalo de frequências entre 150 e 300 kHz. . .	76
6.7 Correlações entre os parâmetros do vento solar e a AKR entre 6 e 8 de abril de 2000. . . . .	76
6.8 Correlações entre os parâmetros do vento solar e a AKR entre 6 e 8 de abril de 2000, para o intervalo de frequências entre 150 e 300 kHz. . . . .	77
6.9 Correlações entre os parâmetros do vento solar e a AKR entre 22 e 24 de maio de 2000. . . . .	77
6.10 Correlações entre os parâmetros do vento solar e a AKR entre 22 e 24 de maio de 2000, para o intervalo de frequências entre 150 e 300 kHz. . . . .	78
6.11 Correlações entre os parâmetros do vento solar e a AKR entre 11 e 13 de agosto de 2000. . . . .	78

6.12	Correlações entre os parâmetros do vento solar e a AKR entre 11 e 13 de agosto de 2000, para o intervalo de frequências entre 150 e 300 kHz. . . .	79
6.13	Correlações entre os parâmetros do vento solar e a AKR entre 30 de março e 01 de abril de 2001. . . . .	79
6.14	Correlações entre os parâmetros do vento solar e a AKR entre 30 de março e 01 de abril de 2001, para o intervalo de frequências entre 150 e 300 kHz. . . . .	79
6.15	Correlações entre os parâmetros do vento solar e a AKR entre 11 e 13 de abril de 2001. . . . .	80
6.16	Correlações entre os parâmetros do vento solar e a AKR entre 11 e 13 de abril de 2001, para o intervalo de frequências entre 150 e 300 kHz. . . .	80

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AE - Auroral Electrojet, índice que mede as perturbações magnéticas em altas latitudes  
Bz - Componente norte-sul do campo magnético interplanetário  
DLP - Densidade da lâmina de plasma  
Dst - Índice que mede as perturbações magnéticas em latitudes equatoriais  
DVS - Densidade do vento solar  
IMAGE - Imager for Magnetopause-to Aurora Global Exploration  
IMP - Interplanetary Monitor Plataform  
MLT - Magnetic Local Time (Hora Magnética Local)  
MPA - Magnetospheric Plasma Analyser, a bordo dos satélites LANL  
OMNI - Operating Mission as Nodes on the Internet  
PWI - Plasma Wave Instrument, a bordo do satélite Geotail  
PWS - Plasma Wave and Sounder Experiment, a bordo do satélite Akebono  
RPI - Radio Plasma Imager, a bordo do satélite IMAGE  
UT - Universal Time (Tempo Universal)  
VVS - Velocidade do vento solar





## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

As pesquisas em física espacial se preocupam principalmente com as interações que ocorrem entre partículas energéticas carregadas e campos elétricos e magnéticos no espaço interplanetário. Nas proximidades da Terra, a energia da maior parte dessas partículas carregadas provém diretamente do Sol ou da interação do vento solar com a magnetosfera terrestre. Porém, essas interações não são triviais, uma vez que os campos elétricos e magnéticos que determinam o movimento das partículas são afetados pelo próprio movimento das mesmas.

Vários tipos de pesquisas espaciais foram e ainda são desenvolvidas a partir da superfície do planeta, com o auxílio de câmeras, fotômetros, espectrômetros, magnetômetros, radares, dentre vários outros tipos de instrumentos bastante sensíveis aos processos que ocorrem em altas altitudes na atmosfera superior e na magnetosfera. No entanto, atualmente a maior parte das pesquisas são conduzidas com o auxílio de foguetes e satélites, que permitem que as medidas sejam obtidas nas regiões onde as interações realmente acontecem. Essas observações obtidas *in situ* contribuem de forma bastante significativa para o conhecimento e melhor compreensão dos processos estudados pela física solar e terrestre.

Apesar dos avanços e relativas facilidades atuais, ainda há muito a ser feito no campo da física solar e terrestre, que já tem uma história longa e considerável. O interesse pela área foi despertado no homem com a apreciação de dois fenômenos principais: a aurora e, posteriormente, o campo geomagnético.

Por serem visualizadas a olho nu, as auroras foram descobertas primeiro. Várias passagens no Velho Testamento parecem ter sido inspiradas por brilhos aurorais (KIVELSON; RUSSEL, 1995). Referências a auroras podem ser encontradas em literaturas remotas tanto do ocidente como do oriente, mostrando que o fenômeno já despertava interesse e curiosidade mesmo antes do desenvolvimento da ciência como a conhecemos hoje. Na literatura chinesa existem vários relatos datados de antes de 2000 A.C que fazem referência às auroras. Por não serem compreendidas naquela época, despertavam muito medo e superstição. O século XVII marcou o início das teorias científicas para tentar explicar a origem do fenômeno (EATHER *et al.*, 1979).

Já o geomagnetismo demorou um pouco mais antes de ser documentado. As

primeiras indicações da existência do campo geomagnético foram notadas com a capacidade de reorientação das bússolas, no sentido mais remoto da palavra. À medida que as bússolas foram sendo melhoradas, mais e mais foi sendo descoberto sobre o campo terrestre. As primeiras evidências de que os chineses soubessem que as bússolas indicavam a direção norte-sul datam do século XI.

De volta aos dias atuais, as descobertas que foram feitas a partir dos anos 1950 de vários fenômenos que ocorrem nas camadas solares e nas magnetosferas e ionosferas dos planetas do nosso sistema solar, assim como o descobrimento do próprio vento solar, têm sido usadas para esclarecer os mecanismos de interação entre essas diferentes estruturas. Além disso, essas descobertas servem de modelo para fenômenos que ocorrem em estrelas mais remotas e em outros objetos astrofísicos, com os quais não é possível um contato direto através de sondas ou satélites, e cuja única fonte de informação são as ondas eletromagnéticas que emitem.

No que diz respeito à Terra, é bem conhecido o fato de que a interação entre o vento solar e a magnetosfera e ionosfera terrestres exercem uma grande influência nas linhas de comunicação, seja via satélites ou por reflexão na ionosfera, além de influenciar os sistemas de transmissão de energia a longas distâncias, podendo aumentar a corrosão e criar fortes correntes transientes em oleodutos e gasodutos (GAELZER, 1991). Especula-se também sobre uma possível influência que essa interação teria sobre o próprio clima de nosso planeta. Por todos esses e outros motivos, é evidente a necessidade de se conhecer a fundo os processos que ocorrem próximos à Terra, não apenas pelos impactos científicos, mas também tecnológicos.

A magnetosfera terrestre é de extrema importância para a manutenção da vida em nosso planeta, funcionando como uma espécie de escudo e desviando para os pólos do planeta as partículas carregadas provenientes do vento solar. Dentre todos os possíveis fenômenos decorrentes da interação entre o vento solar e a magnetosfera terrestre, este trabalho se concentrará apenas no estudo do fenômeno conhecido como Radiação Quilométrica Auroral.

A Terra é um emissor natural de ondas eletromagnéticas. Emissões intensas de ondas de rádio ocorrem em aproximadamente algumas centenas de kHz. Uma vez que o comprimento de onda dessa radiação é da ordem de quilômetros, foi chamada inicialmente de Radiação Quilométrica Terrestre (TKR, do inglês *Terrestrial Kilometric Radiation*), recebendo posteriormente a denominação Radiação Quilométrica

Auroral (AKR, do inglês *Auroral Kilometric Radiation*), por estar intimamente relacionada à aceleração de elétrons na região auroral (ZARKA, 1998). A partir de agora será utilizada a sigla em inglês AKR para se referir ao fenômeno.

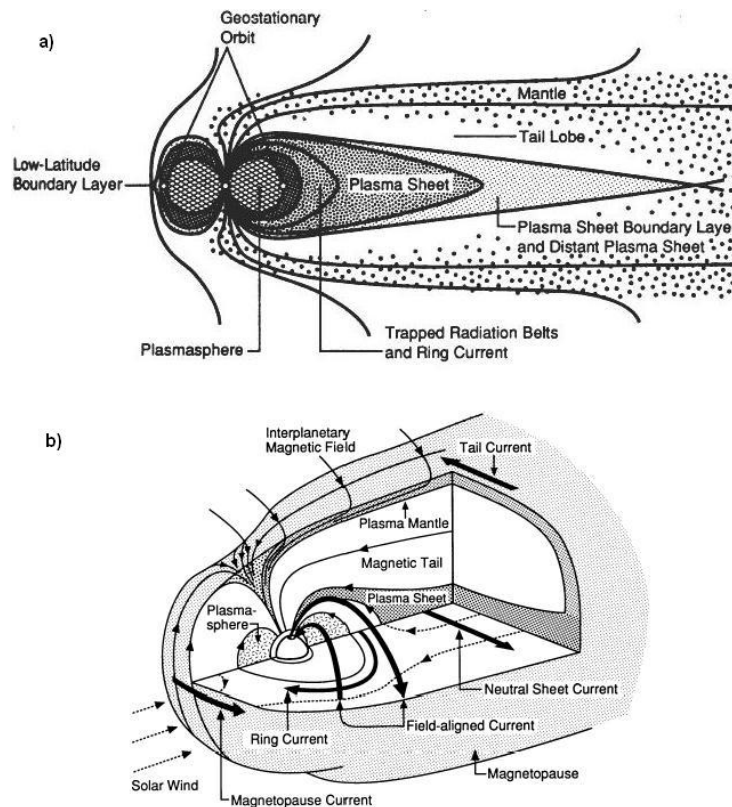
A AKR é gerada através de interações entre ondas e partículas na parte noturna da magnetosfera terrestre, a distâncias relativamente pequenas da Terra, ocorrendo em rajadas que duram por períodos de meia hora até várias horas. A sua ocorrência está intimamente relacionada com a ocorrência de arcos aurorais discretos (GALLAGHER; D'ANGELO, 1981). Ambos os fenômenos, AKR e auroras, se originam da interação entre o vento solar, a magnetosfera e a ionosfera, representando as etapas finais de um processo de liberação explosiva de energia acumulada na cauda geomagnética. A figura 1.1 apresenta de forma simplificada visões bidimensional e tridimensional das principais regiões e correntes magnetosféricas.

Essa radiação não pode ser detectada no solo. A razão disso é que as emissões da Terra apresentam frequências que são da ordem de centenas de kHz, abaixo do limite crítico a partir do qual a ionosfera passa de opaca a transparente às ondas eletromagnéticas. Portanto, todas as observações de AKR são feitas por satélites. Isso explica porque as emissões terrestres só foram descobertas no início da década de setenta, após o advento dos satélites destinados a observar a magnetosfera a grandes distâncias radiais do planeta, aproximadamente vinte anos depois da descoberta das emissões similares de Júpiter (*Jovian Decametric Radiation*) (ZARKA, 2004). As emissões jovianas possuem comprimento de onda que são da ordem de dezenas de metros, com frequências da ordem de dezenas de MHz, sendo suficientemente altas para ultrapassar o citado limite. São, portanto, detectáveis a partir do solo (ZARKA, 1998).

É bastante conhecido o fato de que a AKR é intensificada durante subtempestades aurorais. Além disso, a radiação quilométrica auroral apresenta boa correlação com o índice de atividade auroral AE, podendo ser usada como um indicador confiável sobre o início de subtempestades (LIOU *et al.*, 2000).

A ocorrência e a intensificação da AKR estão ligadas à atividade magnetosférica, sendo então uma boa indicação sobre a situação magnetosférica do planeta (KAISER; ALEXANDER, 1977). Murata *et al.* () desenvolveram um índice baseado na intensidade de ondas de plasma integrada sobre o intervalo de 50-800 kHz, a partir das observações de onda de plasma do satélite Geotail. Posteriormente, Kurth e Gurnett

(1998) desenvolveram um índice bastante similar baseado no fluxo de potência integrado sobre o mesmo intervalo de frequência, observado pelo instrumento de onda de plasma a bordo do satélite Polar.



**FIGURA 1.1** - a) Diagrama esquemático das regiões de plasma da magnetosfera da Terra, vista no plano que contém o meridiano do meio-dia e da meia-noite. b) Corte tridimensional da magnetosfera terrestre mostrando as principais correntes e regiões de plasma  
 FONTE: Kivelson e Russel (1995).

Os estudos mostraram que este tipo de índice é bastante promissor e útil para o estudo da magnetosfera e da ionosfera, revelando assim várias vantagens em se usar a AKR como uma ferramenta para o estudo da atividade auroral (VOOTS *et al.*, 1977). Primeiro, a distribuição angular da AKR é geralmente grande o suficiente para que possa ser facilmente observada por uma espaçonave que voe a altas altitudes. Segundo, dentro do cone de emissão a intensidade da AKR é uniforme. Terceiro, a resolução temporal dos instrumentos de campo elétrico que são utilizados para a observação da radiação é geralmente muito melhor que 1 minuto. Por fim, emissões

de rádio de toda a zona auroral podem ser monitoradas por um único satélite, enquanto para a derivação de índices magnéticos são necessárias cadeias de estações no solo.

Por outro lado, estudos mais recentes (MORIOKA *et al.*, 2003) mostraram comportamentos realmente inesperados da AKR durante tempestades magnéticas. Um resultado surpreendente é o desaparecimento da radiação durante as fases inicial e principal de várias tempestades, apesar do grande aumento do índice AE e da formação das correntes elétricas alinhadas ao campo magnético terrestre durante esses períodos (SEKI *et al.*, 2005).

Neste trabalho, o principal objetivo é entender como os parâmetros do vento solar influenciam as emissões da AKR durante tempestades magnéticas. Para isso, um índice numérico para quantificar a atividade da AKR foi desenvolvido, baseado na análise dos espectrogramas do fenômeno, obtidos pelo PWI (*Plasma Wave Instrument*) a bordo do satélite Geotail. Além disso, foram utilizados dados observacionais da velocidade e da densidade do vento solar, do campo magnético interplanetário, dos índices Dst e AE e da densidade iônica da lâmina de plasma para estudos e comparação direta com a atividade AKR, descrita pelo índice desenvolvido nesse trabalho.

Para esse intuito, o trabalho foi desenvolvido da seguinte maneira:

- No Capítulo 2 são apresentadas as características principais da AKR, ao lado de uma breve revisão histórica da evolução das observações do fenômeno. Além disso é apresentada uma breve revisão sobre ondas eletromagnéticas dos modos ordinário e extraordinário, os modos em que a AKR é gerada.
- O Capítulo 3 traz uma breve revisão sobre o índice AE e as subtempestades magnéticas, fenômeno relacionado à radiação. Também contém as principais características da radiação durante as subtempestades.
- Já o Capítulo 4 contém as características principais das tempestades magnéticas e da AKR durante as tempestades. Apresenta também as características do índice Dst, que é utilizado para monitoramento das perturbações magnéticas em baixas latitudes.
- O Capítulo 5 corresponde à metodologia empregada no trabalho. Nele é

explicado de forma sucinta como o índice AKR é calculado a partir dos espectrogramas. Contém também uma rápida revisão sobre correlações, que é usada para o estudo entre os parâmetros do vento solar e a atividade da AKR, medida através do índice AKR.

- No Capítulo 6 estão apresentados e discutidos os resultados obtidos no trabalho.
- O Capítulo 7 traz as conclusões obtidas com esse estudo.

## CAPÍTULO 2

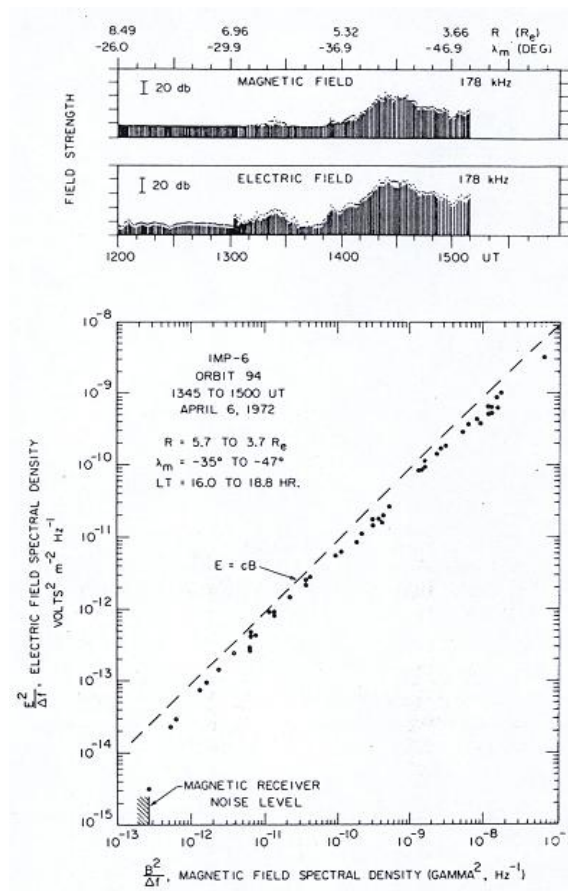
### RADIAÇÃO QUILOMÉTRICA AURORAL

Nas últimas décadas, medidas de rádio de baixa frequência mostraram que a magnetosfera da Terra é um emissor bastante intenso de ondas de rádio, tendo características muito semelhantes às de outras fontes astronômicas, como Saturno e Júpiter. A AKR despertou muita atenção pela possibilidade de se fazer medidas *in situ*, possibilitando assim uma melhor compreensão dos fenômenos que ocorrem não só na Terra, mas também nas outras fontes de rádio do sistema solar.

Apesar de ser a mais intensa, a AKR não é a única emissão de ondas da magnetosfera. Devido às várias regiões distintas, caracterizadas por condições particulares de campo magnético, temperatura de plasma, densidade de partículas etc, a magnetosfera terrestre possui várias outras emissões de ondas, tanto eletrostáticas quanto eletromagnéticas (ZARKA, 2004). Porém, a origem de todas elas é basicamente a interação do vento solar com o campo geomagnético.

A partir das primeiras medidas feitas por Benediktov *et al.* (1968) e Dunckel *et al.* (1970), foi descoberto que as emissões intensas de rádio no intervalo de frequência de algumas centenas de kHz ( $\approx 20 - 800$ ) estavam muito bem associadas a perturbações magnéticas nas regiões aurorais de altas latitudes. Dunckel *et al.* (1970) se referiram inicialmente a esse fenômeno como ruído de frequência demasiadamente alta (*high-pass noise*).

O primeiro trabalho abordando uma investigação sistemática do fenômeno consistiu no clássico artigo de Gurnett, publicado em 1974 (GURNETT, 1974). Naquele trabalho o autor já infere, a partir de dados experimentais, uma série de características da radiação. Foi mostrado que essas emissões de rádio estavam relacionadas com a ocorrência de arcos aurorais no lado noturno do planeta. A radiação foi facilmente identificada como eletromagnética pois, como mostra o segundo painel da figura 2.1 a seguir, existe um vínculo bastante evidente entre os campos elétrico e magnético associados a ela. Esse vínculo evidencia uma relação linear entre os campos muito próxima à relação obtida para ondas eletromagnéticas que se propagam no vácuo,  $\mathbf{E} = c\mathbf{B}$ . O primeiro painel da figura mostra de forma quantitativa o vínculo existente entre  $\mathbf{E}$  e  $\mathbf{B}$ .



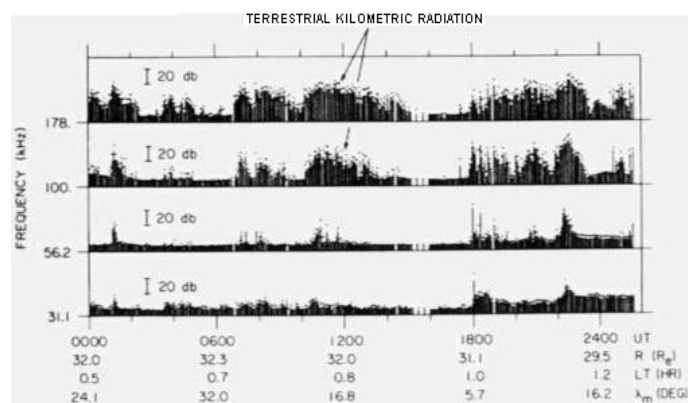
**FIGURA 2.1** - Medidas simultâneas das intensidade dos campos elétrico e magnético feitas pelo satélite IMP 6, mostrando que a AKR consiste de ondas eletromagnéticas. A linha tracejada mostra a relação entre  $\mathbf{E}$  e  $\mathbf{B}$  para uma onda eletromagnética no vácuo. FONTE: Gurnett (1974).

Desde a sua descoberta até a atualidade a AKR tem sido amplamente estudada, além de ter sido usada como parâmetro para estudos e previsões de outros fenômenos, tais como tempestades e subtempestades aurorais, por exemplo.

A AKR é uma consequência da interação entre o vento solar e a magnetosfera terrestre. Ocorre no intervalo de frequência entre aproximadamente 20-800 kHz e atinge picos de intensidade em aproximadamente 250 kHz (GREEN *et al.*, 1977). Recebeu o nome Radiação Quilométrica Auroral por possuir comprimento de onda da ordem de quilômetros e por estar relacionada a fenômenos aurorais. Raramente é observada no setor diurno do planeta, por estar relacionada com fortes acelerações de elétrons, que ocorrem principalmente no setor noturno.



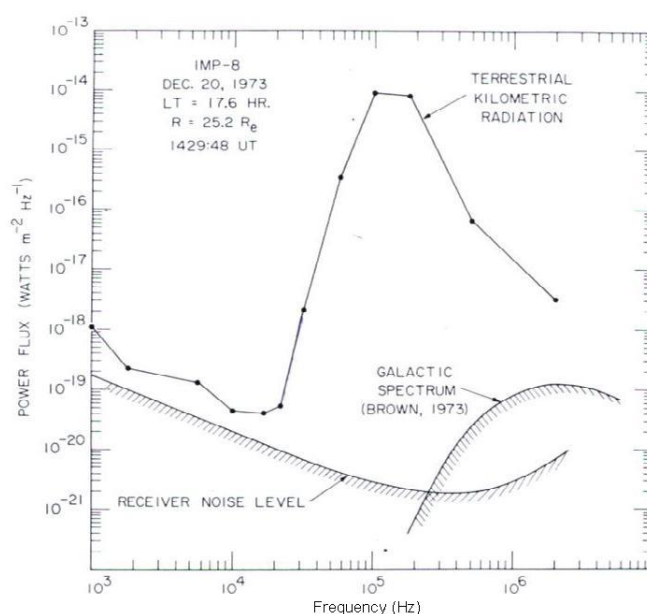
A radiação é emitida em intervalos distintos, sendo que cada emissão pode durar de aproximadamente meia hora até várias horas. Períodos de emissão completamente nula podem ocorrer entre duas rajadas consecutivas do fenômeno, às vezes durando por até 24 horas. Um exemplo de emissão da AKR observada pelo satélite IMP 6 está ilustrado na figura 2.2, que mostra a magnitude do campo elétrico nos canais de 178, 100, 56,2 e 31,1 kHz para o dia 14 de setembro de 1971. Esse satélite foi lançado em 14 de março de 1971 em uma órbita elíptica, possuindo um período de 4,18 dias, inclinação da órbita de 28,7° em relação à eclíptica, um apogeu de  $\approx 34$  raios terrestres e um perigeu de  $\approx 1,04$  raios terrestres (1 raio terrestre  $\approx 6370$  km). Nesse dia o satélite se encontrava próximo ao seu apogeu (cerca de 33,37 raios terrestres), na cauda magnética da magnetosfera. As barras verticais indicam a intensidade média do campo, enquanto o ponto acima de cada barra indica o valor máximo atingido pelo campo elétrico naquele intervalo.



**FIGURA 2.2** - Dados de campo elétrico do satélite IMP 6 para o dia 14 de setembro de 1971, mostrando vários períodos de intensa emissão de AKR nos canais de 100 e 178 kHz. FONTE: Gurnett (1974).

Um espectro de frequências típico de AKR é mostrado na figura 2.3. Esse espectro foi obtido pelo satélite IMP 8, a uma distância radial de cerca de 25,2 raios terrestres. Na figura ficam claras algumas características da AKR. O espectro atinge picos de intensidade no intervalo entre 100 e 300 kHz. Além disso, é fácil perceber que a intensidade da radiação decresce rapidamente para frequências abaixo de 100 kHz e para frequências acima de 300 kHz, se aproximando do nível de ruído cósmico para frequências próximas de 1 MHz.

Inicialmente, pensou-se que a AKR fosse gerada de forma contínua em todas as frequências. A estrutura fina da AKR permaneceu desconhecida até o lançamento de satélites equipados com receptores de banda larga, tais como o ISEE 1 e o Jikiken, os quais detectam sinais em uma banda de frequências contínua de vários kHz. Os satélites anteriores portavam receptores que operavam ou em multi canais, como os IMP's, ou com baixa resolução espectral, como o ISIS 1 (50 kHz). A radiação é constituída de uma série de emissões individuais, cuja largura espectral é da ordem de 1 kHz, ou até mesmo menor. A distância espectral entre componentes distintos da estrutura fina é, em geral, da ordem de 10 kHz. Vários estudos mostraram que as regiões geradoras da AKR não possuem uma estrutura suave, sendo compostas de muitas regiões de aumentos e rarefações na densidade. Essas variações são responsáveis pela emissão discreta da radiação (BENSON *et al.*, 1988).

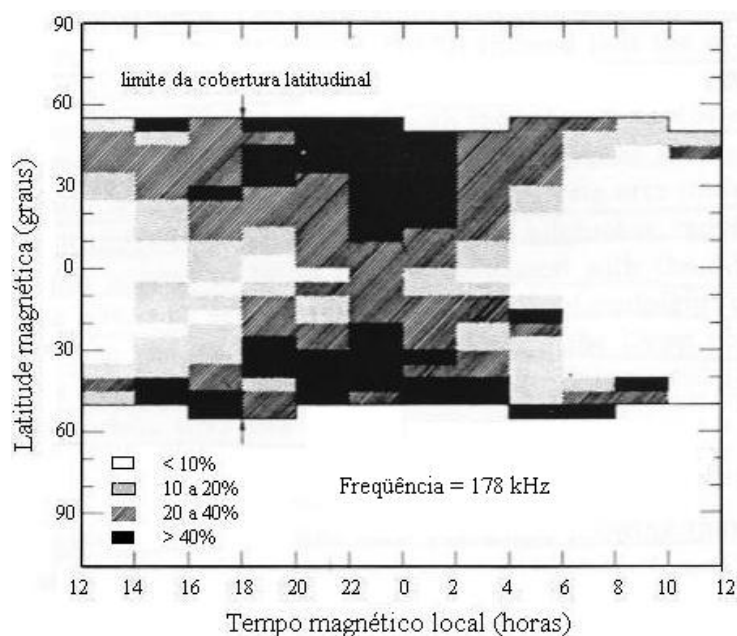


**FIGURA 2.3** - Espectro de potência da Radiação Quilométrica Auroral observado pelo satélite IMP 8 a uma distância radial de 25,2 raios terrestres, na parte noturna do planeta.  
 FONTE: Gurnett (1974).

A AKR é produzida pelos intensos fluxos de elétrons que causam as auroras e produzem as correntes responsáveis pelas perturbações magnéticas. Observações de satélites mostram que a AKR é gerada principalmente no modo extraordinário (modo R-X) e que as emissões geralmente ocorrem em regiões onde a frequência ciclotrônica

local ( $f_{ce}$ ) é maior que a frequência eletrônica de plasma ( $f_{pe}$ ) (WU; LEE, 1979). Em geral,  $\frac{f_{pe}}{f_{ce}} < 0,2 - 0,3$ . O bloqueio imposto pela ionosfera à radiação é devido ao aumento brusco na densidade eletrônica que ocorre na região, pois sendo a frequência eletrônica de plasma ( $f_{pe}$ ) proporcional à raiz quadrada da densidade eletrônica, a radiação será refletida quando sua frequência for igual ao valor local de  $f_{pe}$ .

De uma forma geral, a radiação se origina em altitudes relativamente baixas, provavelmente a distâncias radiais que não ultrapassam três raios terrestres. As fontes são mais comumente encontradas por volta de 22 MLT (hora magnética local) e 70° de latitude invariante (ERGUN *et al.*, 2000).

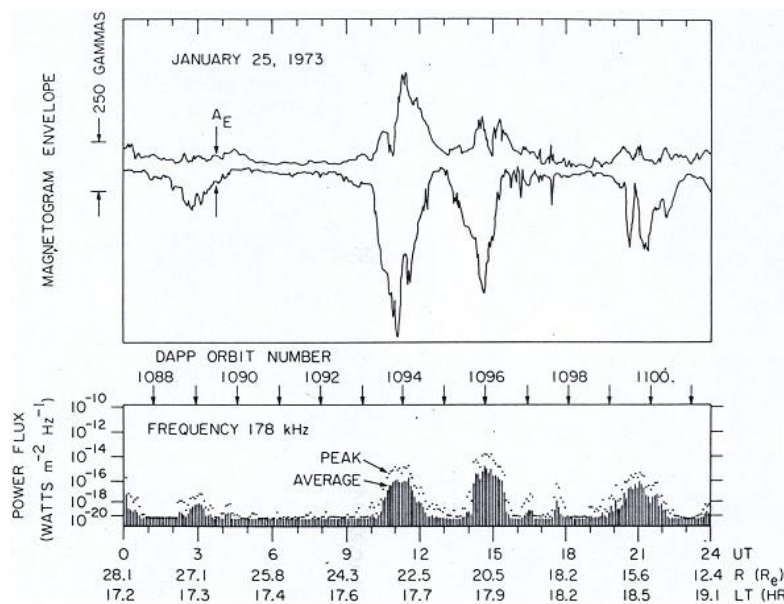


**FIGURA 2.4** - Porcentagem de ocorrência da AKR em 178 kHz, como função da latitude magnética e do tempo magnético local.  
 FONTE: Adaptado de Gurnett (1974).

No clássico estudo feito por Gurnett (1974), a distribuição angular da AKR foi abordada, usando-se como base dois anos de observações feitas pelo satélite IMP 6, localizado a distâncias superiores a 5 raios terrestres (evitando assim o corte imposto pela ionosfera à radiação). Os resultados foram apresentados em termos da frequência de eventos como função da latitude magnética e do tempo magnético local. Os resultados para a frequência de 178 kHz estão dispostos na figura 2.4 acima.

As áreas mais escuras representam maiores probabilidades de ocorrência da AKR, evidenciando maior incidência do evento durante a noite local, aproximadamente entre 18 e 4 horas (MLT). Do lado diurno, as ocorrências são restritas a latitudes maiores, de tal modo que a forma da distribuição angular em ambos os hemisférios é a de um cone apontado para o equador, centrado aproximadamente às 23 horas (MLT).

A ocorrência da AKR está muito bem relacionada com a ocorrência de arcos aurorais discretos, que provavelmente são gerados pela precipitação de intensas bandas de elétrons do tipo V-invertido (característica relativa à forma da função de distribuição, que pode ser vista na figura 4.4 na página 60). Essas bandas contêm feixes de elétrons energéticos, aproximadamente alinhados com as linhas de campo magnético, com energias de feixe  $E_f \approx 5-15$  keV e velocidade de feixe  $v_f \approx 0,1 - 0,2$  c (GRABBE, 1981). Essas bandas de elétrons que se precipitam constituem as fontes de energia livre para a AKR.



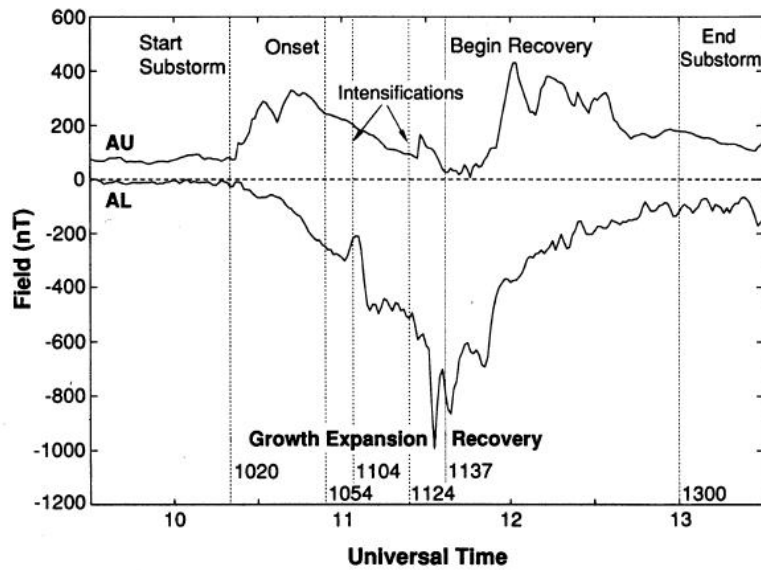
**FIGURA 2.5** - Fluxo de potência observado pelo satélite IMP 6 em 178 kHz e os correspondentes envelopes de magnetogramas obtidos por estações no solo para o dia 25 de janeiro de 1973

FONTE: Gurnett (1974).

Sabe-se que a AKR é uma manifestação da ocorrência de subtempestades magnéti-

cas. Essa característica também foi notada por Gurnett (1974), tendo sido usados dados obtidos simultaneamente pelos satélites IMP 6 e DAPP e por redes de magnetômetros distribuídos ao longo de latitudes polares. O resultado obtido a partir dos dados para o dia 25 de janeiro de 1973 está disposto na figura 2.5 acima. O painel superior mostra o fluxo de potência no canal de 178 kHz do IMP 6, enquanto o painel inferior mostra o envelope dos registros dos magnetogramas obtidos no solo. A largura do envelope representa o valor do índice do eletrojato auroral AE, usado como medidor da atividade de subtempestades magnetosféricas. Uma descrição mais detalhada desse índice se encontra na seção 3.1. Comparando-se qualitativamente os dois painéis percebe-se claramente que eventos de emissão intensa de AKR correspondem a altos valores de AE. Esses eventos ocorrem nos intervalos: 1000-1230 UT, 1330-1530 UT e 1950-2300 UT. Voots *et al.* (1977) mostraram uma profunda relação estatística entre o índice AE e a intensidade da AKR, sugerindo que a AKR poderia ser um bom indicador da ocorrência de subtempestades. Esse resultado foi confirmado por vários estudos posteriores. Liou *et al.* (2000) demonstraram que a AKR é um bom indicador do início de subtempestades, baseados em um estudo estatístico da relação entre perturbações aurorais e aumentos na intensidade da radiação. Não só a intensidade e o começo da AKR, mas também o intervalo de frequências em que a radiação ocorre seguem a evolução de uma subtempestade. Kaiser e Alexander (1977) mostraram que a banda de frequência da AKR aumenta à medida que a subtempestade passa da fase de crescimento (*growth phase*) para a fase de expansão (*expansion phase*). Morioka *et al.* (1981) demonstraram que o intervalo de frequência de detecção da AKR expande em direção a altos e baixos valores à medida que o índice AE aumenta. A figura 2.6 abaixo mostra o comportamento dos índices AU e AL durante as fases de uma subtempestade magnética.

A potência total estimada que é liberada pela AKR atinge picos da ordem de  $10^9$  W, sendo comparada com a máxima potência dissipada pela precipitação de partículas aurorais, da ordem de  $10^{11}$  W (GURNETT, 1974). Isso indica uma eficiência de conversão de energia da ordem de 1%. A potência liberada pela AKR é comparada à potência total liberada pela radiação decamétrica de Júpiter ( $\approx 3-30$  MHz), fazendo da mesma uma emissão extremamente intensa. Por essa razão, a blindagem proporcionada pela ionosfera é providencial, uma vez que uma fonte de rádio com uma potência equivalente a de uma grande usina hidroelétrica dirigida diretamente para a superfície terrestre comprometeria de forma drástica as comunicações no intervalo de frequências de rádio em todo o planeta (GAELZER, 1991).



**FIGURA 2.6** - Índices AU e AL para uma subtempestade típica bem estudada. As três fases dessa subtempestade (crescimento, expansão e recuperação) podem ser identificadas pelo comportamento dos índices. O horário correspondente ao início de cada fase é indicado pelas linhas verticais.  
 FONTE: Kivelson e Russel (1995).

Os espectros da AKR refletem as localizações de suas fontes. Nas linhas de campo aurorais a frequência de plasma decresce com a altitude (por exemplo,  $\approx 500$  kHz em  $1,5 R_T$  e  $\approx 200$  kHz em  $2 R_T$ ), onde  $R_T$  é o raio terrestre (KASABA; ANDERSON, 1997). Entretanto, não é tão simples inferir a altitude de geração, já que o espectro também reflete o caminho de propagação da radiação. Uma vez que a propagação da AKR pode ser bloqueada ou refratada na plasmasfera, a depender da frequência, o caminho de propagação para cada frequência é determinado pela altitude da fonte e pelo perfil de densidade na plasmasfera. Assim, o espectro observado também depende da localização do satélite.

Como tentativa de se entender e explicar o mecanismo da AKR, várias teorias já foram propostas na literatura (Benson (1975); Barbosa (1976); Galeev e Krasnoselkikh (1976); Melrose (1976); Palmadesso *et al.* (1976); Jones (1977a), Jones (1977b); Boswell (1978)). Os detalhes das teorias são completamente diferentes, mas as idéias de uma forma geral são similares. Existe um consenso entre todas elas de que, primeiro, a radiação deve ser de natureza induzida, ao invés de espontânea e natural. Segundo, os elétrons que se precipitam nas regiões aurorais são respon-

sáveis pela emissão. A principal discussão é em torno de como esses elétrons geram a AKR. Grande parte das teorias supracitadas predizem que a AKR é gerada no modo ordinário (modo O), o que está em desacordo com as observações. Além do mais, a maior parte dessas teorias requer um mecanismo de conversão entre modos de propagação que geralmente reduz a eficiência do processo de uma forma drástica, não podendo ser usadas em conformidade com a grande potência associada à radiação.

Dentre as várias teorias já propostas, a que melhor descreve a geração da AKR, sendo a mais bem aceita no meio científico, é a teoria conhecida como *maser de elétron-cíclotron*, formulada por Wu e Lee (1979). Nesse modelo, considera-se que os elétrons injetados da lâmina de plasma descem até a alta atmosfera com diferentes *pitch angles* (ângulos de arremesso, definido como o ângulo entre a velocidade de cada partícula e o campo magnético local). Por causa da convergência das linhas de campo magnético (efeito de espelho magnético), existe um cone de perdas  $\theta_{cp}$  dado por:

$$\left( \frac{B_{max} - B_{min}}{B_{max}} \right)^{\frac{1}{2}} = \cot \theta_{cp} \quad (2.1)$$

onde  $B_{max}$  e  $B_{min}$  são os valores máximos e mínimos de campo magnético encontrados pelas partículas injetadas. Elétrons com grandes ângulos de arremesso e, portanto, fora do cone de perdas, são refletidos e ascendem de volta para a magnetosfera, com distribuições do tipo cone de perdas. Esses elétrons possuem a seguinte desigualdade entre as velocidades paralela  $v_{\parallel}$  e perpendicular  $v_{\perp}$  ao campo magnético:

$$\frac{v_{\parallel}}{v_{\perp}} < \cot \theta_{cp} \quad (2.2)$$

Através de efeitos relativísticos, a energia livre das partículas com distribuições do tipo cone de perdas é absorvida pelas ondas eletromagnéticas, dando origem à AKR. Com esse modelo é possível prever a predominância das emissões do modo extraordinário.

Atualmente os satélites Akebono, Geotail e o IMAGE estão entre os principais monitoradores da magnetosfera terrestre no intervalo de frequências correspondente às emissões de AKR.

O satélite Akebono foi lançado em uma órbita polar em março de 1989, inicialmente com o nome EXOS-D, e desde então tem feito observações da ionosfera e da magnetosfera terrestre. O PWS (*Plasma Wave and Sounder Experiment*) a bordo deste satélite pode detectar campos elétricos no intervalo de frequências de 20 kHz a 5 MHz (SHIMBORI *et al.*, 2003).

Já o satélite Geotail foi lançado em uma órbita excêntrica na cauda da magnetosfera em julho de 1992. Desde o lançamento, tem detectado vários fenômenos de ondas de plasma na magnetosfera e, mais especificamente, na cauda magnetosférica. O PWI (*Plasma Wave Instrument*) a bordo deste satélite é capaz de detectar fenômenos eletromagnéticos no intervalo de frequência entre 5,62 Hz e 800 kHz para campos elétricos e no intervalo entre 5,62 Hz e 12,5 kHz para campos magnéticos. Quando o Geotail está próximo à região noturna da Terra, o *Plasma Wave Instrument* pode monitorar a atividade da AKR continuamente (MATSUMOTO *et al.*, 1994).

Por fim, o IMAGE (*Imager for Magnetopause-to-Aurora Global Exploration*) foi lançado em uma órbita polar em março de 2000 com os objetivos de identificar os mecanismos dominantes para a injeção de plasma na magnetosfera, determinar as respostas da magnetosfera às mudanças do vento solar e descobrir como e onde os plasmas magnetosféricos são energizados, transportados e perdidos durante tempestades e subtempestades magnéticas. O instrumento RPI (*Radio Plasma Imager*) a bordo do IMAGE é um radar de baixa potência que atua no intervalo de frequências entre 3 kHz e 3 MHz e tem como objetivo caracterizar o plasma na magnetosfera terrestre utilizando imageamento no intervalo de frequências de rádio (CARPENTER *et al.*, 2003).

## 2.1 Ondas Eletromagnéticas do Modo-O (Ordinário) e do Modo-X (Extraordinário)

Uma grande variedade de ondas eletromagnéticas pode ser gerada em um plasma, dependendo da existência ou não de um campo magnético externo. Vamos considerar aqui a propagação de ondas na presença de um campo magnético, com a onda se propagando perpendicularmente a esse campo ( $\mathbf{k} \perp \mathbf{B}$ , chamadas ondas perpendi-



culares), onde  $k$  é o vetor de onda. De acordo com a orientação do campo elétrico da onda em relação ao campo magnético externo, a onda pode ser classificada como extraordinária ou ordinária.

Ondas eletromagnéticas do tipo ordinário são aquelas em que o campo elétrico é paralelo ao campo magnético externo,  $\mathbf{E}_o \parallel \mathbf{B}$  (BITTENCOURT, 1995). A relação de dispersão para esse tipo de onda é dada por:

$$\omega^2 = \omega_p^2 + c^2 k^2 \quad (2.3)$$

onde  $\omega$  é a frequência angular da onda,  $\omega_p$  é a frequência de plasma local e  $c$  é a velocidade da luz no vácuo.

Já se sabe que a AKR é gerada principalmente no modo extraordinário. Ondas desse tipo possuem seu campo elétrico perpendicular ao campo magnético externo,  $\mathbf{E}_o \perp \mathbf{B}$ . Porém, ondas com  $\mathbf{E}_o \perp \mathbf{B}$  tendem a ser polarizadas elipticamente, tornando sua relação de dispersão muito mais complicada, dada pela equação:

$$\frac{c^2 k^2}{\omega^2} = 1 - \frac{\omega_p^2 \omega^2 - \omega_p^2}{\omega^2 \omega^2 - \omega_h^2} \quad (2.4)$$

onde  $\omega_h$  é a frequência híbrida superior. Ondas eletrostáticas eletrônicas que se propagam perpendicularmente a  $\mathbf{B}$  têm essa frequência ( $\omega_h$ ), enquanto as ondas que se propagam ao longo de  $\mathbf{B}$  são as oscilações normais de plasma com  $\omega = \omega_p$  (CHEN, 1984).

A relação de dispersão para as ondas extraordinárias é bastante complicada. Para analisar seu significado, costuma-se definir os termos corte e ressonância. O índice de refração em um meio qualquer é dado por:

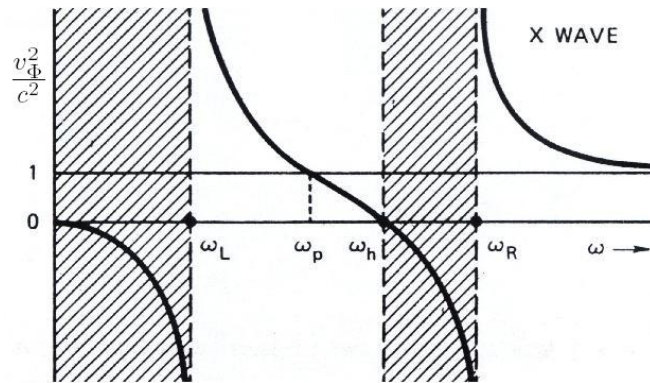
$$n = \frac{c}{v} = \frac{c}{\lambda f} = \frac{c}{\lambda \frac{\omega}{2\pi}} = \frac{ck}{\omega} \quad (2.5)$$

Um corte ocorre em um plasma quando o índice de refração vai a zero, ou seja, quando o comprimento de onda se torna infinito. A ressonância ocorre quando o índice de refração se torna infinito, ou seja, quando o comprimento de onda vai a zero. À medida que uma onda se propaga através de uma região onde  $\omega_c = \frac{qB}{m}$  (frequência ciclotrônica local) e  $\omega_p$  mudam constantemente, ela pode estar sujeita a regiões de cortes e regiões de ressonâncias. Uma onda é geralmente refletida em uma região de corte e absorvida em uma região de ressonância.

A ressonância de ondas extraordinárias é encontrada fazendo-se  $k \rightarrow \infty$  na equação 2.4. Para um  $\omega$  qualquer,  $k \rightarrow \infty$  implica em  $\omega \rightarrow \omega_h$  e, assim, a ressonância ocorre em um ponto do plasma onde:

$$\omega_h^2 = \omega_p^2 + \omega_c^2 = \omega^2 \quad (2.6)$$

Essa equação é justamente a relação de dispersão para ondas eletrostáticas se propagando perpendicularmente a  $\mathbf{B}$ . À medida que uma onda com uma dada frequência  $\omega$  se aproxima de um ponto de ressonância, ambas as velocidades de fase ( $v_\Phi = \frac{\omega}{k}$ ) e de grupo ( $v_g = \frac{d\omega}{dk}$ ) tendem a zero. Uma onda extraordinária é parcialmente eletromagnética e parcialmente eletrostática. Quando ocorre ressonância, a onda perde completamente suas características eletromagnéticas e se torna uma oscilação eletrostática.



**FIGURA 2.7** - A dispersão de ondas extraordinárias, analisada a partir do comportamento da velocidade de fase e da frequência. Não existe propagação nas áreas sombreadas.  
 FONTE: Chen (1984).

Já o corte para uma onda extraordinária é obtido fazendo-se  $k \rightarrow 0$  na equação 2.4. A equação que descreve a frequência de corte em função de  $\omega_c$  e  $\omega_p$  é dada por:

$$\omega^2 \mp \omega\omega_c - \omega_p^2 = 0 \quad (2.7)$$

Cada um dos dois sinais gera uma frequência de corte diferente, chamadas  $\omega_R$  e  $\omega_L$ . Essas frequências são as raízes da equação 2.7, sendo dadas por:

$$\begin{aligned} \omega_R &= \frac{1}{2}[\omega_c + (\omega_c^2 + 4\omega_p^2)^{\frac{1}{2}}] \\ \omega_L &= \frac{1}{2}[-\omega_c + (\omega_c^2 + 4\omega_p^2)^{\frac{1}{2}}] \end{aligned} \quad (2.8)$$

As ondas polarizadas circularmente à direita (O), com o sinal negativo na equação 2.7, possuem a frequência de corte superior  $\omega_R$ , dada pela equação 2.8. As ondas polarizadas circularmente à esquerda, com sinal positivo na equação 2.7 possuem a frequência de corte inferior  $\omega_L$ .

As frequências de corte e de ressonância dividem o diagrama de dispersão em regiões de propagação e não-propagação. Ao invés do usual diagrama  $\omega$ - $k$ , é mais esclarecedor plotar a razão entre a velocidade de fase ( $\frac{\omega}{k}$ ) e  $c$  (a velocidade da luz) *versus* a frequência  $\omega$ . Esse diagrama está mostrado na figura 2.7 na página 42. Para interpretá-lo, supomos  $\omega_c$  constante e uma onda com uma frequência fixa  $\omega$  sendo injetada no plasma. À medida que a onda encontra regiões de maiores densidades, as frequências  $\omega_L$ ,  $\omega_R$ ,  $\omega_p$  e  $\omega_h$  todas aumentam. Isso é equivalente a considerar a densidade fixa e a frequência  $\omega$  sendo diminuída. Considerando-se esse último ponto de vista, percebe-se que para grandes valores de  $\omega$  a velocidade de fase se aproxima de velocidade da luz. À medida que a onda viaja, sua velocidade de fase aumenta até que a frequência de corte superior ( $\omega_R$ ) é atingida. Nesse ponto  $v_\Phi$  se torna infinita. Na camada entre  $\omega = \omega_R$  e  $\omega = \omega_h$ ,  $\frac{\omega^2}{k^2}$  é negativo, tornando a propagação impossível. Em  $\omega = \omega_h$  existe uma ressonância e a velocidade de fase vai a zero. Entre  $\omega = \omega_h$  e  $\omega = \omega_L$  a propagação é possível novamente, sendo que nessa região a onda se propaga com velocidades de fase maiores e menores que  $c$ , dependendo se  $\omega$  for menor ou maior que  $\omega_p$ . A partir da equação 2.4 da página 41, é fácil perceber

que se  $\omega = \omega_p$ , a onda se propaga à velocidade da luz. Isso também é facilmente observado na figura 2.7. Para frequências menores que  $\omega_L$ , existe uma outra região de propagação impossível, com  $\frac{\omega^2}{k^2} < 0$ .

## CAPÍTULO 3

### RADIAÇÃO QUILOMÉTRICA AURORAL E SUBTEMPESTADES AURORAIS

Estudos recentes mostram que existe uma boa associação temporal entre subtempestades magnéticas e o aumento e até mesmo o começo de emissão da AKR. Além disso, esses estudos mostram que o índice geomagnético AE e as emissões de AKR estão profundamente ligados (KAISER; ALEXANDER, 1977).

#### 3.1 Subtempestades Magnéticas e o índice AE

Subtempestades magnéticas são o tipo mais freqüente de atividade geomagnética, sendo constituídas pelos distúrbios que ocorrem na magnetosfera e na ionosfera quando o campo magnético interplanetário é dirigido para o sul (com relação aos sistemas de coordenadas GSM ou GSE), aumentando assim o fluxo de energia que é transportado do vento solar para o interior da magnetosfera (AKASOFU; CHAPMAN, 1972). Se o campo magnético interplanetário permanecer voltado para o sul por um longo tempo, uma tempestade magnética pode se desenvolver.

As subtempestades são processos dissipativos da energia magnetosférica que é armazenada através da interação com o vento solar, causando várias perturbações na região auroral, tais como o surgimento de auroras e o aumento da densidade de corrente do eletrojato auroral, através do acoplamento que ocorre entre a ionosfera e a magnetosfera (STRANGEWAY *et al.*, 2001). Ocorrem com maior freqüência nas regiões dos ovais aurorais, que são duas regiões de formato oval centradas nos pólos sul e norte magnéticos.

Vários acontecimentos precedem a fase de expansão de uma subtempestade magnética, podendo ser usados como indicadores do desenvolvimento do fenômeno. Dentre os acontecimentos pode-se destacar o aumento da probabilidade de intensificações fracas e de curta duração nas auroras e no eletrojato, acompanhado de explosões de ondas ULF, chamadas *Pi-2 burts*. Uma outra característica que geralmente ocorre antes da fase de expansão é um aumento gradual no tamanho dos ovais aurorais. Esses fenômenos caracterizam a fase de crescimento de uma subtempestade. Durante a fase de crescimento a energia extraída do vento solar é armazenada na magnetosfera. A fase de expansão corresponde à liberação ou recarregamento da energia armazenada, enquanto a fase de recuperação é o retorno da magnetosfera às suas

condições normais (KIVELSON; RUSSEL, 1995). Subtempestades típicas têm em média duração entre 1-3 horas e amplitudes de perturbação da ordem de 200-2000 nT (nano Tesla), sendo caracterizadas pelo índice de atividade auroral AE (*Auroral Electrojet*).

O índice AE foi introduzido por Davis e Sugiura (1966), com o intuito de caracterizar a influência do eletrojato auroral nas variações no campo magnético terrestre nas regiões polares (altas latitudes). Para a sua obtenção é usada uma rede de estações relativamente próximas aos pólos, como uma tentativa de excluir assim a perturbação produzida pela corrente de anel, que circunda a Terra em latitudes equatoriais. Apenas a componente horizontal (H) do campo magnético é usada para sua construção. A média dos dias não perturbados é usada como uma base de referência. A componente H de cada observatório é registrada em intervalos regulares de tempo, sendo plotadas as máximas variações  $\Delta H$  de todos os observatórios em forma de magnetogramas. Os resultados são dois envelopes distintos de valores. O envelope superior representa as máximas variações positivas e o envelope inferior representa as máximas variações negativas de  $\Delta H$  para todos os observatórios da rede em um dado instante. O índice AU (*Auroral Upper*) é definido em qualquer instante de tempo como a máxima perturbação positiva registrada por qualquer estação da rede. De forma similar, o índice AL (*Auroral Lower*) é dado pela máxima perturbação negativa registrada. Finalmente, o índice AE é uma medida única das perturbações, sendo definido como  $AE = AU - AL$  (ROSTOKER, 1972). Por fim, ainda existe o índice AO, que é definido como a média entre AU e AL:  $AO = (AU + AL)/2$ . A figura 2.6, da página 38, apresenta a variação temporal dos índices AU e AL ao longo de uma subtempestade auroral.

De uma forma geral, a emissão de AKR e o índice AE são melhor correlacionados no hemisfério entre 1500-0300 MLT que no hemisfério 0300-1500 MLT (KAISER; ALEXANDER, 1977). Quando as observações são feitas entre 1500-0300 horas, mesmo pequenas mudanças em AE são refletidas na intensidade da emissão de AKR. Mas quando as medidas são feitas no hemisfério oposto apenas grandes variações em AE são realmente capazes de influenciar a emissão de AKR. Esse resultado é mais um indicador de que a AKR é gerada por elétrons que se precipitam sofrendo aceleração ao longo do campo magnético, pois a precipitação é muito maior no lado noturno do planeta. O índice AE responde não somente à atividade de subtempestades, mas também a aumentos na pressão dinâmica do vento solar (MURATA *et al.*, ).

### 3.2 Radiação Quilométrica Auroral Durante Subtempestades Magnéticas

Com base em um estudo feito sobre 136 subtempestades isoladas, que foram identificadas com imagens aurorais globais do imageador ultravioleta polar (UVI), Liou *et al.* (2000) apresentaram como principais resultados os seguintes pontos:

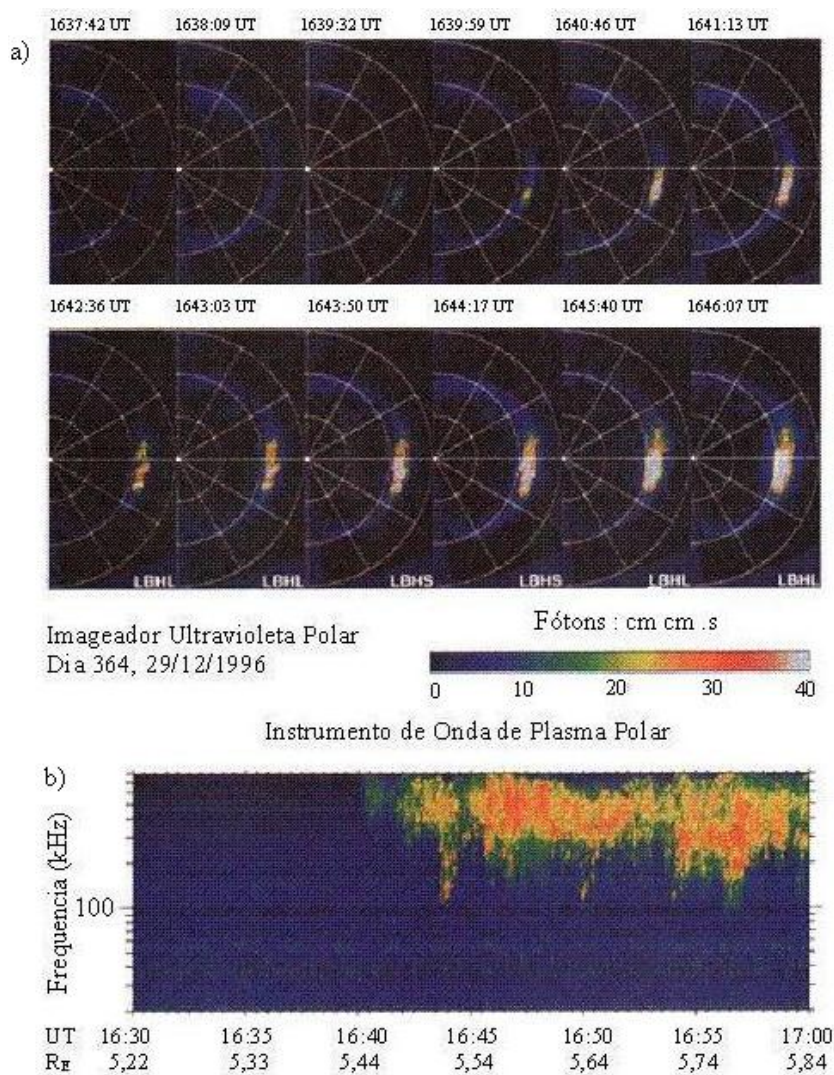
- 1) Em 70% (83%) dos eventos estudados, os aumentos na emissão da AKR foram detectados dentro de  $\pm 1$  (2) minutos do início de subtempestades magnéticas;
- 2) o começo da AKR tende a ocorrer, em média, com um pequeno atraso de 0,36 minutos (21 segundos) em relação ao começo das subtempestades;
- 3) a frequência média para o aumento da emissão de AKR em inícios de subtempestades é de aproximadamente 300 kHz, correspondendo a um limite superior da altitude da fonte de cerca de 4700 km;
- 4) a AKR se expande para todas as frequências características poucos minutos após o início da subtempestade, correspondendo a uma maior altitude da fonte de  $\approx 2100$ -12000 km.

Assim sendo, existe uma boa correlação temporal entre a ocorrência e aumento da radiação e o início das subtempestades. Portanto, se o satélite estiver adequadamente localizado, o aumento na emissão da AKR pode ser usado como um bom indicador do início de subtempestades. Pode até mesmo ser usado para a previsão desses fenômenos, com aproximadamente  $\frac{1}{2}$  minuto de antecedência, especialmente se forem observadas outras características de começo de subtempestades simultaneamente com o aumento na emissão de ondas de rádio aurorais.

É importante o estudo das frequências típicas da AKR durante e após subtempestades aurorais, pois o conhecimento desse intervalo de frequências pode ser usado para se inferir a altitude da fonte. Além disso, o conhecimento da frequência da AKR durante a fase inicial de subtempestades pode ser usado para se determinar onde a aceleração de partículas aurorais se inicia (LIOU *et al.*, 2000).

A figura 3.1 (a) a seguir mostra uma seqüência de imagens aurorais obtidas pelo Imageador Ultravioleta Polar (UVI) para um período de subtempestade moderada,

entre 1637:42 UT a 1646:07 UT do dia 29 de dezembro de 1996. Linhas de latitudes magnéticas de 60°, 70° e 80° são mostradas. A seqüência de imagens apresenta apenas a parte noturna da região auroral norte, com o amanhecer acima e a meia noite à direita de cada quadro.



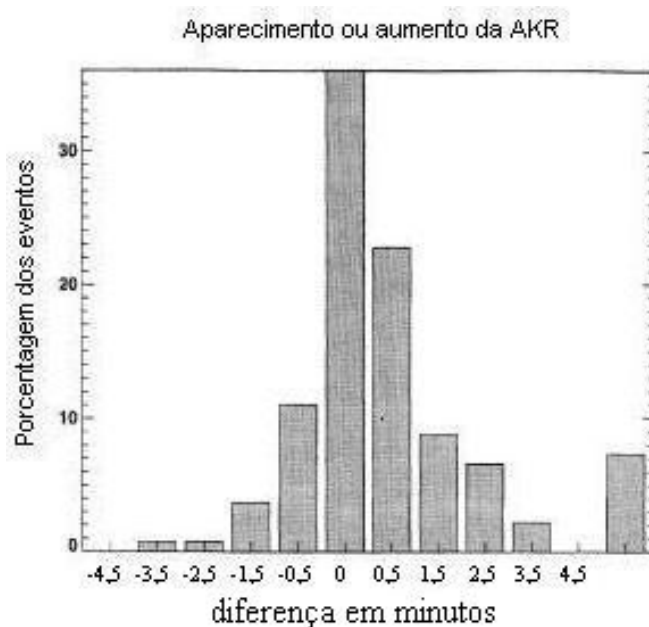
**FIGURA 3.1** - a) Sequência de imagens para um período de subtempestade moderada em 29 de dezembro de 1996, obtidas pelo UVI. b) Espectro temporal de ondas de plasma, obtido pelo PWI para a mesma data.

FONTE: adaptada de Liou *et al.* (2000).



Na figura 3.1 (b) pode-se notar a ocorrência ou não da AKR através do espectro temporal de ondas de plasma, obtido pelo Instrumento de Onda de Plasma (PWI), a bordo do satélite Geotail. Neste evento, uma subtempestade teve início às 1638:51 UT, em 68° de latitude magnética, como indicado por um brilho auroral repentino no terceiro quadro da figura 3.1 (a) . O Instrumento de Onda de Plasma não capta nenhuma atividade de onda no intervalo de frequência da AKR antes do começo da subtempestade, indicando um comportamento magnetosférico/ionosférico bastante calmo. Um fraco sinal de AKR passa a ser observado em aproximadamente 1640:25 UT, cerca de um minuto e meio após o início da subtempestade, seguido por um aumento na intensidade da emissão e também no intervalo de frequências de ocorrência.

A figura 3.2 a seguir apresenta um histograma contendo a diferença temporal entre o início de subtempestades e o aumento da AKR. Os valores positivos correspondem aos aumentos da radiação ocorridos após o início da atividade auroral (AKR atrasada), enquanto os negativos correspondem a aumentos ocorridos antes do início da atividade auroral (AKR adiantada).



**FIGURA 3.2** - Diferença temporal entre o início de subtempestades aurais e o aumento da AKR para 136 eventos isolados.  
 FONTE: Adaptada de Liou *et al.* (2000).

A distribuição é aproximadamente simétrica, com um pico em diferença temporal nula. Em 36% dos eventos (49 eventos), o aumento da AKR ocorreu simultaneamente com o início de uma subtempestade. Em 70% dos eventos (95 eventos), os aumentos da AKR ocorreram dentro de aproximadamente  $\pm 1$  minuto. Em aproximadamente 7% dos eventos (10 eventos), não foi detectado aumento nas emissões de AKR. A porcentagem de eventos com aumento da radiação atrasada é um pouco maior, sendo que a diferença de tempo média é de aproximadamente 21 segundos (LIOU *et al.*, 2000). Esses resultados observacionais, que são estatisticamente significativos, mostram uma boa correlação temporal entre emissões do tipo AKR e as subtempestades aurorais.

Em poucos eventos não existiu emissão no intervalo espectral da AKR, sendo que nesses eventos o satélite estava localizado ou no setor do amanhecer ou em latitudes muito baixas. A AKR é raramente observada no setor do amanhecer porque está associada com a aceleração de elétrons energéticos, que ocorre principalmente no setor da meia-noite.

O pequeno atraso no aparecimento ou no aumento da AKR em relação ao início das subtempestades pode ser porque a radiação produzida nesse período é muito fraca para ser detectada pelo PWI. Por outro lado, pode ser que os elétrons que se precipitam dando início às subtempestades sejam elétrons altamente energéticos vindos diretamente da lâmina de plasma, não estando assim sujeitos a aceleração nas regiões de diferenças de potencial paralelas ao campo magnético, que são regiões fontes da AKR (LIOU *et al.*, 2000). Uma terceira alternativa seria associar o atraso ao tempo finito de propagação da radiação. Dentre as três tentativas de se explicar o atraso, a mais promissora é a segunda, pois os potenciais elétricos alinhados ao campo magnético costumam não ser formados em casos onde uma tempestade magnética se desenvolve, como será visto no capítulo seguinte.

Durante os períodos de subtempestades, a frequência de onda da AKR varia de pouco mais de 20 kHz até mais de 800 kHz. Na fase inicial da subtempestade a AKR é geralmente produzida aproximadamente no estreito intervalo entre 200-400 kHz. Posteriormente, dentro de alguns minutos, a intensidade da radiação aumenta e o intervalo espectral de ocorrência se expande consideravelmente (KAISER; ALEXANDER, 1977), cobrindo todas as frequências características do fenômeno. Essa expansão acontece, de forma geral, muito mais rapidamente que a fase de expansão de subtempestades típicas. As frequências médias após a expansão ficam entre aproxi-

madamente 60 e 650 kHz. Porém, o mecanismo controlador do intervalo de frequências da AKR durante subtempestades ainda não é muito bem conhecido, merecendo estudos mais detalhados.



## CAPÍTULO 4

### RADIAÇÃO QUILOMÉTRICA AURORAL E TEMPESTADES MAGNÉTICAS

Como já foi dito, a emissão de AKR é intensificada durante subtempestades aurorais e apresenta uma boa correlação com o índice auroral AE. Porém, durante algumas tempestades magnéticas o comportamento da emissão de AKR é completamente diferente, chegando a ser até mesmo surpreendente.

#### 4.1 Tempestades Magnéticas

O estudo das tempestades magnéticas é importante por duas causas principais. Uma se refere ao seu aspecto acadêmico, por ser considerada uma parte central da geofísica. A outra envolve aspectos práticos, que em muitos casos podem ser de profundo interesse para a humanidade.

O Sol lança grandes quantidades de matéria no espaço interplanetário, o chamado vento solar. Durante períodos de atividade solar intensa, esse vento solar tem a sua velocidade e a sua densidade aumentadas, podendo atingir a Terra com velocidades médias extremamente elevadas, da ordem de até 700 km/s (GONZALEZ *et al.*, 1994). Em geral, a velocidade média do vento solar a 1 U.A. do Sol (posição correspondente à órbita da Terra) é por volta de 400 km/s.

As tempestades magnéticas são causadas pela chegada das perturbações do vento solar que aumentam em larga escala os campos elétricos no meio interplanetário. A causa primária dessas tempestades está associada a estruturas interplanetárias com campos magnéticos intensos, direcionados para o sul (aproximadamente anti-paralelos ao campo magnético da magnetopausa) e de longa duração, que se interconectam com o campo magnético da Terra e permitem que a energia do vento solar seja transportada para o interior da magnetosfera terrestre. Esse processo é conhecido como reconexão magnética (GONZALEZ *et al.*, 1999).

Durante uma tempestade são injetadas partículas provenientes do vento solar na magnetosfera interna. Essas partículas derivam ao redor da Terra, sendo que os prótons derivam para oeste e os elétrons para leste. Essas derivas são causadas por gradientes e curvaturas do campo geomagnético. As partículas injetadas enriquecem a chamada corrente de anel, um sistema de correntes de leste para oeste que circula a

Terra em latitudes equatoriais, diminuindo o valor da componente H (horizontal) do campo magnético terrestre na superfície de praticamente todo o planeta. Além disso, as tempestades são caracterizadas pela aceleração e termalização de partículas da lâmina de plasma e da corrente de anel, provocando ainda os fenômenos conhecidos como auroras (MORIOKA *et al.*, 2003). O estudo das diferenças nas características da AKR entre tempestades e subtempestades magnéticas pode desempenhar um papel chave para a compreensão da dinâmica de tempestades e também de subtempestades durante tempestades magnéticas.

Tempestades típicas são constituídas de três fases bem definidas, classificadas de acordo com o índice Dst.

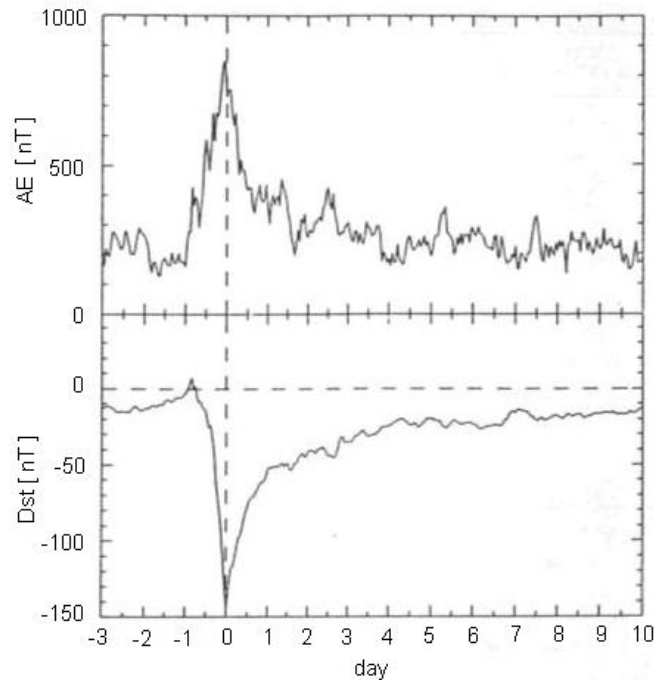
#### 4.1.1 O Índice Dst e as Fases das Tempestades

Há muito tempo já se sabe que a componente H do campo magnético terrestre sofre decréscimos durante períodos de intensa atividade magnética, recuperando seus valores médios de uma forma gradual e suave. Esse declínio na componente H caracteriza uma tempestade magnética, que em geral começa quando o acoplamento entre o vento solar e a magnetosfera se torna forte e prolongado o suficiente, tornando intensa a atividade magnética.

O desenvolvimento de uma tempestade é monitorado pelo comportamento do índice Dst. Esse índice é definido como a média instantânea mundial da perturbação da componente H no solo na região equatorial, sendo dado em nT (nano Tesla) e servindo como indicador da atividade magnetosférica em escala global (AKASOFU; CHAPMAN, 1972). Decréscimos no campo magnético da Terra são caracterizados por valores negativos de Dst, enquanto as variações positivas no índice são geralmente associadas a compressões da magnetosfera, causadas por aumentos da pressão dinâmica exercida pelo vento solar, aumentando o campo magnético terrestre.

A principal característica do início de uma tempestade é, em geral, um aumento súbito na componente H do campo terrestre, causado pelo aumento da pressão exercida pelo vento solar sobre a magnetosfera. Esse aumento de pressão eleva as correntes na magnetopausa, produzindo perturbações positivas em H na superfície da Terra. Caracterizado por valores positivos de Dst, esse começo é chamado de fase inicial da tempestade, podendo perdurar por algumas horas. Essa fase é seguida pela fase principal, caracterizada por um decréscimo rápido e às vezes altamente perturbado

da componente H e, conseqüentemente, de Dst. Esse decréscimo é causado pelo aumento da injeção de partículas na corrente de anel. O aumento na corrente de anel ocorre até um valor assintótico, onde a taxa de injeção e a taxa de perdas de partículas se tornam equivalentes. À medida que o campo magnético interplanetário se torna mais fraco, ou inverte sua polaridade para o norte, a injeção de partículas na magnetosfera diminui. O crescimento da corrente de anel cessa e as perturbações começam a diminuir. Tem início assim a fase de recuperação da tempestade, onde os valores da componente H e de Dst retornam lentamente aos seus valores habituais (KIVELSON; RUSSEL, 1995).



**FIGURA 4.1** - Relação entre os índices AE e Dst obtida através da superposição de 15 tempestades magnéticas entre 1990 e 1993.

FONTE: Morioka *et al.* (2003).

A figura 4.1 acima mostra a grande correlação existente entre os índices AE e Dst durante tempestades magnéticas. Esse resultado foi obtido por Morioka *et al.* (2003), através de análises de superposição para 15 tempestades ocorridas entre 1990 e 1993. À medida que a tempestade se desenvolve, o índice AE aumenta na fase principal e diminui na fase de recuperação. Assim, a AKR deveria seguir o comportamento de

AE. Porém, como será visto na seção 4.2, isso nem sempre acontece.

O intervalo de valores observável do índice Dst é aproximadamente entre +100 nT e -600 nT. As condições de um período calmo (não perturbado) são representadas por um valor do índice Dst igual a 0, mas, em geral, isso não é corriqueiro. A média dos valores do índice para dias calmos geralmente é negativa, indicando que uma corrente de anel aumentada (caracterizada por valores negativos de Dst) é normal, e não necessariamente representa a existência de uma tempestade magnética. Em geral, tempestades com valores de Dst entre -30 e -50 nT são classificadas como fracas, enquanto tempestades onde  $-100 \text{ nT} < \text{Dst} < -50 \text{ nT}$  são chamadas de moderadas. Por fim, se o pico de Dst for igual ou inferior a -100 nT, a tempestade é classificada como forte ou severa (GONZALEZ *et al.*, 1994).

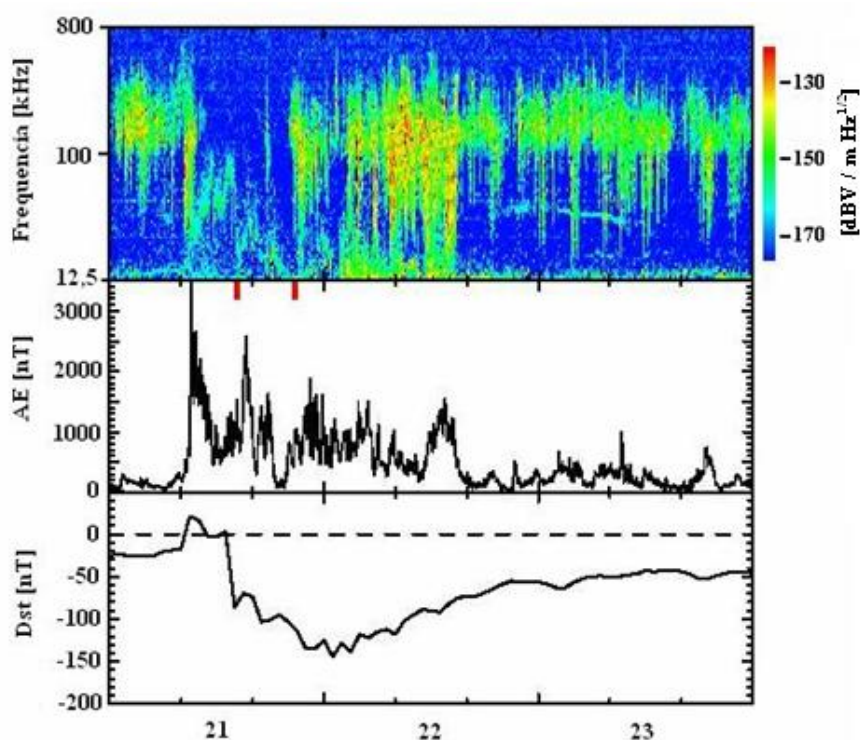
## 4.2 AKR Durante Tempestades Magnéticas

À medida que uma tempestade magnética evolui, o índice AE aumenta durante sua fase principal e diminui na fase de recuperação, como pode ser visto na figura 4.1. Desse modo, esperar-se-ia que a emissão de AKR também apresentasse aumento e decréscimo durante a evolução da tempestade. Porém, a emissão de AKR apresenta uma característica inesperada durante algumas tempestades magnéticas, chegando a desaparecer claramente nas fases inicial e principal e reaparecendo na fase de recuperação (MORIOKA *et al.*, 2003). Esse comportamento chega a ser surpreendente, já que ocorrem violentas precipitações de partículas na fase inicial de uma tempestade magnética.

A Figura 4.2 a seguir apresenta o espectro dinâmico da AKR para os dias 21, 22 e 23 de fevereiro de 1994, detectado pelo satélite Geotail, juntamente com os índices AE e Dst. Durante esse período o satélite estava no espaço interplanetário, a cerca de 67 raios terrestres do planeta e na região do anoitecer da magnetosfera. Uma tempestade magnética teve início às 0901 UT no dia 21 de fevereiro. O valor mínimo do índice DST foi atingido aproximadamente às 0200 UT do dia 22. Essa tempestade foi causada por um choque interplanetário bastante intenso e um evento de CME (*Coronal Mass Ejection*), acompanhados por uma alta densidade de plasma no meio interplanetário de até 100 partículas por  $\text{cm}^3$ . O espectro mostra que havia emissão de AKR antes do início da tempestade, e que essa foi completamente extinta com o início da atividade magnética, entre aproximadamente 1000 UT e 2000 UT no dia 21. À medida que a tempestade passou pelo valor mínimo de DST e entrou na fase



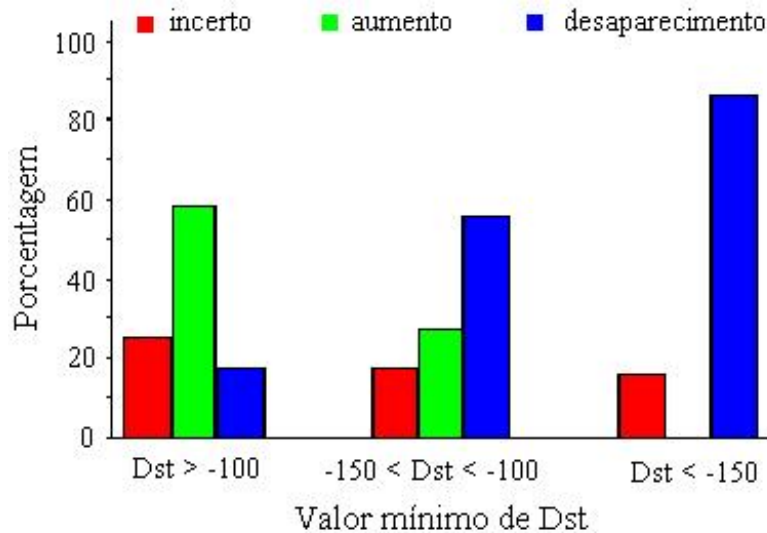
de recuperação, a AKR voltou a ser observada, sendo que as potências mais intensas foram observadas em um vasto intervalo de frequências, aproximadamente entre 2000 UT do dia 21 e 1400 UT do dia 22. Observações feitas com o satélite Akebono apresentam resultados semelhantes, mostrando que, em geral, a AKR desaparece nas fases inicial e principal de algumas tempestades magnéticas (MORIOKA *et al.*, 2003).



**FIGURA 4.2** - Desaparecimento da AKR observada com o satélite Geotail para o período de 21 a 23 de fevereiro de 1994. O painel superior mostra o espectro no intervalo de frequência de 12,5 a 800 kHz, o do meio o índice AE e o inferior o índice Dst.  
FONTE: Adaptado de Morioka *et al.* (2003).

Em um estudo feito por Morioka *et al.* (2003), a probabilidade de desaparecimento da AKR durante tempestades magnéticas foi investigada em relação à magnitude das tempestades. Foram selecionadas 37 tempestades do último ciclo solar, com dados fornecidos pelo satélite Akebono. Essas tempestades foram divididas em três grupos distintos: 12 tempestades com valor mínimo de Dst maior que -100 nT; 18 tempestades com  $-150 < \text{Dst} < -100$  e por fim 7 tempestades com picos de Dst

menor que -150 nT. A emissão de AKR foi dividida em: desaparecimento entre a fase inicial e principal; aumento durante o período de tempestade e radiação com características indeterminadas.



**FIGURA 4.3** - Probabilidade de desaparecimento da AKR em função da magnitude do índice Dst .  
 FONTE: Adaptado de Morioka *et al.* (2003).

A partir do gráfico da figura 4.3 acima, percebe-se que, em geral, a emissão de AKR é aumentada durante tempestades magnéticas mais fracas. Por outro lado, à medida que a magnitude da tempestade aumenta, a frequência de desaparecimento da AKR também aumenta. Esses resultados indicam que as perturbações na região auroral durante tempestades magnéticas devem ser diferentes das perturbações que ocorrem durante subtempestades magnéticas.

Em um estudo mais recente, Seki *et al.* (2005) mostraram que os elétrons que se precipitam durante as fases inicial e principal de tempestades magnéticas onde ocorrem desaparecimento da AKR não são caracterizados por distribuições do tipo v-invertido, mas sim por distribuições do tipo Maxwelliana, indicando a ausência ou insuficiência de potenciais alinhados ao campo magnético.

A relação de corrente-voltagem na região de acoplamento ionosfera-magnetosfera foi desenvolvida por Knight (1973). A densidade de corrente alinhada ao campo mag-

nético é expressa, conforme apresentada por Seki *et al.* (2005), supondo-se que os portadores de corrente são os elétrons magnetosféricos com distribuições Maxwellianas, como:

$$j_{\parallel} = eN \left( \frac{K_{th}}{2\pi m_e} \right)^{1/2} \frac{B_i}{B_{V_{\parallel}}} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{B_{V_{\parallel}}}{B_i} \right) \exp \left\{ - \frac{eV_{\parallel}}{K_{th} \left[ \left( \frac{B_i}{B_{V_{\parallel}}} \right) - 1 \right]} \right\} \right] \quad (4.1)$$

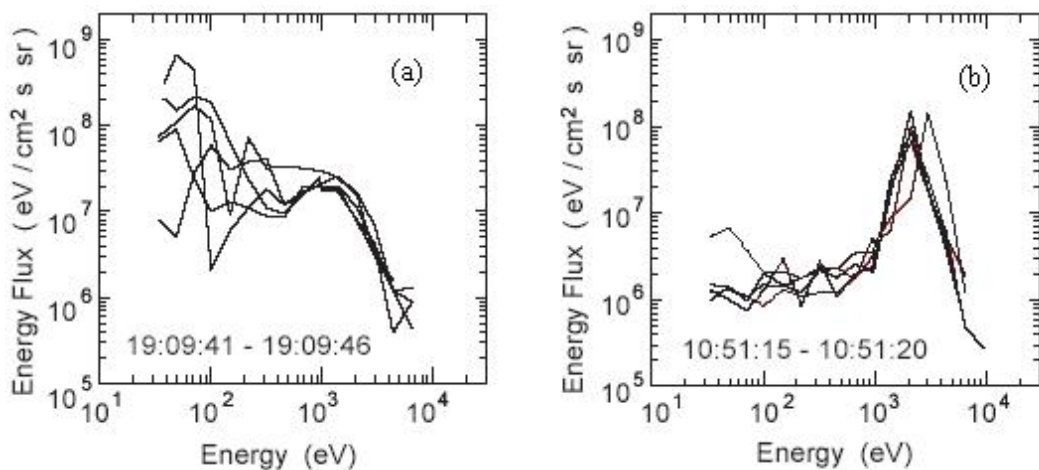
onde  $j_{\parallel}$  e  $V_{\parallel}$  são a densidade de corrente e a diferença de potencial paralelas a  $\mathbf{B}$ , respectivamente,  $N$  é a densidade de plasma e  $K_{th}$  é a energia térmica.  $B_i$  é o campo magnético ionosférico e  $B_{V_{\parallel}}$  é a magnitude do campo magnético no topo da variação de potencial ao longo da linha de campo. O  $m_e$  e  $e$  representam a massa e a carga elementar, respectivamente (SEKI *et al.*, 2005). Considera-se a equação 4.1 válida até mesmo para períodos de tempestades magnéticas.

O caso onde o potencial alinhado ao campo não é formado ( $V_{\parallel} = 0$ ) e a AKR desaparece apesar de fortes correntes alinhadas ao campo, significa que elétrons com densidade  $N$  e energia térmica  $K_{th}$  são suficientemente supridos pela magnetosfera para manter a corrente alinhada no sistema de acoplamento entre a magnetosfera e a ionosfera. Já o caso onde o potencial alinhado é formado e a AKR reaparece, sugere que o fluxo de elétrons magnetosféricos se torna insuficiente para manter por si só a corrente alinhada ao campo e, assim, o potencial alinhado reaparece para manter a relação de corrente-voltagem no sistema (SEKI *et al.*, 2005). Isso sugere que o desenvolvimento do potencial alinhado ao campo não é necessário para a manutenção da corrente de acoplamento entre a ionosfera e a magnetosfera durante a fase inicial e principal de algumas tempestades, mostrando ser diferentes os processos de dissipação da energia magnetosférica através da ionosfera auroral durante tempestades e subtempestades magnéticas.

Cinco espectros de energia superpostos a cada segundo entre 19:09:41 e 19:09:46 UT do dia 11 de janeiro de 1994, e 10:51:15 e 10:51:20 UT do dia 12 de janeiro de 1994 estão mostrados na figura 4.4 (a) e (b), respectivamente. O painel (a) corresponde à fase principal da tempestade magnética mostrada na figura 5.4, enquanto o painel (b) corresponde à fase de recuperação. Em (a) não existe característica de aceleração alinhada ao campo magnético, mas sim de precipitação de elétrons quentes no inter-

valo de energia entre 200 eV a 4 keV. Por outro lado, o espectro de energia durante a fase de recuperação (b) mostra uma estrutura de V invertido bem desenvolvida, com um pico de energia bastante evidente, indicando um feixe de precipitação de cerca de 2 keV.

O fato de ter sido observada a precipitação de elétrons quentes ao invés de precipitação do tipo feixe durante as fases inicial e principal da tempestade, sugere que o potencial alinhado ao campo foi muito fraco ou sequer formado nesse período. O reaparecimento da AKR e a simultânea precipitação por feixe durante a fase de recuperação indicam a formação do potencial.



**FIGURA 4.4** - Espectros de energia entre (a) 19:09:41 e 19:09:46 UT do dia 11 de fevereiro de 1994 e (b) 10:51:15 e 10:51:20 do dia 12 de fevereiro de 1994. FONTE: Seki *et al.* (2005).

Nos casos em que ocorre o desaparecimento da AKR, em geral, acontece um aumento súbito na densidade iônica da lâmina de plasma e esse aumento perdura por praticamente toda a fase inicial e principal da tempestade. Em geral esse tipo de acréscimo na densidade é causado por ICMEs (*Interplanetary Coronal Mass Ejections*). O fenômeno é conhecido como lâmina de plasma superdensa (*superdense plasma sheet*). O aumento na densidade da lâmina de plasma e o desaparecimento da AKR acontecem simultaneamente, evidenciando que a alta densidade local é capaz de fornecer as partículas necessárias para a manutenção da relação de corrente-voltagem (equação 4.1) na região de acoplamento entre a ionosfera e a magnetosfera, sem a necessidade

da formação do potencial  $V_{\parallel}$  alinhado ao campo magnético.

Por outro lado, durante as tempestades onde a AKR não desaparece, em geral, também não se observa um aumento muito acentuado na densidade da lâmina de plasma, que se mantém aproximadamente estável. Dessa forma, os elétrons magnetosféricos não são suficientes para manter o acoplamento ionosfera-magnetosfera, sendo formado o potencial  $V_{\parallel}$  e, conseqüentemente, a AKR não desaparece durante essas tempestades (SEKI *et al.*, 2005).



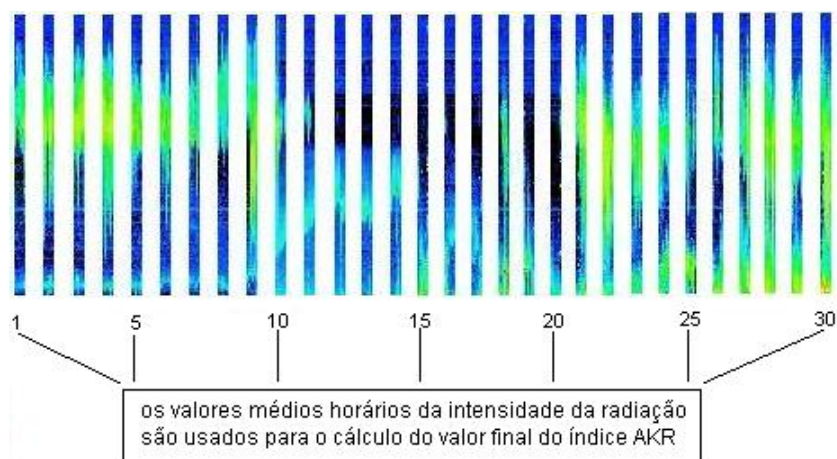
## CAPÍTULO 5

### METODOLOGIA

#### 5.1 Definição do Índice AKR e Quantificação do Fenômeno

O objetivo principal desse trabalho é estudar a influência dos parâmetros do vento solar nas emissões da AKR durante períodos magneticamente agitados, conhecidos como tempestades magnéticas, assim como propor e desenvolver uma quantificação numérica para o fenômeno. Para tanto, foi desenvolvido um índice numérico baseado na intensidade de espectrogramas de ondas no intervalo de frequências características de AKR. Esse índice será chamado índice AKR nesse trabalho. Por uma questão de padrão, só foram usados espectros fornecidos pelo PWI, a bordo do satélite Geotail, no intervalo de frequências entre 12,5 e 800 kHz.

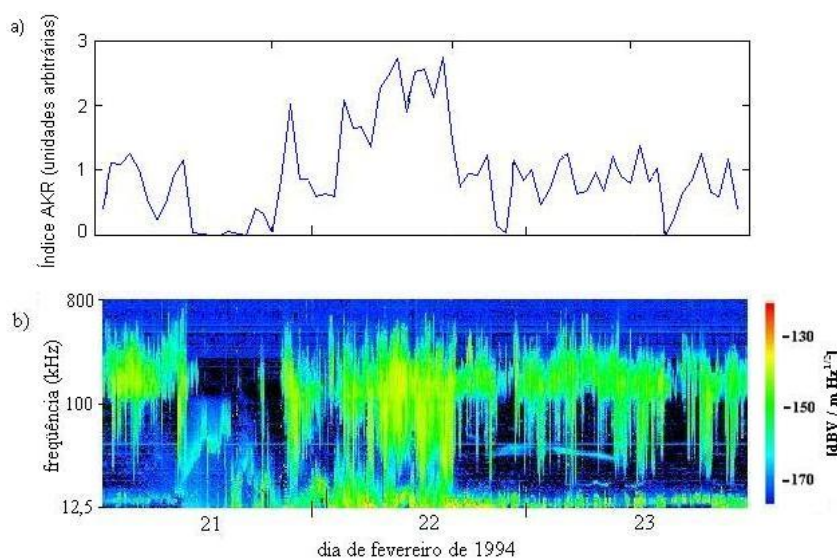
Os espectros podem ser obtidos livremente no site da Universidade de Kyoto, <http://www.kurasc.kyoto-u.ac.jp/gtlpwi>. Foram usados os dados de 24 horas, que foram acoplados para fornecerem informações de três dias, tempo suficiente para que as tempestades se desenvolvam. Recentemente foram disponibilizados dados de 2 horas no referido site, que não foram utilizados nesse trabalho. Atualmente, o intervalo temporal disponível para os dados de 24 horas é de 18 de setembro de 1992 até 30 de abril de 2005.



**FIGURA 5.1** - Representação esquemática do método utilizado para o cálculo do valor horário do índice AKR.

A unidade SI para a intensidade de ondas dos espectrogramas do PWI é  $dB \frac{V}{m} Hz^{-\frac{1}{2}}$ , onde dB é *decibel*, V é *Volt*, m é *metro* e Hz é *Hertz*. As intensidades características registradas do fenômeno ficam aproximadamente entre -175 e -85  $dB \frac{V}{m} Hz^{-\frac{1}{2}}$ . Inicialmente, foi considerada a possibilidade de emissão de AKR no intervalo entre -200 e 0  $dB \frac{V}{m} Hz^{-\frac{1}{2}}$ . Porém, ao se considerar tão vasto intervalo de intensidades, períodos sem atividade AKR não correspondem a um valor nulo do índice. Assim, para a derivação do índice numérico foi considerada a possibilidade de ocorrência da radiação no intervalo de intensidades entre -165 e -85  $dB \frac{V}{m} Hz^{-\frac{1}{2}}$ . As emissões inferiores a -165  $dB \frac{V}{m} Hz^{-\frac{1}{2}}$  foram consideradas *background* por se tratarem de emissões muito fracas, gerando um valor nulo para o índice.

A figura 5.1 apresenta de forma esquemática o método utilizado para o cálculo do valor horário do índice AKR. Cada "fatia" da figura representa uma hora de dados. O valor horário médio da intensidade da radiação é calculado para cada fatia, sendo convertido para o valor final horário do índice AKR através da equação 5.1 da página 65.



**FIGURA 5.2** - a) Valores do índice para os dias 21, 22 e 23 de fevereiro de 1994. b) Espectro obtido pelo PWI a bordo do Geotail.  
 FONTE: b) [www.kurasc.kyoto-u.ac.jp/gtlpwi](http://www.kurasc.kyoto-u.ac.jp/gtlpwi).

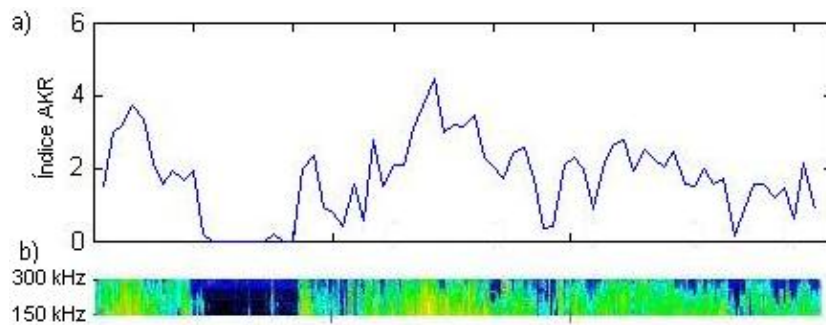
O valor horário final do índice é calculado da seguinte forma:



$$I_h = \left[ 16,5 - \text{abs} \left( \frac{Vm_h}{10} \right) \right] \times 1,25 \quad (5.1)$$

onde  $I_h$  é o valor horário do índice AKR e  $Vm_h$  é o valor horário médio da intensidade da radiação. Os valores que são teoricamente possíveis para o índice estão entre 0 e 10, mas os valores que são realmente observados estão aproximadamente entre 0 e 4 (em unidades arbitrárias), uma vez que emissões com intensidades superiores a  $-130 \text{ dB } \frac{\text{V}}{\text{m}} \text{ Hz}^{-\frac{1}{2}}$  são raras. O valor 16,5 foi incorporado devido à necessidade de se considerar nulo o valor do índice para emissões inferiores a  $-165 \text{ dB } \frac{\text{V}}{\text{m}} \text{ Hz}^{-\frac{1}{2}}$ , enquanto o fator multiplicativo 1,25 é utilizado para ajustar o valor final do índice entre 0 e 10.

A figura 5.2-b mostra novamente o espectro obtido pelo PWI, a bordo do Geotail, para os dias 21, 22 e 23 de fevereiro de 1994, enquanto a figura 5.2-a apresenta os valores do índice AKR para o mesmo período.



**FIGURA 5.3** - a) Valores do índice para os dias 21, 22 e 23 de fevereiro de 1994. b) Espectro obtido pelo PWI entre 150 e 300 kHz. A escala de intensidade do espectro é a mesma da figura 5.2.

FONTE: b) [www.kurasc.kyoto-u.ac.jp/gtlpwi](http://www.kurasc.kyoto-u.ac.jp/gtlpwi).

Além de análises abrangendo todas as frequências do fenômeno, foram feitas análises no intervalo de frequências entre 150 e 300 kHz, onde a AKR costuma atingir picos de intensidade. Mesmo análises qualitativas dos espectros já são suficientes para perceber uma maior intensidade na emissão da radiação nesse intervalo. No que diz respeito ao índice, uma análise restrita a esses picos de intensidade corresponde a

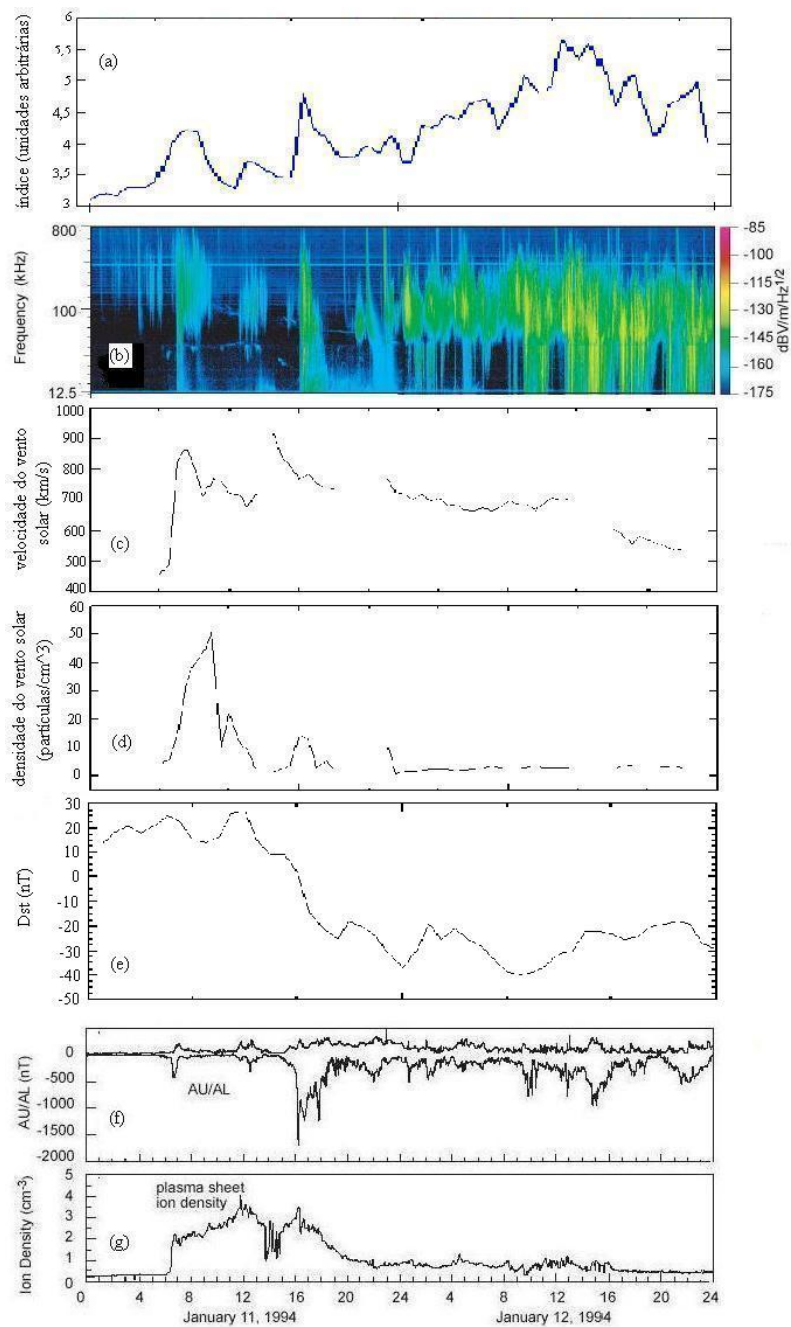
um aumento de 1 a 2 unidades em seus valores.

Na figura 5.3-b está disposto o intervalo do espectro entre as frequências de 150 e 300 kHz para o mesmo período da figura 5.2, enquanto na figura 5.3-a estão plotados os valores do índice obtidos considerando-se apenas o intervalo de frequências mostrado.

De posse de uma quantificação do fenômeno, foram feitos estudos sobre o comportamento da radiação através de correlações entre a intensidade da mesma e os parâmetros do vento solar, da lâmina de plasma e dos índices de atividade magnética AE e Dst.

A figura 5.4 mostra o cenário completo de um evento onde a AKR desaparece nas fase inicial e principal de uma tempestade magnética. Em b) está o espectro dinâmico obtido pelo Geotail para os dias 11 e 12 de janeiro de 1994. Além disso estão plotados os valores do índice de atividade AKR, da velocidade e densidade do vento solar, do índice Dst, dos índices AU e AL ( $AE = AU - AL$ ) e da densidade iônica da *plasma sheet*. Pode-se perceber novamente de forma clara a não-ocorrência da emissão de AKR no início da tempestade. A emissão de AKR era bastante fraca, quase inexistente, antes de 0600 UT no dia 11. Por volta desse horário, a emissão ganhou força como consequência de uma subtempestade com amplitude de AL de -400 nT, como pode ser visto no painel (f). Por volta de 1200 UT, teve início uma tempestade magnética. Durante a fase principal dessa tempestade, pelo menos entre 1200 e 2400 UT do dia 11, a atividade AKR foi quase nula, apesar da intensa atividade auroral, indicada por amplitudes de AL menores que -300 nT. Na fase principal a AKR foi emitida apenas em dois períodos transientes, por volta de 1200 e 1600 UT do dia 11. No final da fase principal, por volta de 00 UT do dia 12, a AKR reapareceu com bastante intensidade, apesar da menor atividade auroral comparada com a fase inicial, sugerindo que as condições na região fonte da AKR são diferentes entre tempestades e subtempestades aurorais.

Os dados do índice AE também foram obtidos na página da Universidade de Kyoto (<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir/download.html>). Porém, os valores do índice estão indisponíveis a partir de 1996, período que contém sete dos nove eventos estudados nesse trabalho.



**FIGURA 5.4** - a) Valores do índice da atividade de AKR para os dias 11 e 12 de janeiro de 1994. b) Espectro obtido pelo PWI. c) Velocidade do vento solar  $km/s$ . d) Densidade do vento solar (partículas por  $cm^3$ ). e) Índice Dst. f) Índices AU e AL ( $AE = AU - AL$ ). g) densidade da lâmina de plasma.  
 FONTE: Adaptado de Seki *et al.* (2005).

Já os dados de Dst, velocidade do vento solar, densidade do vento solar e componente

z do campo magnético interplanetário (Bz) foram todos obtidos na página da OMNI (Operating Missions as Nodes on the Internet), <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>. A página é mantida pela NASA, onde podem ser encontrados os resultados e várias informações sobre as principais missões organizadas e coordenadas pela Agência Espacial Americana.

Por fim, os dados de densidade da lâmina de plasma foram obtidos na homepage <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi>, também mantida pela NASA. As medidas são feitas pelos MPA (Magnetospheric Plasma Analysers), a bordo dos satélites LANL 1989-046, LANL 1990-095, LANL 1991-080 e LANL 1994-084, a distâncias de até 6,6 raios terrestres do planeta. Os números de 4 dígitos no nome de cada satélite correspondem ao ano de lançamento. Depois de obtidos, esses dados são processados e disponibilizados pelo *Los Alamos National Laboratory*, dos Estados Unidos.

## 5.2 Definição de Correlação

Em diversos estudos é conveniente avaliar a relação entre duas medidas quantitativas. Nesse trabalho o estudo de correlações foi usado entre os parâmetros dos meios interplanetário e magnetosférico e a atividade da AKR, quantificada através do índice AKR. As intenções principais em se fazer estudos de correlação podem ser para (ALEXANDER, 1961):

- Verificar se os valores estão associados. Os valores de uma variável tendem a crescer ou a decrescer à medida que os valores da outra crescem ou decrescem?
- Descrever a relação entre variáveis. Por exemplo, dado um aumento específico em uma das variáveis, qual o crescimento médio esperado da outra variável?
- Predizer o valor de uma variável a partir de um valor conhecido da outra variável.

A relação ou associação linear entre duas variáveis é avaliada usando-se o conceito de coeficiente de correlação  $r$ . O primeiro estágio é produzir um gráfico dos dados a serem correlacionados, para obter alguma idéia da forma e do grau de relação entre as variáveis.

Genericamente, sejam  $x_1, x_2, \dots, x_n$  o conjunto das medidas de uma das variáveis e seja  $y_1, y_2, \dots, y_n$  as medidas de uma segunda variável. Sejam  $\bar{x}, \bar{y}, S_x$  e  $S_y$  as médias e desvio padrão amostrais dos dois conjuntos de dados, respectivamente, e  $n$  o número de dados disponíveis. Para se obter o grau de associação entre as duas variáveis, usa-se o coeficiente de correlação, que é definido da seguinte forma, utilizando as médias e desvios padrões das medidas (ALEXANDER, 1961):

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} \quad (5.2)$$

onde:

$$S_{xy} = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n - 1} \quad (5.3)$$

O valor de  $r$  está sempre entre  $-1$  e  $+1$ , com  $r = 0$  correspondendo a uma correlação nula. Valores de  $r$  positivos indicam uma associação positiva, enquanto valores negativos correspondem a uma associação negativa. No caso de uma correlação positiva ( $r > 0$ ), à medida que uma variável cresce a outra também cresce, em média. Para correlações negativas ( $r < 0$ ), à medida que uma variável cresce a outra em média decresce.

Quanto maior o valor de  $r$  (positivo ou negativo), maior a associação (positiva ou negativa). Nos extremos, se  $r = 1$  ou  $r = -1$ , todos os pontos no gráfico são colineares. No outro extremo se  $r = 0$  não existe nenhuma associação linear entre as grandezas.

A tabela 5.1 fornece um guia de como se pode classificar um dado valor numérico de correlação. Evidentemente, as interpretações dependem de cada contexto em particular, mas a classificação aqui apresentada se mostra adequada para grande parte dos estudos.

Os valores de correlações não dependem das unidades dos valores  $x$  ou  $y$ , mas apenas do comportamento global das grandezas envolvidas. Por exemplo, obtém-se os mesmos valores de correlações se distância e tempo forem medidos em *metros* e

**TABELA 5.1** - Classificação dos valores numéricos de correlação.

Valor de r (+ ou -)	Interpretação
0,00 a 0,19	Uma correlação bem fraca
0,20 a 0,39	Uma correlação fraca
0,40 a 0,69	Uma correlação moderada
0,70 a 0,89	Uma correlação forte
0,90 a 1,00	Uma correlação muito forte

*segundos* ou em *polegadas e horas*, respectivamente.

No entanto, em muitos casos a correlação existe entre dois conjuntos de medidas, mas não simultaneamente. Nesses casos existe uma ligação entre as variáveis, porém com uma certa diferença temporal. Para medir a correlação nesses casos, usa-se o conceito de correlação cruzada, possibilitando o cálculo dos valores de correlação levando-se em conta as variações temporais. Esse método consiste em ajustar as curvas à procura de defasagens temporais.

Nesse trabalho também foram feitas medidas de correlações cruzadas, uma vez que é de se esperar que as variações observadas no meio interplanetário não sejam refletidas, às vezes, instantaneamente nas emissões de AKR. As correlações cruzadas foram feitas com os parâmetros atrasados em uma hora em relação ao índice AKR.

## CAPÍTULO 6

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 6.1 Informações Gerais Sobre os Eventos

A tabela 6.1 a seguir apresenta as datas das tempestades utilizadas no trabalho, as estruturas interplanetárias que as causaram, os valores mínimos de Dst que foram atingidos e os nomes dados a elas durante o texto. Dentre as estruturas causadoras estão as nuvens magnéticas e os choques interplanetários. Destes eventos, os de número 1, 2, 3, 4, 6, e 8 foram tratados anteriormente de forma qualitativa por Morioka *et al.* (2003) e Seki *et al.* (2005), enquanto os de número 5, 7 e 9 são apresentados pela primeira vez nesta dissertação.

**TABELA 6.1** - Datas, estruturas interplanetárias causadoras, valores mínimos de Dst e nomes utilizados para descrever as tempestades investigadas nesse trabalho.

Data da tempestade	Estrutura causadora	Dst (nT)	Nome utilizado
10/01/1994 a 12/01/1994	Nuvem magnética	-42	Evento 1
21/02/1994 a 23/02/1994	?	-144	Evento 2
09/12/1997 a 11/12/1997	Choque interplanetário	-60	Evento 3
16/02/1998 a 18/02/1998	Choque interplanetário	-100	Evento 4
06/04/2000 a 08/04/2000	Choque interplanetário	-288	Evento 5
22/05/2000 a 24/05/2000	?	-147	Evento 6
11/08/2000 a 13/08/2000	Nuvem magnética	-271	Evento 7
30/03/2001 a 01/04/2001	Choque interplanetário	-387	Evento 8
11/04/2001 a 13/04/2001	Choque interplanetário	-271	Evento 9

Nuvens magnéticas são estruturas interplanetárias que, a 1 UA (distância entre a órbita da Terra e o Sol), são caracterizadas por seus altos valores de campo magnético (geralmente  $> 10$  nT), baixas temperaturas de prótons, baixos valores de beta de prótons ( $\approx 0,1$ ) e alta variabilidade na direção do campo magnético (DALLAGO *et al.*, 2001). Em estudo feito por Echer *et al.* (2005), constatou-se que, em média, 77% das nuvens magnéticas são altamente geofetivas, ou seja, elas são seguidas por tempestades magnéticas intensas ou moderadas ( $Dst \leq -50$  nT). Considerando-se também as tempestades fracas ( $Dst \leq -30$  nT), a geofetividade das nuvens magnéticas sobe para 97%.

O meio interplanetário tem uma densidade de partículas muito baixa ( $\approx 5$   $cm^{-3}$ ), dando origem a um livre caminho médio da ordem de 1 UA ( $\approx 1,5 \times 10^8$  km). Assim

a ocorrência de colisões entre as partículas é praticamente inexistente. Entretanto, o espaço é perturbado continuamente por ondas de choque não colisionais. Nesse tipo de interação, a colisão que ocorre em choques típicos é substituída por interações coulombianas. Ondas de choque detectadas próximas à órbita da Terra são causadas principalmente por remanescentes interplanetários das ejeções de massa solares, embora alguns tipos de choques possam ainda ser causados por regiões de interação entre feixes rápidos e lentos do próprio vento solar. Um choque ocorre quando a diferença de velocidade entre dois feixes de plasma supera a velocidade característica do meio. No meio interplanetário essa velocidade é a velocidade de Alfvén. Na região do choque o campo magnético e o plasma sofrem mudanças drásticas, mudanças na densidade, temperatura, velocidade de fluxo e intensidade de campo (KIVELSON; RUSSEL, 1995).

Neste trabalho foram utilizados dados dos índices AE e Dst, da densidade e velocidade do vento solar (DVS e VVS, respectivamente), da componente z do campo magnético interplanetário (Bz) e da densidade da lâmina de plasma (DLP). Porém, infelizmente nem todos os dados estão disponíveis para todos os eventos, seja pelo fato de se tratarem de dados novos, que ainda não foram processados, seja por *gaps* existentes devido a falhas operacionais dos aparelhos. Às vezes existem falhas de várias horas, ou até mesmo dias, em determinados dados. A tabela 6.2 mostra quais os dados foram usados em cada evento nesse trabalho.

**TABELA 6.2** - Dados que foram utilizados em cada um dos eventos estudados no trabalho.

Eventos	Dst	AE	Bz	VVS	DVS	DLP
Evento 1	x	x	-	-	-	x
Evento 2	x	x	-	-	-	x
Evento 3	x	-	x	x	x	x
Evento 4	x	-	x	x	x	x
Evento 5	x	-	x	x	x	x
Evento 6	x	-	x	x	x	-
Evento 7	x	-	x	x	x	x
Evento 8	x	-	x	x	x	x
Evento 9	x	-	x	x	x	x

## 6.2 Resultados

Nessa seção estão os resultados das correlações obtidas entre o índice AKR e os parâmetros contidos na tabela 6.2, que são os índices AE e Dst, a componente z do



campo magnético interplanetário Bz, a velocidade e a densidade do vento solar e a densidade de plasma da lâmina de plasma. Com o intuito de evitar a redundância e a repetição desnecessária, toda vez que for feita referência a correlações com um dos parâmetros da tabela 6.2, subentende-se que a correlação é entre o parâmetro e o índice AKR. Por exemplo, *a correlação para a velocidade do vento solar é 0,69* significa *a correlação entre a velocidade do vento solar e o índice AKR é 0,69*, e assim por diante. Além disso, o termo desaparecimento da AKR será usado em casos de desaparecimento ou em casos de diminuição na emissão, sem distinção entre os dois tipos.

Para o cálculo das correlações, foram usados dados correspondentes a 9 a 12 horas antes do início das tempestades, a depender da disponibilidade de dados para cada evento.

### 6.2.1 Evento 1

Para esse evento só estão disponíveis os dados dos índices AE e Dst e da densidade de plasma da lâmina de plasma.

Nesse caso aconteceu o desaparecimento da AKR nas fases inicial e principal da tempestade, como pode ser visto na figura 5.4 na página 67. O desaparecimento foi causado aparentemente pelo acréscimo na densidade de plasma da lâmina de plasma, que atingiu picos da ordem de 4 partículas por  $cm^3$ . A correlação encontrada entre essa densidade e o índice AKR foi de -0,76. Essa alta anticorrelação indica que realmente o aumento na densidade da lâmina de plasma foi determinante no desaparecimento das emissões da AKR.

Para os índices AE e Dst, as correlações encontradas foram de 0,28 e -0,21, respectivamente. No caso de AE, o aumento da densidade da lâmina de plasma reduziu a correlação esperada, já que a relação entre a atividade AKR e AE é, em média, muito maior (VOOTS *et al.*, 1977). A baixa anticorrelação com Dst também pode ser entendida como reflexo da alta da densidade da lâmina de plasma, já que seria de se esperar uma anticorrelação mais acentuada, uma vez que valores mais negativos de Dst indicam maior atividade magnetosférica.

As correlações encontradas para o intervalo de frequências entre 150 e 300 kHz foram de 0,48 para AE, -0,20 para Dst e -0,81 para a densidade de plasma da lâmina de plasma, mostrando a mesma tendência do caso de todas as frequências.

Não foram feitos estudos de correlações cruzadas para esse evento, já que todos os dados utilizados correspondem a medidas feitas dentro da própria magnetosfera e em solo.

### 6.2.2 Evento 2

Os dados disponíveis são os mesmos do evento 1. Também como naquele evento, a AKR desaparece nas fases inicial e principal da tempestade, como conseqüência de aumentos na densidade da lâmina de plasma. O desaparecimento pode ser visto na figura 4.2 da página 57.

Os valores de correlação encontrados foram de -0,72 para a densidade da lâmina de plasma, -0,22 para o Dst e 0,19 para AE. A correlação para AE foi bem abaixo da esperada, devido ao desaparecimento da AKR. Já os valores para Dst e para a densidade da lâmina de plasma são bastante próximos aos valores encontrados no evento 1, sendo os motivos também os mesmos.

No intervalo entre 150 e 300 kHz, os valores de correlação foram 0,20 para AE, -0,11 para Dst e -0,70 para a densidade da lâmina de plasma, também seguindo aproximadamente a mesma tendência das correlações feitas no intervalo total do fenômeno.

Nesse evento também não foram feitos estudos de correlações cruzadas.

### 6.2.3 Evento 3

Nesse caso não foi observado um aumento acentuado na densidade de plasma da lâmina de plasma, mas sim um ligeiro aumento com média de  $\approx 1$  partícula por  $cm^3$ . A AKR não desapareceu durante a tempestade. As correlações obtidas para esse evento estão mostradas nas tabelas 6.3 e 6.4.

**TABELA 6.3** - Correlações entre os parâmetros do vento solar e a AKR entre 9 e 11 de dezembro de 1997.

Parâmetros	Correlações	Correlações Cruzadas
Bz	-0,52	-0,59
Dst	-0,75	x
Velocidade do Vento Solar	0,71	0,61
Densidade do Vento Solar	0,56	0,62
Densidade da Lâmina de Plasma	0,59	x

A correlação com a densidade da lâmina de plasma foi positiva nesse caso porque a AKR não desapareceu, sendo intensificada durante a tempestade.

As correlações cruzadas com atraso de uma hora são maiores em valores absolutos para Bz e para a densidade do vento solar, sendo menores para a velocidade do vento solar.

**TABELA 6.4** - Correlações entre os parâmetros do vento solar e a AKR entre 9 e 11 de dezembro de 1997, para o intervalo de frequências entre 150 e 300 kHz.

Parâmetros	Correlações	Correlações Cruzadas
Bz	-0,19	0,20
Dst	-0,10	x
Velocidade do Vento Solar	0,12	0,13
Densidade do Vento Solar	0,15	0,16
Densidade da Lâmina de Plasma	0,23	x

Os resultados para o intervalo de 150 a 300 kHz não correspondem ao comportamento global da radiação, como pode ser percebido através das tabelas, já que a emissão nesse intervalo é muito intensa, permanecendo praticamente constante durante toda a tempestade.

#### 6.2.4 Evento 4

Como no caso do evento 3, a densidade da lâmina de plasma não se alterou drasticamente durante a tempestade, com médias de  $\approx 1-1,5$  partículas por  $cm^3$ . Por esse motivo a AKR não desapareceu. Os resultados para esse evento estão mostrados nas tabelas 6.5 e 6.6.

**TABELA 6.5** - Correlações entre os parâmetros do vento solar e a AKR entre 16 e 18 de fevereiro de 1998.

Parâmetros	Correlações	Correlações Cruzadas
Bz	-0,54	-0,60
Dst	-0,71	x
Velocidade do Vento Solar	0,68	0,69
Densidade do Vento Solar	0,59	0,63
Densidade da Lâmina de Plasma	0,49	x

Os valores de correlações cruzadas foram maiores em módulo do que os valores para as correlações simples. O valor positivo na correlação com a densidade da lâmina de

plasma indica o não desaparecimento da AKR.

**TABELA 6.6** - Correlações entre os parâmetros do vento solar e a AKR entre 16 e 18 de fevereiro de 1998, para o intervalo de frequências entre 150 e 300 kHz.

Parâmetros	Correlações	Correlações Cruzadas
Bz	-0,09	-0,06
Dst	-0,21	x
Velocidade do Vento Solar	0,24	0,18
Densidade do Vento Solar	0,18	0,12
Densidade da Lâmina de Plasma	0,13	x

Os valores das correlações entre 150 e 300 kHz novamente não coincidem com a realidade da emissão, pois a radiação é muito intensa e pouco sensível a pequenas variações nas medidas.

### 6.2.5 Evento 5

Nesse evento a AKR não foi emitida na fase inicial da tempestade, voltando a ser irradiada na fase de recuperação. A densidade da lâmina de plasma atingiu picos da ordem de 3,8-4,2 partículas por  $cm^3$  durante a fase principal da tempestade. Os resultados encontrados estão dispostos nas tabelas 6.7 e 6.8.

**TABELA 6.7** - Correlações entre os parâmetros do vento solar e a AKR entre 6 e 8 de abril de 2000.

Parâmetros	Correlações	Correlações Cruzadas
Bz	-0,24	-0,29
Dst	-0,29	x
Velocidade do Vento Solar	0,39	0,34
Densidade do Vento Solar	0,37	0,33
Densidade da Lâmina de Plasma	-0,73	x

A baixa anticorrelação com o índice Dst e a alta anticorrelação com a densidade da lâmina de plasma novamente indicam o desaparecimento da AKR durante a tempestade. Devido a esse desaparecimento da radiação, os valores absolutos das correlações com Bz e com a velocidade e a densidade do vento solar foram bem abaixo dos esperados.

No intervalo de 150 a 300 kHz os valores seguiram aproximadamente os mesmos comportamentos exibidos na análise feita em todas as frequências do fenômeno,

como pode ser visto a partir das tabelas. Como houve o desaparecimento da AKR, as emissões nesse intervalo espectral não são tão intensas, sendo mais sensíveis a pequenas variações nas medidas e se aproximando do comportamento global da radiação.

**TABELA 6.8** - Correlações entre os parâmetros do vento solar e a AKR entre 6 e 8 de abril de 2000, para o intervalo de frequências entre 150 e 300 kHz.

Parâmetros	Correlações	Correlações Cruzadas
Bz	-0,28	-0,27
Dst	-0,32	x
Velocidade do Vento Solar	0,41	0,40
Densidade do Vento Solar	0,35	0,36
Densidade da Lâmina de Plasma	-0,75	x

### 6.2.6 Evento 6

Nesse evento ocorreu o desaparecimento da AKR durante a tempestade. A densidade da lâmina de plasma atingiu valores superiores a 4 partículas por  $cm^3$ , mas infelizmente não foi possível fazer estudos a respeito de sua influência na emissão da AKR devido aos grandes intervalos sem dados. Os resultados encontrados para esse evento estão dispostos nas tabelas 6.9 e 6.10.

**TABELA 6.9** - Correlações entre os parâmetros do vento solar e a AKR entre 22 e 24 de maio de 2000.

Parâmetros	Correlações	Correlações Cruzadas
Bz	-0,11	-0,15
Dst	-0,15	x
Velocidade do Vento Solar	0,31	0,29
Densidade do Vento Solar	0,29	0,33
Densidade da Lâmina de Plasma	x	x

Com o desaparecimento da AKR, novamente os valores absolutos das correlações foram baixos, já que as condições interplanetárias favoráveis à formação da AKR levam também, aparentemente, à elevação da densidade da lâmina de plasma e, conseqüentemente, ao desaparecimento da AKR.

O comportamento da radiação no intervalo entre 150 e 300 kHz novamente foi bastante parecido com o comportamento observado em todo o espectro de ocorrência

do fenômeno, assim como nos outros eventos onde ocorreu o desaparecimento da AKR.

**TABELA 6.10** - Correlações entre os parâmetros do vento solar e a AKR entre 22 e 24 de maio de 2000, para o intervalo de frequências entre 150 e 300 kHz.

Parâmetros	Correlações	Correlações Cruzadas
Bz	-0,14	-0,09
Dst	-0,13	x
Velocidade do Vento Solar	0,35	0,36
Densidade do Vento Solar	0,31	0,30
Densidade da Lâmina de Plasma	x	x

### 6.2.7 Evento 7

Outro evento onde a AKR desapareceu durante a tempestade. O motivo novamente foi a elevação da densidade de plasma da lâmina de plasma. Os resultados das correlações para esse caso podem ser visto nas tabelas 6.11 e 6.12.

**TABELA 6.11** - Correlações entre os parâmetros do vento solar e a AKR entre 11 e 13 de agosto de 2000.

Parâmetros	Correlações	Correlações Cruzadas
Bz	-0,23	-0,28
Dst	-0,12	x
Velocidade do Vento Solar	0,23	0,19
Densidade do Vento Solar	0,18	0,22
Densidade da Lâmina de Plasma	-0,59	x

Mais uma vez foram encontrados baixos valores absolutos para os valores de correlação devido ao desaparecimento da AKR, que foi causado pelo aumento da densidade da lâmina de plasma.

Os resultados encontrados entre 150 e 300 kHz se aproximam bastante dos resultados globais da AKR para esse evento.

**TABELA 6.12** - Correlações entre os parâmetros do vento solar e a AKR entre 11 e 13 de agosto de 2000, para o intervalo de frequências entre 150 e 300 kHz.

Parâmetros	Correlações	Correlações Cruzadas
Bz	-0,20	-0,25
Dst	-0,13	x
Velocidade do Vento Solar	0,25	0,21
Densidade do Vento Solar	0,15	0,19
Densidade da Lâmina de Plasma	-0,57	x

### 6.2.8 Evento 8

Os resultados obtidos para esse evento estão dispostos nas tabelas 6.13 e 6.14. Durante essa tempestade também ocorreu o fenômeno de desaparecimento da AKR nas fases iniciais.

**TABELA 6.13** - Correlações entre os parâmetros do vento solar e a AKR entre 30 de março e 01 de abril de 2001.

Parâmetros	Correlações	Correlações Cruzadas
Bz	-0,13	-0,22
Dst	-0,36	x
Velocidade do Vento Solar	0,42	0,35
Densidade do Vento Solar	0,25	0,32
Densidade da Lâmina de Plasma	-0,67	x

**TABELA 6.14** - Correlações entre os parâmetros do vento solar e a AKR entre 30 de março e 01 de abril de 2001, para o intervalo de frequências entre 150 e 300 kHz.

Parâmetros	Correlações	Correlações Cruzadas
Bz	-0,20	-0,22
Dst	-0,31	x
Velocidade do Vento Solar	0,35	0,30
Densidade do Vento Solar	0,28	0,29
Densidade da Lâmina de Plasma	-0,71	x

Os baixos valores absolutos encontrados para as correlações são novamente reflexos do desaparecimento da AKR. O aumento na densidade de plasma da lâmina de plasma foi também detectado nesse evento, sendo o motivo do desaparecimento da radiação.

No que diz respeito às frequências entre 150 e 300 kHz, os resultados mostram um

comportamento semelhante ao comportamento global da radiação, como nos outros casos onde a AKR desaparece.

### 6.2.9 Evento 9

Esse último evento também corresponde a um caso onde aconteceu desaparecimento da AKR no início da tempestade e reaparecimento durante a fase de recuperação. A densidade da lâmina de plasma era de  $\approx 0,6-0,7$  partículas por  $cm^3$ . Após o início da tempestade essa densidade subiu para  $\approx 5$  partículas por  $cm^3$ , causando o desaparecimento da AKR. Os resultados obtidos estão nas tabelas 6.15 e 6.16.

**TABELA 6.15** - Correlações entre os parâmetros do vento solar e a AKR entre 11 e 13 de abril de 2001.

Parâmetros	Correlações	Correlações Cruzadas
Bz	-0,16	-0,24
Dst	-0,32	x
Velocidade do Vento Solar	0,39	0,30
Densidade do Vento Solar	0,27	0,33
Densidade da Lâmina de Plasma	-0,61	x

Novamente o aumento na densidade de plasma da lâmina de plasma resultou no desaparecimento da AKR, tendo como consequência os baixos valores de correlação encontrados.

**TABELA 6.16** - Correlações entre os parâmetros do vento solar e a AKR entre 11 e 13 de abril de 2001, para o intervalo de frequências entre 150 e 300 kHz.

Parâmetros	Correlações	Correlações Cruzadas
Bz	-0,22	-0,20
Dst	-0,33	x
Velocidade do Vento Solar	0,32	0,28
Densidade do Vento Solar	0,25	0,27
Densidade da Lâmina de Plasma	-0,67	x

No que diz respeito às frequências entre 150 e 300 kHz, os resultados mostram um comportamento semelhante ao comportamento global da radiação, como nos outros casos onde a AKR desaparece.

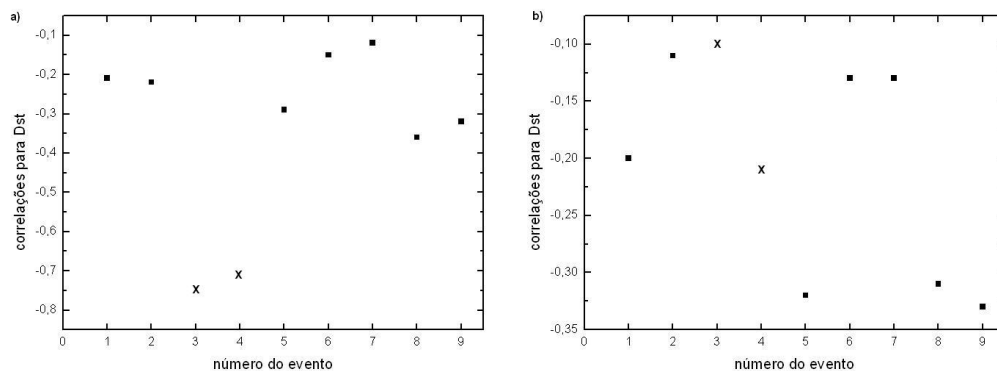


### 6.3 O Que Significam os Resultados?

Os valores das correlações para Dst estão mostrados nos gráficos da figura 6.1. Em a) estão as correlações para todo o intervalo de frequências e em b) para o intervalo entre 150 e 300 kHz.

Os eventos 3 e 4 foram aqueles em que a AKR não desapareceu durante a tempestade, resultando em altos valores de anticorrelação, -0,75 e -0,71 respectivamente. Esses valores de anticorrelação indicam com boa confiabilidade que, em média, à medida que o índice Dst diminui, as emissões de AKR aumentam e à medida que o índice cresce, as emissões diminuem.

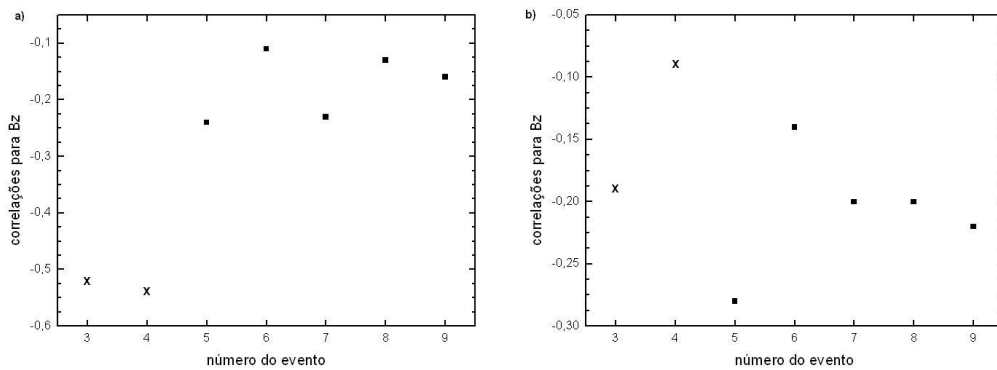
Nos eventos onde a AKR desapareceu os valores de correlação ficam entre -0,36 e -0,12, bem abaixo dos valores dos eventos onde a AKR não desaparece, já que as emissões durante as fases iniciais das tempestades diferem nos dois casos.



**FIGURA 6.1** - Valores de correlações para o índice Dst para os nove eventos. Os valores representados com um "x" correspondem aos casos de não desaparecimento da AKR. Em a) estão os valores para todas as frequências e em b) para o intervalo entre 150 e 300 kHz

Os valores do índice AE estão disponíveis apenas para dois dos eventos estudados. Em ambos esses eventos a correlação encontrada foi abaixo do esperado, sendo de 0,28 para o evento 1 e de 0,19 para o evento 2. Esses baixos valores são acarretados pelo desaparecimento da AKR, já que estudos anteriores indicam uma correlação superior a 0,70 para períodos de tempestade sem o desaparecimento da AKR (VOOTS *et al.*, 1977). No intervalo de 150 a 300 kHz o comportamento de AE mostrou um comportamento muito parecido.

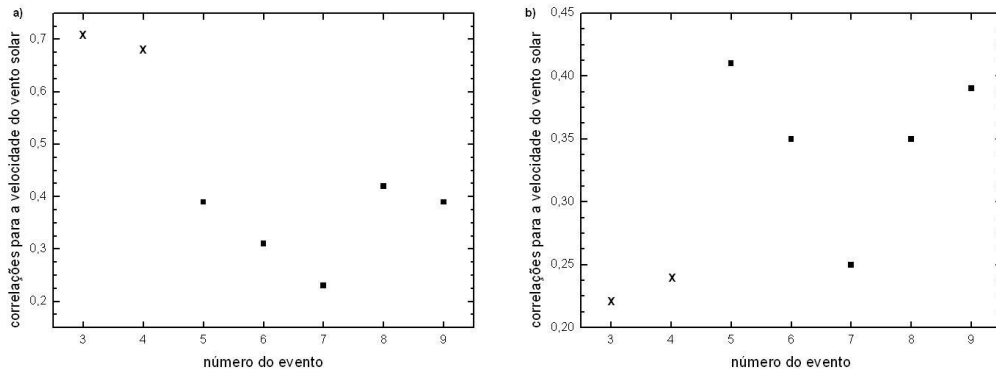
Os gráficos da Figura 6.2 mostram os valores das correlações encontradas para Bz. Nos eventos 3 e 4, onde a AKR não desaparece, as correlações são de -0,52 e -0,54, respectivamente. Um resultado esperado, já que a diminuição no valor de Bz facilita a reconexão magnética e, conseqüentemente, a entrada de plasma do vento solar na magnetosfera. Porém, as correlações cruzadas para esses eventos foram maiores que as correlações simples, sendo de -0,59 e -0,60, indicando que a maior influência de Bz nas emissões de AKR não é instantânea. Nos casos de desaparecimento da AKR as correlações encontradas foram muito baixas, já que a diminuição de Bz facilitou nesses casos o aumento da densidade da lâmina de plasma, levando ao desaparecimento da AKR.



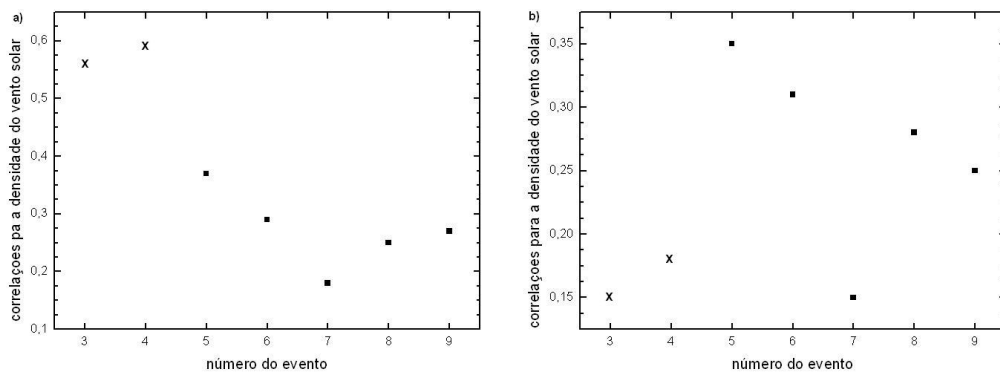
**FIGURA 6.2** - Valores de correlações para Bz para os nove eventos. Os valores representados com um "x" correspondem aos casos de não desaparecimento da AKR. Em a) estão os valores para todas as frequências e em b) para o intervalo entre 150 e 300 kHz

No caso da velocidade do vento solar, a correlação é bastante alta nos eventos 3 e 4, onde a AKR não desaparece, mostrando que aumentos nessa grandeza levam a aumentos nas emissões da radiação. Os valores de correlações cruzadas nesses eventos são menores, indicando que a resposta da AKR em relação à velocidade do vento solar é rápida. Nos casos de desaparecimento da AKR as correlações são substancialmente diminuídas. Essa diminuição provavelmente se dá também pelo fato de aumentos na velocidade favorecerem o aumento da densidade de plasma da lâmina de plasma, suprimindo a AKR. Os valores para a velocidade do vento solar estão nos gráficos da figura 6.3.

A figura 6.4 apresenta as correlações para a densidade de plasma do vento solar.



**FIGURA 6.3** - Valores de correlações para a velocidade do vento solar para os nove eventos. Os valores representados com um "x" correspondem aos casos de não desaparecimento da AKR. Em a) estão os valores para todas as frequências e em b) para o intervalo entre 150 e 300 kHz

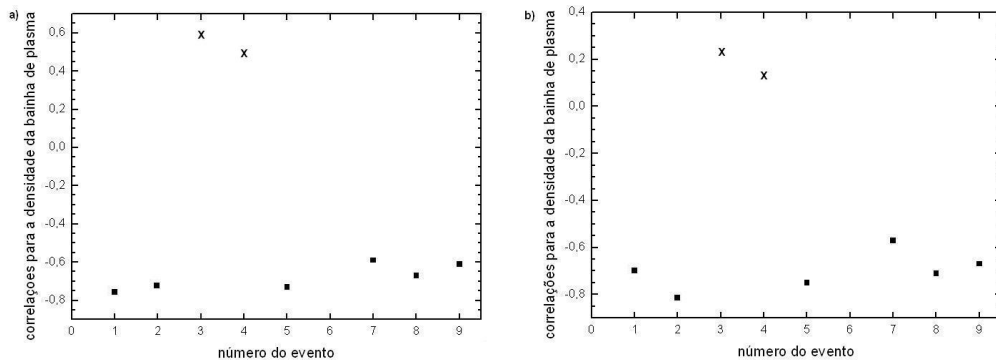


**FIGURA 6.4** - Valores de correlações para a densidade do vento solar para os nove eventos. Os valores representados com um "x" correspondem aos casos de não desaparecimento da AKR. Em a) estão os valores para todas as frequências e em b) para o intervalo entre 150 e 300 kHz

Como ocorreu para a velocidade do vento solar, a correlação é elevada nos eventos 3 e 4. Porém, nesse caso, os valores de correlações cruzadas se mostraram maiores que os valores de correlações simples, indicando que a influência da densidade do vento solar é um pouco demorada, assim como a influência de Bz. Os valores de correlações para os eventos de desaparecimento da AKR são baixos.

Por fim, a figura 6.5 mostra os valores de correlações obtidas para a densidade da lâmina de plasma. As altas anticorrelações encontradas nos eventos de desapareci-

mento da AKR corroboram a teoria de que realmente esse desaparecimento é causado pelas altas densidades na lâmina de plasma. Nos eventos em que a AKR não desaparece, que são os eventos 3 e 4, as correlações encontradas foram positivas. As correlações positivas são porque, mesmo que a densidade da lâmina de plasma não aumente muito no início da tempestade, ela sempre aumenta um pouco, aumentando também as emissões de AKR, já que no início das tempestades ocorrem violentas precipitações de partículas.



**FIGURA 6.5** - Valores de correlações para a densidade da lâmina de plasma para os nove eventos. Os valores representados com um "x" correspondem aos casos de não desaparecimento da AKR. Em a) estão os valores para todas as frequências e em b) para o intervalo entre 150 e 300 kHz

Para todos os parâmetros, o comportamento da radiação entre 150 e 300 kHz pode ser dividido em dois grupos. O primeiro é o grupo dos eventos onde a AKR não desaparece. Nesses casos, as emissões nesse intervalo de frequências são muito intensas, praticamente constantes durante a tempestade. Assim pequenas mudanças no parâmetro a ser correlacionado não encontram resposta nas emissões da radiação. O segundo grupo é o dos eventos onde a AKR desaparece. Nesses casos, existe uma flutuação maior na intensidade da AKR, sendo que o comportamento da radiação nesse intervalo se aproxima do comportamento global.

Esses foram os resultados obtidos no trabalho.

Vale salientar aqui uma possível fonte de erros ao se fazer análises a partir dos espectrogramas das emissões de AKR. Existe um outro fenômeno que ocorre, em parte, no mesmo espectro de frequências da AKR. Esse fenômeno é chamado explosão solar

do tipo III, sendo um dos aspectos mais característicos e mais estudado da atividade solar. As explosões solares do tipo III estão associadas a feixes de elétrons energéticos acelerados em explosões solares (*solar flares*). O fenômeno pode se manifestar sob um grande leque de frequências, desde valores muito altos ( $\approx 200$  MHz) até valores bem pequenos ( $\approx$  algumas dezenas de kHz) (Simões Júnior *et al.*, 2005).

A contaminação dos dados de AKR com explosões solares foi um fator que dificultou bastante a obtenção de espectrogramas a serem utilizados, já que alguns deles são repletos de explosões solares, que se confundem com as próprias emissões de AKR. O ideal seria poder usar os dados do Akebono e do Geotail, os satélites que monitoram ondas magnetosféricas no intervalo da AKR. Porém, infelizmente esses dados ainda são restritos, não sendo disponibilizados em uma *homepage* como no caso dos espectrogramas.



## CAPÍTULO 7

### CONCLUSÕES

Neste trabalho foram tratados nove tempestades magnéticas englobando eventos em que a AKR está presente durante todas as fases da tempestade e outras em que a AKR desaparece durante a fase inicial da tempestade. Dentre estes eventos, seis haviam sido analisados na literatura, sem incluir um tratamento quantitativo das emissões da radiação. Embora os registros de AKR estejam disponíveis de 18/09/1992 a 30/04/2005, encontrar eventos em que todos os parâmetros analisados nesta dissertação estejam também disponíveis de forma ininterrupta não é trivial.

A conclusão mais relevante deste trabalho é que realmente o aumento brusco na densidade de plasma da lâmina de plasma leva à extinção da AKR durante as fases iniciais de algumas tempestades magnéticas. Nos eventos em que o referido aumento na densidade foi observado, a AKR desapareceu e foram encontrados altos valores de anticorrelação entre o índice AKR e a densidade da lâmina de plasma, evidenciando esse desaparecimento.

As altas anticorrelações encontradas reforçam a idéia de que realmente o fator crucial e necessário para o desaparecimento da radiação seja o aumento da densidade da lâmina de plasma, fazendo com que o potencial paralelo ao campo magnético ( $V_{\parallel}$ ) na equação 4.1 não seja formado. Se ( $V_{\parallel}$ ) não é formado, as partículas não são submetidas a regiões de aceleração paralelas ao campo e a AKR não é gerada. Nos eventos em que a AKR não desapareceu os valores de correlação foram positivos, pois no início da tempestade a densidade da lâmina de plasma em geral sofre um leve aumento, juntamente com a intensidade da AKR.

No que diz respeito aos parâmetros do meio interplanetário, foram encontrados altos valores de correlação entre a densidade e a velocidade do vento solar e o índice AKR nas tempestades em que a AKR não desapareceu. Nesses mesmos eventos as correlações entre o campo interplanetário  $B_z$  e o índice AKR foram negativas, pois à medida que  $B_z$  se torna mais negativo a taxa de transferência de matéria e energia solar para o interior da magnetosfera é maior, podendo aumentar a AKR. Esses resultados já eram conhecidos e esperados. Porém, nos eventos em que a AKR desaparece os valores absolutos das correlações diminuem, pois a energia e a matéria que entram na magnetosfera nesse caso contribuem para aumentar a densidade da

lâmina de plasma, diminuindo a atividade da AKR.

Ainda com relação aos parâmetros do meio interplanetário, as correlações cruzadas mostraram melhor concordância em atraso nulo para a velocidade do vento solar e em atraso de uma hora para a densidade do vento solar e para Bz. Isso sugere que a *resposta* da AKR às condições da velocidade do vento solar são mais rápidas. Talvez estudos de correlações cruzadas com defasagens menores que uma hora revelassem melhores resultados, porém isso não foi feito nesse trabalho, pois a resolução de todos os dados usados foi horária.

Em um estudo feito por Gallagher e D'Angelo (1981) sobre as correlações entre os parâmetros interplanetários e o fluxo de potência da AKR em eventos de não desaparecimento, o resultado foi parecido com o resultado aqui obtido. Daquele estudo foi publicado que a velocidade do vento solar apresentou uma correlação média sem atraso de 0,78 com a AKR, enquanto as correlações da AKR com a densidade do vento solar e com Bz apresentaram melhores resultados para tempos não nulos de defasagem. Considerando apenas os eventos onde a AKR não desapareceu, a correlação entre a velocidade do vento solar e o índice AKR foi de 0,71 para o evento 3 e 0,68 para o evento 4, resultados comparáveis aos obtidos por Gallagher e D'Angelo (1981).

Os resultados para AE mostraram valores de correlações muito abaixo do esperado. Porém, os dados disponíveis são de apenas dois eventos (eventos 1 e 2) e, nesses eventos, ocorreu desaparecimento da AKR. Assim, apesar da grande atividade do índice AE, a AKR não seguiu essa atividade, sendo suprimida pela grande densidade da lâmina de plasma.

No caso do índice Dst, foram encontradas altas anticorrelações com o índice AKR nos casos de não desaparecimento da AKR, como era de se esperar. Isso porque à medida que Dst diminui a atividade magnetosférica aumenta, aumentando as emissões de AKR. Os valores obtidos foram -0,75 para o evento 3 e -0,71 para o evento 4. Para os eventos onde a AKR desapareceu, as correlações entre os dois índices foram bastante baixas, ficando entre -0,36 e -0,12. Os baixos valores podem ser explicados pelo fato de não acontecer a diminuição em Dst e o concorrente aumento na emissão de AKR nas fases iniciais das tempestades.

Os estudos feitos no intervalo de frequências entre 150 e 300 kHz mostraram que



quando as emissões da AKR não desaparecem o comportamento da radiação não apresenta valores de correlações condizentes com o esperado. Isso se deve ao fato de que as emissões nesse intervalo são muito intensas, sendo praticamente constantes durante as tempestades. Já nos casos onde a AKR desaparece, o comportamento da radiação segue aproximadamente o comportamento global da radiação, pois as depressões na intensidade das emissões também se refletem nesse intervalo central de frequências. Assim sendo, o índice calculado em todas as frequências do fenômeno se mostrou mais útil e mais condizente com o comportamento da AKR.

Finalmente, de uma forma geral, os resultados para as tempestades onde a AKR não desaparece confirmam os resultados obtidos no passado. No caso das tempestades com desaparecimento da AKR, os resultados reforçam a teoria de que realmente o desaparecimento da AKR está associado à elevação da densidade de plasma da lâmina de plasma e subsequente inibição da formação de potenciais elétricos alinhados ao campo magnético nas regiões geradoras da AKR. Nesses resultados, apesar de todo o cuidado para que isso fosse evitado, pode existir algum tipo de erro introduzido pela contaminação dos espectrogramas por explosões solares do tipo III.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKASOFU, S. I.; CHAPMAN, S. **Solar terrestrial physics**. Oxford: Oxford University Press, 1972. 45, 54
- ALEXANDER, H. W. **Elements of mathematical statistics**. New York: John Wiley & Sons, 1961. 367 p. 68, 69
- BARBOSA, D. D. 1976. **Electrostatic mode coupling at  $2\omega_{uh}$ ; a generation mechanism for AKR**. 1976. PhD thesis - University of California, Los Angeles. Los Angeles. 38
- BENEDIKTOV, E. A.; GETMANTSEV, G. G.; MITYAKOV, N. A.; RAPOPORT, V. O.; TARASOV, A. F. Relation between geomagnetic activity and the sporadic radio emission recorded by the electron satellites. **Cosmic Res. Engl. Transl.**, v. 6, n. 1, p. 791, 1968. 31
- BENSON, R. F. Source mechanism for Terrestrial Kilometric Radiation. **Geophysical Research Letters**, v. 2, n. 2, p. 52–55, 1975. 38
- BENSON, R. F.; MELLOTT, M. M.; RUFF, R. L.; GURNETT, D. A. Ordinary mode Auroral Kilometric Radiation fine structure observed by DE1. **Journal of Geophysical Research**, v. 93, n. A7, p. 7515–7520, July 1988. 34
- BITTENCOURT, J. A. **Fundamentals of plasma physics**. [S.l.]: FAPESP, 1995. 676 p. 41
- BOSWELL, R. W. Energetic ions and electromagnetic-radiation in auroral region. **Geophysical Research Letters**, v. 5, n. 5, p. 395–398, 1978. 38
- CARPENTER, D. L.; BELL, T. F.; INAN, U. S.; BENSON, R. F.; SONWALKAR, V. S.; REINISCH, B. W.; GALLAGHER, D. L. Z-mode sounding within propagation "cavities" and other inner magnetospheric regions by the RPI on the IMAGE Satellite. **Journal of Geophysical Research - Space Physics**, v. 108, n. A12, p. SMP 7.1–7.18, Dec. 2003. 40
- CHEN, F. F. **Introduction to plasma physics and controlled fusion**. New York: Plenum Press, 1984. 421 p. 41, 42
- DALLAGO, A.; GONZALEZ, W. D.; GONZALEZ, A. L. C.; VIEIRA, L. E. A. Compression of magnetic clouds in interplanetary space and increase in their

- effectiveness. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 63, n. 5, p. 451–455, Mar. 2001. 71
- DAVIS, T. N.; SUGIURA, M. Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations. **Journal of Geophysical Research**, v. 7, n. 3, p. 785, 1966. 46
- DUNCKEL, N.; FICKLIN, B.; HELLIWEL, L. R. R. Low-frequency noise observed in the distant magnetosphere with Ogo 1. **Journal of Geophysical Research**, v. 75, n. 10, p. 1854–1862, Mar. 1970. 31
- EATHER, R. H.; MENDE, S. B.; WEBER, E. J. Dayside aurora and relevance to substorm current systems and dayside merging. **Journal of Geophysical Research - Space Physics**, v. 84, n. NA7, p. 3339–3359, Mar. 1979. 25
- ECHER, E.; ALVES, M. V.; GONZALEZ, W. D. A statistical study of magnetic cloud parameters and geoeffectiveness. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 67, n. 10, p. 839–852, July 2005. 71
- ERGUN, R.; CARLSON, C. W.; MCFADDEN, J. P.; DELORY, G. T.; STRANGEWAY, R. J.; PRITCHETT, P. L. Electron-cyclotron maser driven by charged-particle acceleration from magnetic field-aligned electric field. **The Astrophysical Journal**, v. 538, n. 1, p. 456–466, July 2000. 35
- GAELZER, R. 1991. **O maser de elétron-ciclotron como mecanismo gerador da Radiação Quilométrica Auroral**. 1991. 106p. (INPE-5982-TDI/577). Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1991. 26, 37
- GALEEV, A. A.; KRASNOSELKIKH, V. Strong Langmuir turbulence in the earth's magnetosphere as a source of kilometer radio wave emission. **JETP Lett., Engl. Transl.**, v. 24, n. 1, p. 515, 1976. 38
- GALLAGHER, D. L.; D'ANGELO, N. Correlation between solar wind parameters and Auroral Kilometric Radiation intensity. **Geophysical Research Letters**, v. 8, n. 10, p. 1087–1089, Oct. 1981. 27, 88
- GONZALEZ, W. D.; JOSELYN, J. A.; KAMIDE, Y.; KROEHL, H. W.; ROSTOKER, G.; TSURUTANI, B. T.; VASYLIUNAS, V. M. What is a geomagnetic storm? **Journal of Geophysical Research - Space Physics**, v. 99, n. A4, p. 5771–5792, Apr. 1994. 53, 56

GONZALEZ, W. D.; TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, A. L. C. Interplanetary origin of geomagnetic storms. **Space Science Reviews**, v. 88, n. 3-4, p. 529–562, Sept. 1999. 53

GRABBE, C. L. Auroral Kilometric Radiation: a theoretical review. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v. 19, n. 4, p. 627–633, Nov. 1981. 36

GREEN, J. L.; GURNETT, D. A.; SHAWHAN, S. D. The angular distribution of Auroral Kilometric Radiation. **Journal of Geophysical Research**, v. 82, n. 13, p. 1825–1837, May 1977. 32

GURNETT, D. A. The Earth as a radio source: Terrestrial Kilometric Radiation. **Journal of Geophysical Research**, v. 79, n. 28, p. 4227–4238, Oct. 1974. 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37

JONES, D. Jovian and Terrestrial harmonic radiations. **Geophysical Research Letters**, v. 4, n. 3, p. 121–124, Nov. 1977. 38

\_\_\_\_\_. Mode-coupling of z-mode waves as a source of Terrestrial Kilometric and Jovian Decametric Radiations. **Astronomy and Astrophysics**, v. 55, n. 2, p. 245–252, 1977. 38

KAISER, M. L.; ALEXANDER, J. K. Relationship between auroral substorms and the occurrence of Terrestrial Kilometric Radiation. **Journal of Geophysical Research**, v. 82, n. 32, p. 5283–5286, Nov. 1977. 27, 37, 45, 46, 50

KASABA, Y.; ANDERSON, R. R. The angular distribution of Auroral Kilometric Radiation observed by the Geotail spacecraft. **Geophysical Research Letters**, v. 24, n. 20, p. 2483–2486, Oct. 1997. 38

KIVELSON, M. G.; RUSSEL, C. T. **Introduction to space physics**. New York: Cambridge University Press, 1995. 568 p. 25, 28, 38, 46, 55, 72

KNIGHT, S. Parallel electric field. **Planet. Space Sci.**, v. 21, n. 1, p. 741–750, 1973. 58

KURTH, W. S.; GURNETT, D. A. Auroral Kilometric Radiation integrated power flux as a proxy for AE. **Advances in Space Research**, v. 22, n. 1, p. 73–77, 1998. 28

LIOU, K.; MENG, C. I.; LUI, A. T. Y.; NEWELL, P. T. Auroral Kilometric Radiation at substorm onset. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, n. A11, p. 25,325–25,331, Nov. 2000. 27, 37, 47, 48, 49, 50

MATSUMOTO, H.; NAGANO, I.; ANDERSON, R. R.; KOJIMA, H.; KASHIMOTO, K.; TSUSUI, M.; OKADA, T.; KIMURA, I.; OMURA, Y.; OKADA, M. Plasma wave observations with Geotail spacecraft. **Journal of Geomagnetism and Geoelectricity**, v. 46, n. 1, p. 59–95, 1994. 40

MELROSE, D. B. Interpretation of Jupiter's Decametric Radiation and Terrestrial Kilometric Radiation as directed amplified gyroemission. **The Astrophysical Journal**, v. 207, n. 2, p. 651–662, 1976. 38

MORIOKA, A.; MIYOSHI, Y.; SEKI, T.; TSUCHIYA, F.; MISAWA, H.; OYA, H.; MATSUMOTO, H.; KASHIMOTO, K.; MUKAI, T.; YUMOTO, K.; NAGATSUMA, T. AKR disappearance during magnetic storms. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. A6, p. 309–319, June 2003. 29, 54, 55, 56, 57, 58, 71

MORIOKA, A.; OYA, H.; MIYATAKE, S. Terrestrial Kilometric Radiation observed by satellite Jikiken (Exos-B). **Journal of Geomagnetism and Geoelectricity**, v. 33, n. 1, p. 37–62, 1981. 37

MURATA, T.; MATSUMOTO, H.; KOJIMA, H.; IEMORI, T. Correlations of AKR index with Kp and Dst indices. In: Symposium on upper atmospheric physics, second edition, 1997, Kyoto. **Proceedings..., Kyoto: Kyoto University Press, n. 3, 1997**, p. 64–68. 27, 46

PALMADESSO, P.; COFFEY, T. P.; OSSAKOW, S. L.; PAPADOPOULOS, K. Generation of Terrestrial Kilometric Radiation by a beam-driven electromagnetic-instability. **Journal of Geophysical Research - Space Physics**, v. 81, n. 10, p. 1762–1770, 1976. 38

ROSTOKER, G. Geomagnetic indices. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v. 10, n. 4, p. 935–950, Nov. 1972. 46

SEKI, T.; MORIOKA, A.; MIYOSHI, Y. S.; TSUCHIYA, F.; MISAWA, H.; GONZALEZ, W.; SAKANOI, T.; OYA, H.; MATSUMOTO, H.; KASHIMOTO, K.; MUKAI, T. Auroral kilometric radiation and magnetosphere-ionosphere

coupling process during magnetic storms. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, n. A05206, May 2005. 29, 58, 59, 60, 61, 67, 71

SHIMBORI, A.; ONO, T.; IZIMA, M.; KUMAMOTO, A.; OYA, H. Sudden commencements related plasma waves observed by the Akebono satellite in the polar region and inside the plasmasphere region. **Journal of Geophysical Research - Space Physics**, v. 108, n. A12, p. SMP 17.1–17.24, Dec. 2003. 40

Simões Júnior, F. J. R.; ALVES, M. V.; RIZZATO, F. B. Energy modes distribution: An analysis of the ratio anti-Stokes to Stokes amplitudes generated by a pair of counterpropagating Langmuir waves. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 67, n. 17-18, p. 1680–1686, Dec. 2005. 85

STRANGEWAY, R. J.; ERGUN, R. E.; CARLSON, C. W.; MCFADDEN, J. P.; DELORY, G. T.; PRITCHETT, P. L. Accelerated electrons as the source of Auroral Kilometric Radiation. **Journal of Geophysical Research**, v. 26, n. 1-3, p. 145–149, Jan. 2001. 45

VOOTS, G. R.; GURNETT, D. A.; AKASOFU, S. I. Auroral Kilometric Radiation as an indicator of auroral magnetic disturbances. **Journal of Geophysical Research**, v. 82, n. 16, p. 2259–2266, June 1977. 28, 37, 73, 81

WU, C. S.; LEE, L. C. A theory of Terrestrial Kilometric Radiation. **The Astrophysical Journal**, v. 230, n. 2, p. 621–626, June 1979. 35, 39

ZARKA, P. Auroral radio emission at the outer planets: observation and theories. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. E9, p. 20159–20194, Aug. 1998. 27

\_\_\_\_\_. Radio and plasma waves at the outer planets. **Advances in Space Research**, v. 33, n. 11, p. 2045–2060, 2004. 27, 31