



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-15716-TDI/1473

ESTUDO ESTATÍSTICO DA VARIABILIDADE DOS ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS E SUA RELAÇÃO COM O CICLO SOLAR

Alan Prestes

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial,
orientada pelos Drs. Walter Demétrio Gonzalez Alarcon e Alicia Luiza Clua de
Gonzalez Alarcon, aprovada em 2 de setembro de 2002.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/02.03.18.25>>

INPE
São José dos Campos
2009

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:

Presidente:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Viveca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-15716-TDI/1473

ESTUDO ESTATÍSTICO DA VARIABILIDADE DOS ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS E SUA RELAÇÃO COM O CICLO SOLAR

Alan Prestes

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial,
orientada pelos Drs. Walter Demétrio Gonzalez Alarcon e Alicia Luiza Clua de
Gonzalez Alarcon, aprovada em 2 de setembro de 2002.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/02.03.18.25>>

INPE
São José dos Campos
2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Prestes, Alan.
P926e Estudo estatístico da variabilidade dos índices geomagnéticos e sua relação com o ciclo solar / Alan Prestes. – São José dos Campos : INPE, 2009.

112p. ; (INPE-15716-TDI/1473)

Dissertação (Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002.

Orientadores : Walter Demétrio Gonzalez Alarcon e Alicia Luiza Clua de Gonzalez Alarcon.

1. Geomagnetismo. 2. Ciclo solar. 3. Variabilidade. 4. Estatística. 5. Índices. I.Título.

CDU 550.38:523.7

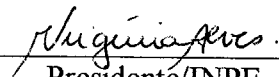
Copyright © 2009 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, microfilmico, reprográfico ou outros, sem a permissão escrita da Editora, com exceção de qualquer material fornecido especificamente no propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2009 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, microfilming, recording or otherwise, without written permission from the Publisher, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

145

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

Dr^a Maria Virgínia Alves



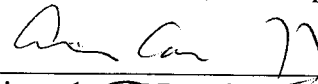
Presidente/INPE, SJCampos-SP

Dr. Walter Demetrio Gonzalez Alarcon



Orientador/INPE, SJCampos-SP

Dr^a Alicia Luiza Clua de Gonzalez Alarcon



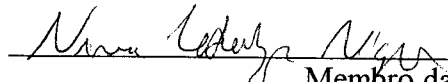
Orientadora/INPE, SJCampos-SP

Dr. Severino Luiz Guimarães Dutra



Membro da Banca/INPE, SJCampos-SP

Dr. Nivaor Rodolfo Rigozo



Membro da Banca
Convidado Univ. Barra Mansa-RJ

Candidato: Alan Prestes

São José dos Campos, 2 de setembro de 2002.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus pais, Valderi e Antoninha, e meus irmãos, Alex e Adelson, por terem me incentivado e me apoiado em todos os momentos. Por todo carinho que me deram e esforço que fizeram para que eu conseguisse esta conquista. Todas as minhas conquistas são conquistas de vocês também.

Agradeço a minha tia Azélia por estar ao meu lado em muito momento difíceis e por todo seu carinho.

Um agradecimento especial a todos os meus amigos e colegas pela amizade e pelo companheirismo ao longo desta jornada. Por estarem constantemente me incentivando e desejando o melhor.

Agradeço ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE – São José dos Campos (SP) e INPE – Santa Maria (RS), pela infra-estrutura disponibilizada para a realização desta Dissertação.

Um agradecimento a CAPES e o CNPq pela bolsa de mestrado.

Um agradecimento aos meus orientadores, Dr. Walter Gonzalez e Dra. Alicia Gonzalez, por terem me proporcionado a valiosa oportunidade de enriquecer meu conhecimento nestes dois anos de estudo.

Agradeço a Deus por ter me dado o privilégio da vida e por ter criado todos os Fenômenos Físicos da Natureza.

RESUMO

O presente trabalho apresenta o estudo das relações de longo período entre a atividade solar e a atividade geomagnética. Para isso, usaram-se as séries anuais e mensais do número de manchas solares (Rz) e o índice geomagnético aa de 1868 a 2000. Também foram utilizadas as séries anuais (no intervalo de tempo entre 1957 e 2000) dos índices geomagnéticos Dst , AE , Ap , e da velocidade do vento solar. Neste estudo foram utilizadas técnicas de análise estatística e análise harmônica. Na análise espectral os períodos mais significativos obtidos nas séries temporais do aa e Rz foram os de 11 anos, para ambas as séries, e de 4,3 anos e 6 meses no aa . Na análise de longo período do Rz e aa observou-se uma tendência de aumento com o tempo da média corrida de 11 e 22 anos, a qual é mais acentuada na série do aa . Na correlação cruzada de ciclo a ciclo entre Rz e aa observou-se que os coeficientes de correlação apresentam uma tendência de diminuição, ao passo que a defasagem tem uma tendência de aumento. Efetuou-se ainda uma regressão múltipla do índice aa em função de Rz e dos feixes de alta velocidade ($Fpk500$), onde se obteve que aproximadamente 71% da variabilidade do índice aa é explicada pelas variações de Rz e $Fpk500$. Efetuando a correlação cruzada entre o índice aa x $Fpk500$ e aa x Rz observou-se uma melhor correlação entre aa x $Fpk500$ do que com o aa x Rz . A atividade geomagnética representada por aa responde mais às estruturas relacionadas aos feixes rápidos do que às relacionadas a Rz . A correlação de longo período entre índices geomagnéticos AE , Dst , Ap e aa , bem como suas relações com Rz e $Fpk500$ também foram feitas. Deste estudo obteve-se que os índices Dst e AE estão bem relacionados aos índices aa e Ap . Observou-se que 75% da variabilidade do aa pode ser obtida por uma relação linear entre os índices Dst e AE . O índice Ap apresenta um comportamento semelhante, 73% de sua variabilidade é descrita por uma relação linear destes mesmos dois índices.

STATISTICAL STUDY OF THE VARIABILITY OF GEOMAGNETIC INDICES AND ITS RELATION TO THE SOLAR CICLE

ABSTRACT

A study of the long-term relation between solar and geomagnetic activity is presented. For that purpose we have used of the annual and monthly sunspot number series (*Rz*) together with the *aa* geomagnetic index from 1868 to 2000. Furthermore, we have analyzed the *Dst*, *AE* and *Ap* indices (from 1957 to 2000), and solar wind speed. In this study, statistical analysis techniques and harmonic analysis were used. The most significant periods obtained with the spectral analysis in the *aa* and *Rz* time series were those of 11 years in both series, and 4.3 years and 6 months in the *aa* series. In the long-term analysis of the *Rz* and *aa* series it was observed a tendency of increasing of the 11 and 22 years running average, with time, being more intense in the *aa* series. The cross correlation analysis between *Rz* and *aa*, through the cycles, showed that the correlation coefficient diminishes while the lag between both series increase. A multiple regression was also made to obtain the *aa* index from the *Rz* series combined with the high-speed solar wind streams (*Fpk500*), which revealed that approximately 71% of the *aa* variability can be explained by the variabilities in the *Rz* and *Fpk500* time series. It was observed in the present work that the cross correlation between *aa* index and *Fpk500* is better than the cross correlation between *aa* index and *Rz*. The geomagnetic activity represented by the *aa* index is sensitive to the high-speed stream solar wind related structures. It was also performed a inter correlation between various indices, *AE*, *Dst*, *Ap* and *aa* for long periods, as well as their relation with *Rz* and *Fpk500*. The results of this inter correlation showed that the *Dst* and the *AE* indices are well correlated with the *aa* and *Ap* indexes. It was found that 75% of the *aa* variability can be obtained through a linear relation between the *Dst* and the *AE* indeces. The *Ap* index has a similar behavior, 73% of its variability is described through a linear combination of these same both indices.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	11
CAPÍTULO 2 - INTERAÇÃO SOL-TERRA.....	15
2.1- Atividade Solar.....	15
2.2- Atividade Geomagnética.....	24
2.3- Índices de Atividade Geomagnética.....	31
2.3.1- Índice k_p e A_p	33
2.3.2- Índice aa	35
2.3.3- Índice AE.....	36
2.3.4- Índice Dst.....	37
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA DE ANÁLISE DE DADOS	41
3.1- Dados.....	41
3.2- Metodologia.....	41
3.2.1- Correlação e Regressão Linear Simples.....	42
3.2.2- Regressão Linear Múltipla.....	43
3.2.3- Autocorrelação e Correlação Cruzada	45
3.2.4- Transformada de Fourier Discreta.....	46
3.2.5- Filtros Digitais.....	47

3.2.6- Método de Janelamento Múltiplo	48
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
4.1- Correlação entre o número de manchas solares <i>Rz</i> e o índice geomagnético <i>aa</i>	51
4.2- Análise espectral do <i>Rz</i> e do <i>aa</i> utilizando o método de janelamento múltiplo.....	68
4.3- Regressão linear múltipla entre <i>aa</i> , <i>Rz</i> e <i>Fpk500</i>	79
4.4- Correlação de longo período dos índices geomagnéticos <i>AE</i> , <i>Dst</i> , <i>Ap</i> e <i>aa</i> , e suas dependências com fatores solares (<i>Rz</i> e <i>Fpk500</i>).....	89
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES.....	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1: Variação na média anual do número de manchas solares, mostrando os ciclos solares e um possível período de longa duração.	18
2.2: Taxa de ocorrência de CMEs durante o período de 1973 a 1989. Dados correspondem a coronógrafos na <i>Skylab</i> e <i>SMM</i> (círculos), e satélite <i>Solwind</i> (quadrados), e fotômetros no <i>Helios 1</i> e <i>2</i> (triângulos). Duas taxas do <i>Solwind</i> são dadas, para todas as CMEs e uma mais baixa somente para CMEs maior (quadrados).....	20
2.3: A) Distribuição da frequência anual das nuvens magnéticas com polaridades NS e SN quando o campo magnético polar solar reverte. B) Distribuição da frequência anual das nuvens magnéticas com assinaturas de <i>Bz</i> bipolar e unipolar durante a última metade do ciclo 21 e início de ciclo 22. A linha representa o n0. de manchas solares	22
2.4: Número anual dos buracos coronais de baixas latitudes (dentro de $\pm 30^\circ$) para o ciclo solar 21 junto com a curva suavizada do número de manchas Solares.	23
2.5: Esquema do sistema Sol-Vento Solar-Magnetosfera Terrestre, mostrando o acoplamento meio interplanetário – magnetosfera através do processo de reconexão magnética.	25
2.6: Representação esquemática de vários sistemas de correntes ligando as correntes magnetosféricas e ionosféricas, responsáveis pela atividade magnética.	26
2.7: Número mensal de dias com <i>aa</i> excedendo os níveis de 90, 120, 150, 180 e 210, para o intervalo de tempo de 1868-1998.....	27
2.8: Exemplo da variação do índice <i>Dst</i> durante uma tempestade geomagnética, período de 14-25 de outubro de 1995.	28
2.9: a) Distribuição de pico duplo das tempestades intensas (pico de <i>Dst</i> < -100 nT) para o ciclo 21. b) Distribuição correspondente de pico duplo do campo <i>Bz</i> com amplitude < -10 nT e duração $T > 3$ h. (Número relativo anual de eventos). Barras em branco são valores corrigidos depois que estes intervalos foram normalizados para a cobertura dos dados de satélites disponíveis.....	29
2.10: Os índices <i>AU</i> e <i>AL</i> para uma subtempestade particular. Observam-se claramente três fases de uma subtempestade.....	30
2.11: Média anual de 1868-1998 do número de Wolf do número de manchas solares e do índice geomagnético <i>aa</i>	31
2.12: Rede mundial de observatórios magnéticos (ano de 1993).	32
4.1: Média anual do número de manchas solares (<i>Rz</i>) e o índice geomagnético <i>aa</i> para o intervalo de 1868 a 2000.....	52
4.2: Médias mensais do número de manchas solares <i>Rz</i> (painel superior) e o índice geomagnético <i>aa</i> (painel inferior) para o intervalo de 1868 a 2000.	53
4.3: Diferença entre o primeiro e segundo picos em anos do índice geomagnético <i>aa</i> em cada ciclo (painel superior), Diferença do primeiro pico de <i>aa</i> em relação ao pico de <i>Rz</i> (painel central), e diferença do segundo pico de <i>aa</i> em relação ao pico de <i>Rz</i> (painel inferior).....	55

4.4: Médias corridas das séries de <i>Rz</i> e <i>aa</i> . (a) Média corrida de 11 anos das séries anuais de <i>Rz</i> e <i>aa</i> . (b) Média corrida de 22 anos das séries anuais de <i>Rz</i> e <i>aa</i> . (c) Média corrida de 11 anos das séries mensais de <i>Rz</i> e <i>aa</i> . (d) Média corrida de 22 anos das séries mensais de <i>Rz</i> e <i>aa</i> .	57
4.5: Séries temporais anuais filtradas de <i>Rz</i> e <i>aa</i> para a banda de 9 a 13 anos.	60
4.6: Séries temporais mensais filtradas de <i>Rz</i> e <i>aa</i> para a banda de 108 a 156 meses.	60
4.7: Tendência da defasagem e do coeficiente de correlação das séries anuais e mensais de <i>Rz</i> e <i>aa</i> ciclo a ciclo. A) séries anuais, b) séries mensais.	63
4.8: Tendência da defasagem e do coeficiente de correlação das séries anuais e mensais filtradas entre o intervalo de 9 a 13 de <i>Rz</i> e <i>aa</i> ciclo a ciclo. A) Séries anuais filtradas, b) séries mensais filtradas.	64
4.9: Análise espectral das séries anuais de <i>Rz</i> e <i>aa</i> obtidas através do método de múltiplo janelamento (<i>Multiple Taper Method</i> – MTM). (a) análise espectral da série anual de <i>Rz</i> . (b) análise espectral da série anual de <i>aa</i> . (c) e (d) apresentam os níveis de confiança dos períodos encontrados através da análise espectral das séries anuais de <i>Rz</i> e <i>aa</i> com confiança > que 95%.	69
4.10: Espectro de série anual do número de manchas solares para o período entre 1700 e 2000.	70
4.11: Análise espectral das séries mensais de <i>Rz</i> e <i>aa</i> obtidas através do método de múltiplo janelamento (MTM). (a) análise espectral da série mensal de <i>Rz</i> . (b) análise espectral da série mensal de <i>aa</i> . (c) e (d) apresentam os níveis de confiança dos períodos encontrados através da análise espectral das séries mensais de <i>Rz</i> e <i>aa</i> com confiança > que 95%.	71
4.12: Séries anuais de <i>Rz</i> e <i>aa</i> com suas tendências lineares de aumento (painéis superiores), e as séries menos suas tendências (painéis inferiores).	72
4.13: Séries mensais de <i>Rz</i> e <i>aa</i> com suas tendências lineares de aumento (painéis superiores), e as séries menos suas tendências (painéis inferiores).	73
4.14: Análise espectral das séries anuais de <i>Rz</i> e <i>aa</i> menos sua tendência linear de aumento, obtidas através do método de múltiplo janelamento (MTM). (a) análise espectral da série anual de <i>Rz</i> sem sua tendência. (b) análise espectral da série anual de <i>aa</i> sem sua tendência. (c) e (d) apresentam os níveis de confiança dos períodos encontrados através da análise espectral das séries mensais de <i>Rz</i> e <i>aa</i> com confiança > que 95%.	74
4.15: Análise espectral das séries mensais de <i>Rz</i> e <i>aa</i> menos sua tendência linear de aumento, obtidas através do método de múltiplo janelamento (MTM). (a) análise espectral da série mensal de <i>Rz</i> sem sua tendência. (b) análise espectral da série mensal de <i>aa</i> sem sua tendência. (c) e (d) apresentam os níveis de confiança dos períodos encontrados através da análise espectral das séries mensais de <i>Rz</i> e <i>aa</i> com confiança > que 95%.	75

4.16: Médias anuais das séries temporais de Rz e aa e fração de dias por ano cujo pico da velocidade do vento solar foi maior que 500km/s ($Fpk500$ km/s) para o intervalo de 1966 a 2000.	81
4.17: Índice geomagnético aa^* estimado a partir de Rz e $Fpk500$ (linha grossa), e o índice aa observado (linha fina).	82
4.18: Regressão linear entre aa observado contra aa^* estimado (dado pela equação 4.2).	83
4.19: Índice geomagnético aa observado (linha pontilhada), e aa^* estimado em função de Rz e $Fpk500$ (linha cheia), $aa1$ estimado só em função de $Fpk500$ (linha vermelha), $aa2$ estimado só em função de Rz (linha verde), $aa3$ termo independente (linha azul).	86
4.20: Índice geomagnético aa^* estimado com Rz e $Fpk500$ em fase (linha grossa), e o índice aa observado (linha fina).	87
4.21: Séries anuais dos índices geomagnéticos aa , $-Dst$ e $AE/2$; série anual do número de manchas solares (Rz) e a fração anual de feixes de alta velocidade ($Fpk500$).	90
4.22: Médias anuais das séries temporais do aa e do $-Dst$ para o intervalo entre 1957 e 2000 (painel superior). Médias anuais das séries temporais do aa e do AE para o intervalo entre 1957 e 1987 (painel superior).	93
4.23: Índice geomagnético aa observado (linha cheia), e o índice aac estimado a partir do Dst e AE (linha grossa).	94
4.24: Índice geomagnético aa observado (linha preta), e aac estimado em função do Dst e AE (linha pontilhada).	95
4.25: Médias anuais das séries temporais do Ap e do $-Dst$ para o intervalo entre 1957 e 2000 (painel superior). Médias anuais das séries temporais do Ap e do AE para o intervalo entre 1957 e 1987 (painel inferior).	96
4.26: Índice geomagnético Ap observado (linha cheia), e o índice Ap_c estimado a partir do Dst e AE (linha grossa).	97
4.27: Índice geomagnético Ap observado (linha preta), e Ap^* estimado em função do Dst e AE (linha pontilhada).	98
4.28: Índice geomagnético $-Dst$ e a percentagem dos valores horários do Dst por ano com intensidades menores que -30 , -50 , -80 e -100 nT.	99
4.29: Percentagem dos valores horários do Dst por ano com intensidades menores que -30 , -50 , -80 e -100 nT, e o índice aa .	100
4.30: Fração de dias por ano com velocidade do vento solar maior que 500 km/s, e a série anual do número de manchas (Rz).	101
4.31: Séries anuais dos índices geomagnéticos AA e $-Dst$ e a Fração de dias por ano com velocidade do vento solar maior que 500 km/s.	102
4.32: Índice aa , percentagem dos valores horários do Dst por ano com intensidades menores que -30 , -50 , -80 e -100 nT, e o número anual de manchas solares (Rz).	103

LISTA DE TABELAS

2.1- Observatórios utilizados na computação do índice k_p	31
2.2: Amplitude equivalente de a_p para um dado k_p	32
2.3: Observatório usado para derivar o índice aa	33
2.4: Observatórios que fazem parte da obtenção do índice ae	34
2.5: Observatórios utilizados na computação do Dst	36
4.1: Correlação cruzada dos dados brutos e das médias corridas de $aaxR_z$	53
4.2: Intervalos de cada ciclo.....	56
4.3a: Correlações cruzadas ciclo a ciclo dos dados brutos e dos dados filtrados.....	61
4.3b: Correlações cruzadas ciclo a ciclo dos dados brutos e dos dados filtrados.....	61
4.4a: Períodos encontrados com os valores anuais brutos de R_z e aa (8 janelas).....	71
4.4b: Períodos encontrados com os valores mensais brutos de R_z e aa	72
4.5: Correlação cruzada das médias anuais dos dados brutos $aaxDst$, $aaxAE$, $ApxDst$, $ApxAE$, $DstxAE$ e $aaxAp$	85
4.6: Correlação cruzada das médias anuais de $R_zxFpk500$, R_zxaa , R_zxAE , R_zxAp , R_zxDst , $Fpk500xAA$, $Fpk500xAE$, $Fpk500xAp$, $Fpk500xDst$	86

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Desde a descoberta do campo magnético da Terra tem-se estudado a sua origem e comportamento. Com o avanço tecnológico, sensores têm sido desenvolvidos para medir as variações do campo magnético tanto no solo como no espaço. Com estas observações determinou-se a origem das variações sofridas pelo campo geomagnético, que são devidas a variações internas no núcleo líquido da Terra (variação secular) e externas que estão relacionadas à atividade solar e às condições do meio interplanetário (variações de curtos períodos) (KIVELSON e RUSSELL, 1995).

Este trabalho consiste em estudar a relação entre a atividade solar e a geomagnética. As atividades solar e geomagnética são perturbações causadas por alterações nos campos magnéticos do Sol e da Terra, respectivamente. Estas atividades estão ligadas através do meio interplanetário, onde se encontra o vento solar e o campo magnético a ele associado. Perturbações geradas no Sol produzem variações no meio interplanetário e estas por sua vez, geram perturbações no campo magnético terrestre (SUESS e TSURUTANI, 1998). Neste estudo, utilizaram-se dados solares e geomagnéticos de 1868 a 2000 para o propósito de analisar as características dos ciclos geomagnéticos, e suas relações com os ciclos solares. Comparações entre o número de manchas solares e índices geomagnéticos foram feitas para o intervalo em que os índices estão disponíveis e, com os dados do meio interplanetário para o período disponível de dados.

A atividade solar é um conjunto de perturbações transientes da atmosfera solar cuja ocorrência varia em função do chamado ciclo de atividade solar de 11 anos. O Sol, quando observado em alta resolução, por exemplo, em H_{α} ($\lambda=6563$), mostra regiões ativas que mudam dinamicamente. Estas regiões estão relacionadas ao campo magnético gerado pelo mecanismo de dínamo na zona de convecção. Nestas regiões encontram-se partes mais escuras que a superfície solar, e de intenso campo magnético chamadas manchas solares. Ocasionalmente, associados às manchas, ocorrem explosões solares e as proeminências. Estas perturbações estão

relacionadas ao ciclo de atividade solar, o qual é medido pelo número de manchas solares. O número das manchas indica a escala temporal do surgimento através da superfície solar de áreas de forte fluxo magnético. O estado do ciclo é dado pelo número de manchas solares ou número de Wolf (R_z), que apresenta uma periodicidade média em torno de 11 anos (PRIEST, 1987; HOYT e SCHATTEN, 1997).

A atividade geomagnética é um conjunto de perturbações no campo magnético da Terra, causada por sistemas de correntes existentes na Magnetosfera e Ionosfera. A origem destas perturbações deve-se à interação de partículas carregadas do vento solar e do campo magnético interplanetário, com o campo magnético da Terra. A atividade magnética apresenta-se de várias maneiras, entre elas estão a variação solar quieta que é gerada pelo dínamo ionosférico, as subtempestades, que são geradas devido à injeção de partículas na cauda da magnetosfera e a subsequente deriva das mesmas para regiões aurorais intensificando os eletrojetos aurorais e as tempestades magnéticas, geradas pela energização da corrente de anel (KIVELSON e RUSSELL, 1995).

O meio interplanetário é definido como sendo a região que se estende do Sol até o meio Interestelar. Perturbações de origem solar causam variações no meio interplanetário, tais como variações na densidade, na velocidade etc., do vento solar e no campo magnético interplanetário. Essas variações por sua vez, ao atingirem a magnetosfera terrestre, geram perturbações nas correntes magnetosféricas e ionosféricas, alterando o campo geomagnético. A atividade solar é responsável por diversas perturbações no campo geomagnético que podem ser recorrentes ou transientes. Portanto, para se entender melhor as variações do campo geomagnético, faz-se necessário compreender a interação Sol-Terra (e.g., GOSLING, 1993; GONZALEZ et. al., 1994; KIVELSON e RUSSELL, 1995; SUESS e TSURUTANI, 1998; RICHARDSON et. al., 2000).

Dentro deste contexto, pretende-se com este trabalho contribuir para uma melhor compreensão da relação Sol-Terra e para que se possa estimar como serão as relações nos próximos ciclos solares e quais as possíveis conseqüências que poderão ocorrer na Terra devido aos fenômenos ocorridos no Sol. Da compreensão dos fenômenos e efeitos ocorridos da interação do meio interplanetário com a Terra,

que é um planeta magnetizado, pode-se ter conhecimento do que ocorre em outros planetas magnetizados, devido à interação de partículas carregadas, campos elétricos e magnéticos provenientes de várias fontes.

O objetivo deste trabalho é o estudo das relações entre atividade solar e geomagnética, através dos índices que as caracterizam e das relações dos índices geomagnéticos entre si. Para este fim, analisou-se qual é o comportamento da atividade geomagnética, através do índice *aa*, no decorrer dos ciclos solares para o período de 1868 a 2000, utilizando suas séries temporais anuais e mensais. Fez-se também uso das médias corridas de 11 e 22 anos, para ver qual é a variação de longo período, bem como dos dados filtrados de 9 a 13 anos. Outras análises importantes que foram feitas são: a correlação cruzada entre as séries temporais ciclo a ciclo para obter-se o coeficiente de correlação e a defasagem, e a análise espectral utilizando o método de janelamento múltiplo para obter-se os períodos significativos das séries, para depois relacioná-las como causa e efeito.

No Capítulo 2 é apresentada a base teórica relacionada ao trabalho desenvolvido, através de uma revisão bibliográfica da atividade solar, atividade geomagnética e do meio interplanetário, e também dos índices que as caracterizam.

No Capítulo 3 é feita uma descrição da metodologia empregada para a análise dos dados.

No Capítulo 4 apresentam-se os resultados obtidos e as possíveis explicações para os mesmos. Finalmente, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões e considerações sobre o trabalho.

CAPÍTULO 2

INTERAÇÃO SOL-TERRA

Neste Capítulo é feita uma abordagem da teoria que esta relacionada com os estudos que foram desenvolvidos para a elaboração do trabalho. É feita uma descrição da atividade solar e seus fenômenos, bem como da atividade geomagnética e seus fenômenos e, como estas estão relacionadas entre si.

2.1 Atividade Solar

A emissão de energia do Sol em todas as suas formas não é constante, ela varia tanto no tempo (segundos a séculos) quanto com a posição do Sol. Quando se observa o Sol em alta resolução, em comprimentos de onda em $H\alpha$ ou raio-x, a fotosfera e também a atmosfera solar revelam estruturas que mudam dinamicamente de muitas maneiras. Estas estruturas são observadas em todas as latitudes no disco e em todos os níveis na atmosfera, e elas se manifestam em todas as regiões do espectro eletromagnético. A atividade solar tem influência sobre a distribuição dos campos magnéticos e partículas carregadas no meio interplanetário e tem importantes consequências no estado físico da atmosfera superior da Terra e para a atividade geomagnética (PRIEST, 1987).

A camada de convecção completa o transporte de energia e de sua irradiação do centro do Sol para o espaço pela fotosfera, e mais importante para o vento solar, ela determina as escalas temporais e espaciais da estrutura do campo magnético coronal que controla as propriedades do vento solar (“Russell, Tutoriais na Internet”). O campo magnético é gerado pelo processo de dínamo na zona convectiva. Deste campo resultam as manchas solares, “solar flares”, ejeção de massa coronal (*Coronal Mass Ejections - CME*) e outros tipos de atividade magnética, bem como o ciclo solar. Os ciclos solares são variações periódicas na atividade, com uma duração dentro de um período médio de 11 anos. Estas características resultam quando o campo magnético na superfície do Sol ganham intensidade suficiente para inibir o fluxo de calor convectivo do interior do Sol (HOYT e SCHATTEN, 1997).

As regiões ativas são altamente dinâmicas, com atividade contínua e com um amplo intervalo de fluxos eletromagnéticos e de partículas. Elas aparecem como regiões claras de emissão no cinturão equatorial dentro de $\pm 30^\circ$ de latitude do equador solar e representam concentrações moderadas de fluxo magnético com campo médio de 10^{-2} T ou mais. Dentro de regiões ativas se encontram regiões mais escuras de intenso campo magnético, as manchas solares. A presença na fotosfera de manchas solares caracteriza a fase mais intensa de uma região ativa (PRIEST, 1987).

As manchas solares são manchas negras vistas na fotosfera do Sol, porque elas são mais frias, em contraste com as regiões vizinhas que as rodeiam, tipicamente ocorrendo em grupos. O resfriamento ocorre localmente, porque o campo magnético inibe a convecção e assim permite a temperatura da manchas tornar-se mais baixa. As manchas solares apresentam uma região central escura conhecida por *umbra*, que apresenta um campo magnético vertical com intensidade de 0.2 a 0.3 T, e às vezes estão rodeadas por uma região mais clara chamada de *penumbra* (ZIRIN, 1988; KIVELSON e RUSSELL, 1995).

Próximo às manchas solares existe ocasionalmente uma região brilhante de intensa emissão de energia, as explosões solares (“solar flares”), que representam violenta instabilidade de parte do campo magnético da região ativa, resultando na liberação e emissão de grande quantidade de energia, radiação e partículas carregadas de alta energia. Além disso, em torno das regiões ativas, aparecem fitas finas e negras no disco, observadas em $H\alpha$ ($\lambda=6563$), e brilhantes no limbo quando observadas em eclipses ou através de coronógrafos, chamadas de filamentos e proeminências, respectivamente. As proeminências são localizadas na coroa, mas possuem temperaturas centena de vezes menor e densidade centena ou até mil vezes maior do que os valores da coroa. Elas envolvem uma variedade de escalas temporais (PRIEST, 1987; KIVELSON e RUSSELL, 1995).

A distribuição das manchas solares varia com periodicidade média de 11 anos. Proeminências podem durar 200 dias, ao passo que um grande grupo de manchas pode durar metade do tempo e “Solar Flares” duram minutos a horas. Estas mudanças estão relacionadas ao ciclo de atividade solar o qual é tradicionalmente medido pelo número de manchas solares (e.g., PRIEST, 1987; PARKS, 1991; KIVELSON; RUSSELL, 1995; BURLAGA, 1995; HOYT; SCHATTEN, 1997). O

estado do ciclo solar é medido pela contagem do número individual de manchas (f), e grupos de manchas(g) visível no disco que combinados fornecem o número de *Wolf* ou de Zurich, também chamado número internacional;

$$R_z = K(10g + f), \quad (2.1)$$

onde K é um fator de normalização para um observador. O número de Wolf tem um comportamento cíclico. Com exceção das granulações, quase todas as características observáveis na atmosfera solar devem sua existência ao campo magnético, isto é, elas representam diferentes maneiras em que o plasma solar está respondendo ao desenvolvimento do campo magnético, do qual as manchas solares são o exemplo mais intenso. Logo não é surpreendente, portanto, que todas essas características, tal como as proeminências e as explosões solares, também variam em fase com o ciclo das manchas solares; elas não têm caráter puramente local, mas são forçadas por alguma espécie de oscilação magnética global no interior solar (PRIEST, 1987; HOYT e SCHATTEN, 1997). A Figura 2.1 apresenta a série de R_z , em médias anuais, desde 1700.

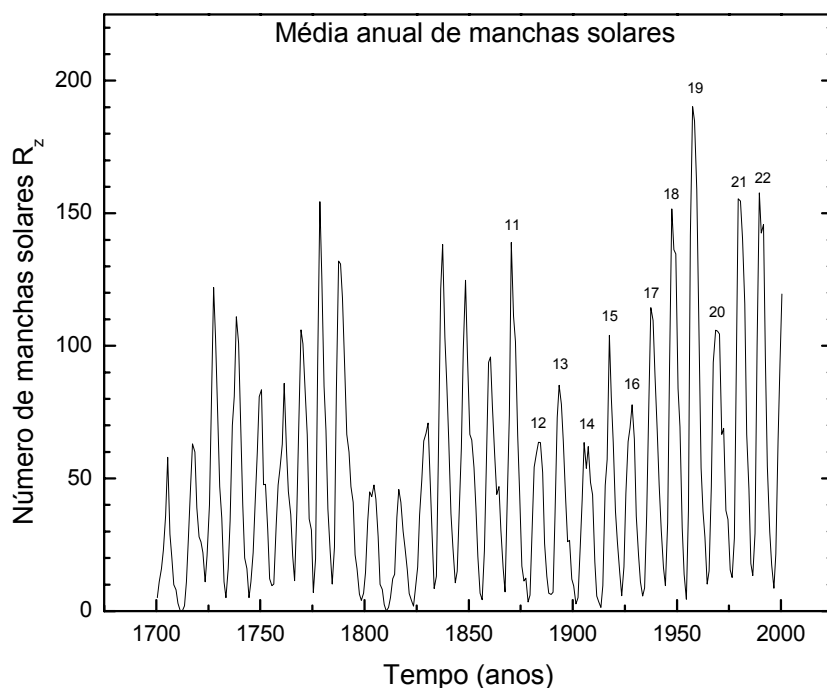


Figura 2.1: Variação na média anual do número de manchas solares, mostrando os ciclos solares e um possível período de longa duração.

O ciclo das manchas solares apresenta uma considerável variação no período de aproximadamente 11 anos. Por exemplo, entre 1750 - 1958 a média temporal entre os máximos foi de 10.9 anos, com um intervalo de 7.3 a 17.1 anos; ao passo que o período médio entre os mínimos foi de 11.1 anos, com uma variação entre 9 a 13.6 anos. Outra característica do ciclo é que o tempo de aumento do mínimo para o máximo é menor do que o de declínio para o mínimo novamente: a média no tempo de aumento é de 4.5 anos, enquanto o tempo de decaimento é 6.5 anos, com a assimetria temporal entre a fase ascendente e a descendente sendo maior quanto maior o máximo. Também, um amplo intervalo no valor de máximo e mínimo na amplitude das manchas solares é encontrado (PRIEST, 1987).

Variações de curto período no número de manchas solares têm magnitudes consideráveis e parecem ocorrer de forma aleatória, embora uma variação de 27 dias esteja presente; isto corresponde ao período de rotação do Sol e é causado parcialmente pela persistência de grandes manchas solares por mais de uma

rotação, e parcialmente pelas longitudes preferidas para seu aparecimento. Uma tendência pode ser vista na Figura 2.1 pelos picos do número de manchas solares variar a cada sete ou oito ciclos (picos altos e baixos), o que sugere que um longo ciclo pode estar acontecendo – ciclo de Gleissberg de aproximadamente 90 anos (PRIEST, 1987; KIVELSON e RUSSELL, 1995).

Alguns fatos observacionais intrínsecos sobre grupos de manchas bipolares são que a polaridade das manchas é a mesma, para todo um ciclo de 11 anos, revertendo seu sentido no início do novo ciclo. Esta regra da polaridade das manchas solares foi proposta por Hale e Nicholson em 1925 e foi mostrado que ela é obedecida por 97% dos grupos de manchas solares. Dois ciclos de manchas solares são necessários para o Sol retornar ao mesmo estado de polaridade, resultando numa periodicidade de 22 anos que é conhecido como ciclo de Hale (PRIEST, 1987).

Em função de a atividade solar variar com o período de 11 anos, as estruturas do meio interplanetário e o campo magnético interplanetário também variam sistematicamente com este mesmo período. Com o congelamento das linhas de campo ao plasma, devido ao fato do vento solar ser altamente condutor, o campo magnético do Sol é arrastado com o vento solar ao longo do meio interplanetário, cuja intensidade próxima a Terra é da ordem de 5 nT. O vento solar e o campo magnético interplanetário (*Interplanetary magnetic field - IMF*) interagem com o campo magnético terrestre configurando uma região chamada magnetosfera. Perturbações no campo magnético interplanetário podem ser causadas por fenômenos solares como buracos coronais, explosões solares e ejeções de massa coronal, e assim propiciar alterações no campo magnético terrestre. As explosões solares e as ejeções de massa coronal são formas de atividade solar de pequena duração, mas cujas frequências seguem o ciclo de atividade solar (PARKS, 1991; KIVELSON e RUSSELL, 1995).

Dentre os fenômenos acima relacionados à atividade solar e que estão ligados as principais variações no meio interplanetário e conseqüentemente com as variações no geoespaço são as ejeções de massa coronal (*Coronal mass ejections - CMEs*) e os buracos coronais (GONZALEZ et al., 1992; RICHARDSON et al., 2000; VENNERSSTROEM, 2001).

Uma ejeção de massa coronal é um fluxo de plasma para fora da coroa solar ou através dela. Elas estão freqüentemente, mas nem sempre, associadas com proeminências eruptivas, desaparecimento de filamento solar e “flares” (SUESS e TSURUTANI, 1998). As CMEs ao serem liberadas levam consigo grande quantidade de plasma e campo magnético apresentando diferentes configurações (WEBB et al. 2001). A Figura 2.2 apresenta a freqüência de ocorrência de CMEs sobre o ciclo solar de 1973 a 1989, cobrindo o ciclo 21 das manchas solares e a fase ascendente e máxima de ciclo 22.

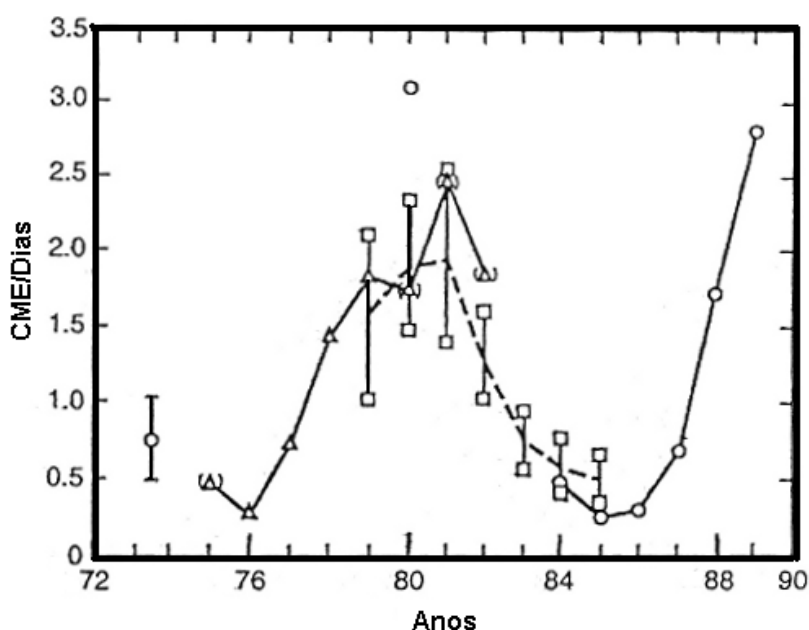


Figura 2.2: Taxa de ocorrência de CMEs durante o período de 1973 a 1989. Dados correspondem a coronógrafos na *Skylab* e *SMM* (círculos), e satélite *Solwind* (quadrados), e fotômetros no *Helios 1* e *2* (triângulos). Duas taxas do *Solwind* são dadas, para todas as CMEs e uma mais baixa somente para CMEs maior (quadrados).

Fonte: Adaptada de Bravo et al. (1998, p. 51).

Estes eventos transientes, que é a componente não-periódica da atividade solar, de breve duração e com amplitude maior do que a atividade quieta segue o número de manchas solares.

Foi documentado por Gosling et al. (1991) que ejeções de massa coronal interplanetárias rápidas são a causa de quase todas as grandes tempestades não

recorrentes, mas também que somente um sexto de todas as CMEs interplanetárias direcionadas para a Terra produz grandes tempestades, em virtude destas não gerarem campos magnéticos interplanetários para o sul de grande intensidade e longa duração (GONZALEZ et al., 1999; VENNERSTROEM, 2001). Como a entrada de energia na magnetosfera é dependente da orientação do campo magnético interplanetário, é interessante saber qual é a taxa com que esta orientação se apresenta no decorrer do tempo. As nuvens magnéticas são classificadas como tendo polaridade SN se o campo magnético rota do sul para o norte e NS se o campo magnético rota de norte para sul. A Figura 2.3 apresenta a variação da polaridade do campo magnético interplanetário considerando um grupo de CMEs, as nuvens magnéticas.

Uma nuvem magnética é uma região de campos magnéticos intensos e lentamente variantes, com beta de plasma, que é a razão da pressão térmica pela pressão magnética, e temperatura de prótons muito baixos (BURLAGA, 1995). O campo magnético freqüentemente apresenta uma rotação de direção, e forma um gigantesco cordão de fluxo (*flux rope*) formado por correntes alinhadas ao campo.

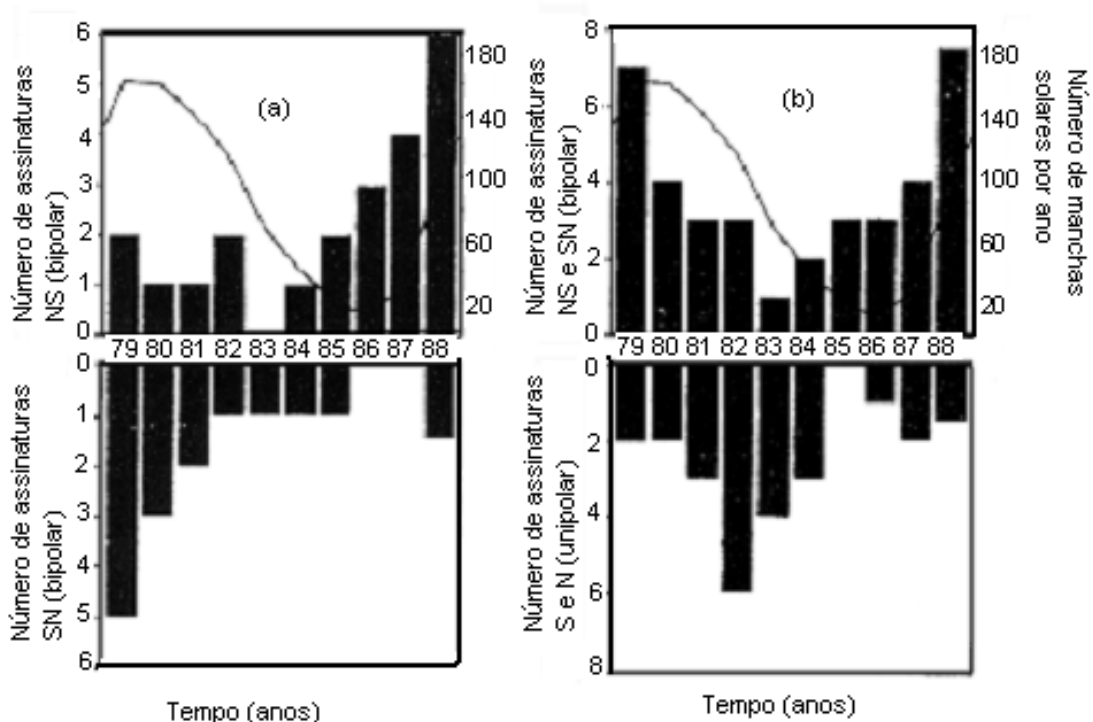


Figura 2.3: A) Distribuição da freqüência anual das nuvens magnéticas com polaridades NS e SN quando o campo magnético polar solar reverte. B) Distribuição da freqüência anual das nuvens magnéticas com assinaturas de B_z bipolar e unipolar durante a última metade do ciclo 21 e início de ciclo 22. A linha representa o n° . de manchas solares.

Fonte: Mulligan et al. (2000, p. 803).

Os buracos coronais são regiões estendidas da coroa solar. Estas regiões são caracterizadas pela densidade excepcionalmente baixa e um campo magnético fotosférico tendo topologia de campo magnético aberto. Os buracos coronais são grandes e muito estáveis próximos aos pólos solares, e são uma fonte do vento solar de alta velocidade (700-800km/s). Os buracos coronais são visíveis em vários comprimentos de onda, mais notáveis em raios-X solares, visíveis somente do espaço, mas também na linha espectral 1083 nm do He, que é detectável na superfície da Terra. Em imagem de raios-X moles (energia do fóton de aproximadamente 0.1- 1.0 kev ou um comprimento de onda de 10-100 Å), estas regiões são escuras, originando assim o nome “buracos” (SUESS e TSURUTANI, 1998). O tamanho e a posição dos buracos coronais mudam durante todo o ciclo

solar. Durante o mínimo existem grandes buracos coronais concentrados sobre os pólos do Sol, possivelmente com uma extensão em baixas latitudes. Com o progresso do ciclo da atividade solar, os buracos coronais polares crescem menos e buracos coronais de média e baixa latitude começam a aparecer, entrando na zona das regiões ativas (BRAVO et al., 1998). Na Figura 2.4 é mostrada a distribuição dos buracos coronais de baixas latitudes no decorrer do ciclo solar 21, onde se observa a existência de dois picos, um antes do máximo do ciclo das manchas solares e outro depois.

Um fato aceito, é que buracos coronais coincidem com feixes de altas velocidades no vento solar e distúrbios geomagnéticos recorrentes produzidos por eles. A conexão direta das linhas de campo no vento solar permite estas altas velocidades (ZIRIN, 1988).

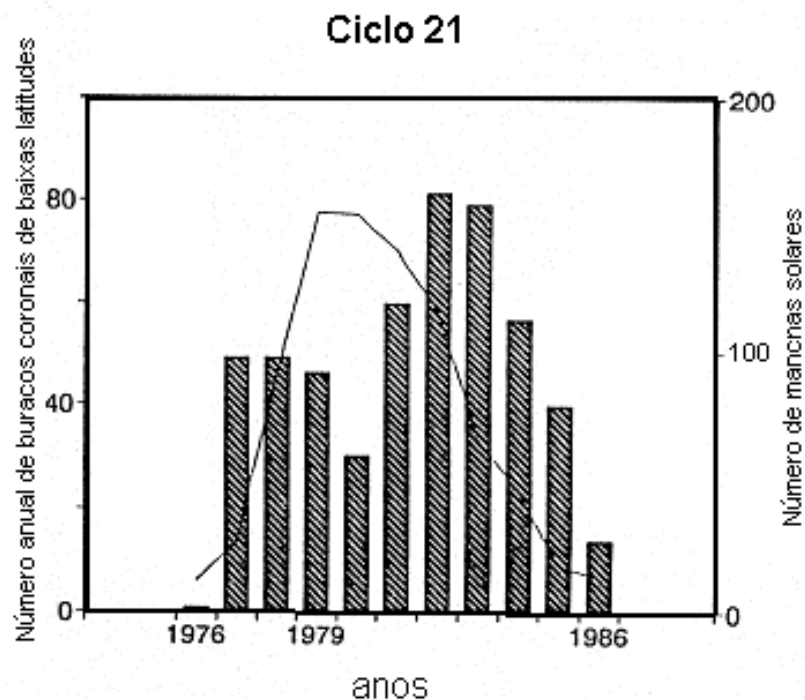


Figura 2.4: Número anual dos buracos coronais de baixas latitudes (dentro de $\pm 30^\circ$) para o ciclo solar 21 junto com a curva suavizada do número de manchas Solares.

Fonte: Gonzalez et al. (1996, p. 2576).

2.2 Atividade Geomagnética

O campo magnético medido na superfície da Terra é a superposição de vários campos, cada qual com origem e variações temporais diversas. A principal contribuição provém do interior da Terra, originada pelo movimento de metais líquidos que através do mecanismo de dínamo geram correntes elétricas no núcleo. Também contribuem, porém com menor intensidade, as correntes formadas no plasma que, acima da atmosfera neutra, na ionosfera e magnetosfera, circundam a Terra, além das correntes induzidas e do material existente na crosta terrestre (MERRIL e MCELHINNY, 1983; PARKINSON, 1983).

O vento solar interage com o campo magnético terrestre, originando a magnetosfera, e transfere para ela energia que controla as correntes formadas no plasma e conseqüentemente as perturbações magnetosféricas, aurorais e ionosféricas (BAKER, 2000). Essas perturbações podem ser manifestadas por mudanças na luminosidade da aurora e pela miríade de fenômenos que recebem o termo de atividade magnética (GONZALEZ et al., 1994; BAKER, 2000). A Figura 2.5 apresenta um esquema do sistema Sol-Meio Interplanetário-Magnetosfera Terrestre, indicando os principais eventos responsáveis pelo mecanismo de acoplamento de energia vento solar-magnetosfera. À esquerda tem-se uma representação do Sol emitindo uma estrutura – uma ejeção de massa coronal –, injetando um pulso transiente de material com campo magnético e plasma perturbado no vento solar. O esquema do meio representa a estrutura propagando-se no vento solar, com o qual interage, sofrendo efeito de arraste e perturbando o campo magnético interplanetário de fundo (*background*). À direita tem-se a magnetosfera da Terra. No caso do campo magnético interplanetário apresentar um componente para o sul intenso e de longa duração, a reconexão magnética com o campo geomagnético da magnetopausa é facilitada (DUNGEY, 1961; KIVELSON e RUSSELL, 1995; SUESS e TSURUTANI, 1998; Gonzalez et al., 1999), e uma maior quantidade de plasma solar entra na magnetosfera terrestre, intensificando a convecção magnetosférica de plasma e provocando o surgimento de sub-tempestades e de tempestades magnéticas. A reconexão magnética é a conexão das linhas do campo magnético terrestre com as linhas do campo magnético interplanetário.

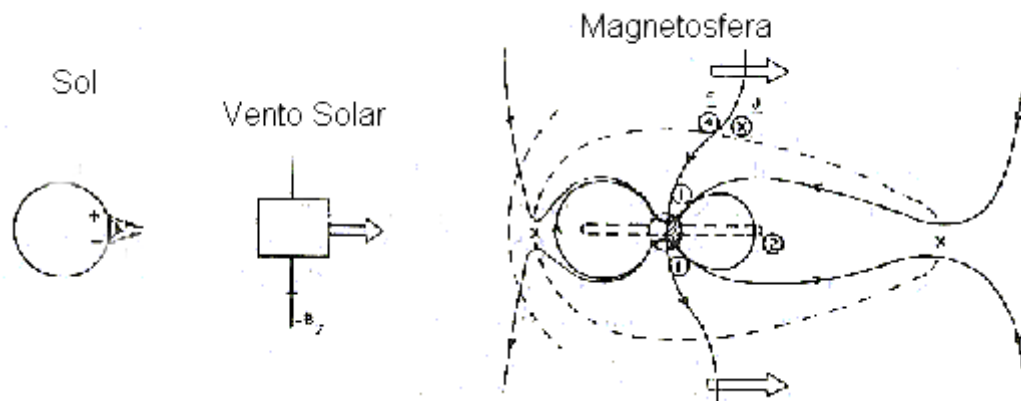


Figura 2.5: Esquema do sistema Sol-Vento Solar-Magnetosfera Terrestre, mostrando o acoplamento meio interplanetário – magnetosfera através do processo de reconexão magnética.

Fonte: Gonzalez et al. (1999, p. 531).

Em altitudes ionosféricas, correntes elétricas tais como o eletrojato equatorial e o eletrojato auroral, entre outras, são fontes de campo magnético. Em aproximadamente $3-5R_T$, partículas derivando próximo aos cinturões de radiação de Van Allen, produzem uma corrente na direção oeste chamada corrente de anel, que dependendo da energia total das partículas, reduz a componente horizontal do campo da superfície. No lado diurno da Terra, em distâncias de $10-15R_E$, no limite entre o IMF e o campo geomagnético principal, existe uma fina lâmina de corrente, a corrente da magnetopausa. A corrente na magnetopausa quase confina inteiramente o campo magnético da Terra, a magnetosfera. Perturbações tangenciais entre o vento solar e o campo da Terra arrastam as linhas de campo da Terra e o plasma na direção noturna, formando uma longa cauda magnética na magnetosfera no lado oposto ao Sol. Este processo produz outra corrente chamada corrente da cauda, que flui através do meridiano da meia noite na mesma direção da corrente de anel. Seu principal efeito na superfície da Terra é de reduzir o campo total. A Figura 2.6 mostra alguns sistemas de correntes de larga escala que fluem na magnetosfera.

Todas as correntes acima da ionosfera são controladas pelo vento solar. Dois parâmetros importantes de controle são a pressão dinâmica, que depende da velocidade e densidade de vento solar, e o componente amanhecer-anoitecer do campo elétrico (E_y), que depende da velocidade e do campo magnético norte-sul.

Quando qualquer destas variáveis muda, correspondentes mudanças na intensidade, localização e distribuição das correntes acontecem. Mudanças nas correntes são refletidas por mudanças no campo magnético na superfície da Terra. Tais mudanças são chamadas de atividade geomagnética (KIVELSON e RUSSELL, 1995).

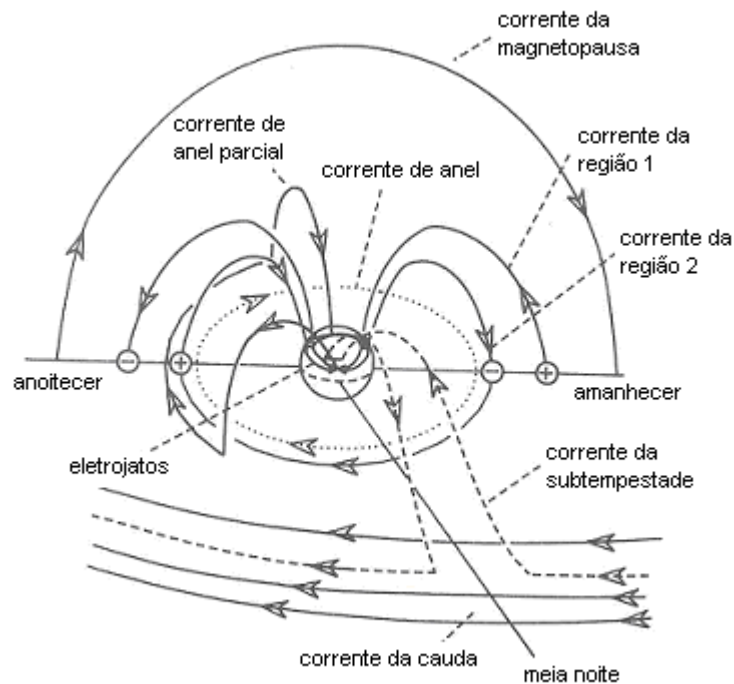


Figura 2.6: Representação esquemática de vários sistemas de correntes ligando as correntes magnetosféricas e ionosféricas, responsáveis pela atividade magnética.

Fonte: Kivelson e Russell, (1995, p. 409).

A atividade geomagnética, como um todo, é conhecida por ser caracterizada por uma típica variação sazonal de forma de onda semi-anual, com máximo em torno dos equinócios e mínimo próximos aos solstícios (e. g., RUSSELL e MCPHERRON, 1973; GONZALEZ et al., 1994). A Figura 2.7 mostra a distribuição dos dias para 1868 até 1998, para diferentes níveis de intensidade do índice *aa*, onde se observa a variação semi-anual.

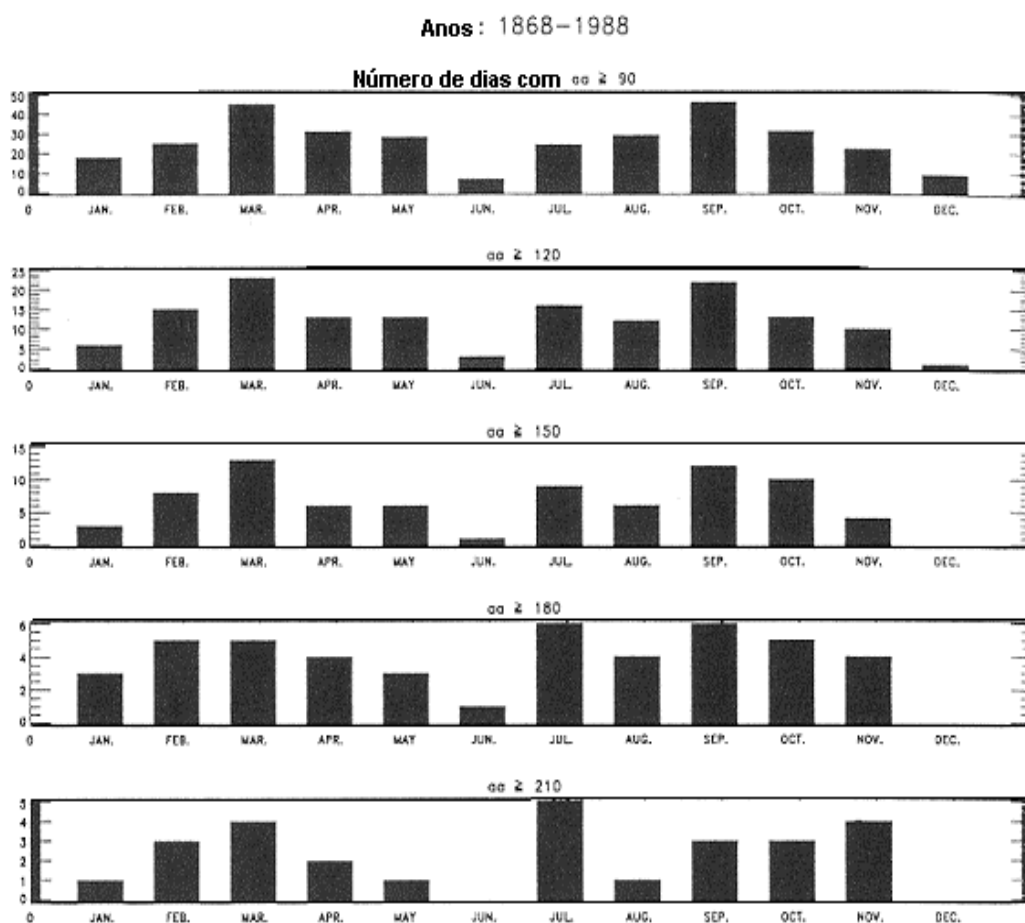


Figura 2.7: Número mensal de dias com aa excedendo os níveis de 90, 120, 150, 180 e 210, para o intervalo de tempo de 1868-1998.

Fonte: Gonzalez et al. (1999, p. 554).

Dentre as atividades geomagnéticas, as que mais se destacam são as Tempestades e Subtempestades magnéticas.

As tempestades magnéticas ou geomagnéticas foram denominadas como as perturbações que apresentavam grande decréscimo da componente horizontal do campo da Terra, em baixas latitudes (KAMIDE et al., 1998). O sinal característico de uma tempestade magnética é a depressão da componente H do campo geomagnético durando por várias dezenas de horas. Esta depressão é causada pela corrente de anel circulando a Terra na direção para oeste e pode ser monitorada pelo índice Dst (SUGIURA, 1964). A magnitude da tempestade magnética pode ser definida pelo valor mínimo do índice Dst (GONZALEZ et al., 1994). O quadro de uma tempestade envolve um repentino aumento positivo na componente H do campo (começo súbito de tempestade) seguido de um período arbitrário durante o qual o

campo elevado não muda substancialmente (fase inicial). A seguir tem-se uma redução da componente H do campo magnético (a fase principal) durante algumas horas e culminando com uma lenta fase de recuperação que pode durar várias dezenas de horas. A fase inicial e o começo súbito não estão sempre presentes em tempestades magnéticas, as quais são caracterizadas sempre pela presença da fase principal e de recuperação (GONZALEZ et al., 1994; KAMIDE et al., 1998). A Figura 2.8 apresenta um exemplo da variação do índice *Dst* durante uma tempestade geomagnética, para o período de 14-22 de outubro de 1995. A tempestade apresenta todas as características de uma tempestade geomagnética típica: o impulso súbito, a fase inicial, a fase principal e a fase de recuperação.

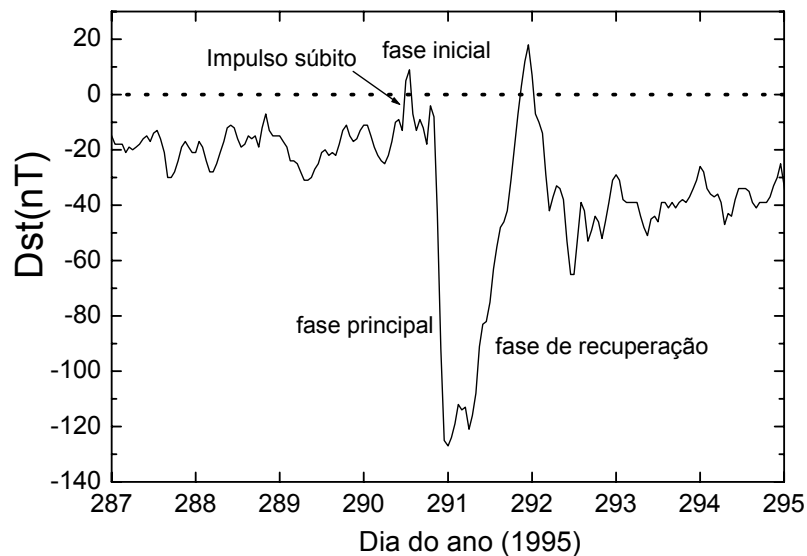


Figura 2.8: Exemplo da variação do índice *Dst* durante uma tempestade geomagnética, período de 14-25 de outubro de 1995.

Gonzalez et al. (1990) mostraram que a ocorrência de tempestades intensas (pico $Dst < -100$ nT) tendem a mostrar dois picos dentro do ciclo solar, o primeiro um pouco antes ou no máximo solar e outro 2 a 3 anos após o máximo solar. A Figura 2.9a é um exemplo de uma distribuição de pico duplo das tempestades intensas para o ciclo solar 21, e a Figura 2.9b apresenta a distribuição no ciclo solar do campo *Bz* com intensidades < -10 nT e duração > 3 horas similar a distribuição de pico duplo durante o ciclo solar 21 (GONZALEZ et al., 1994).

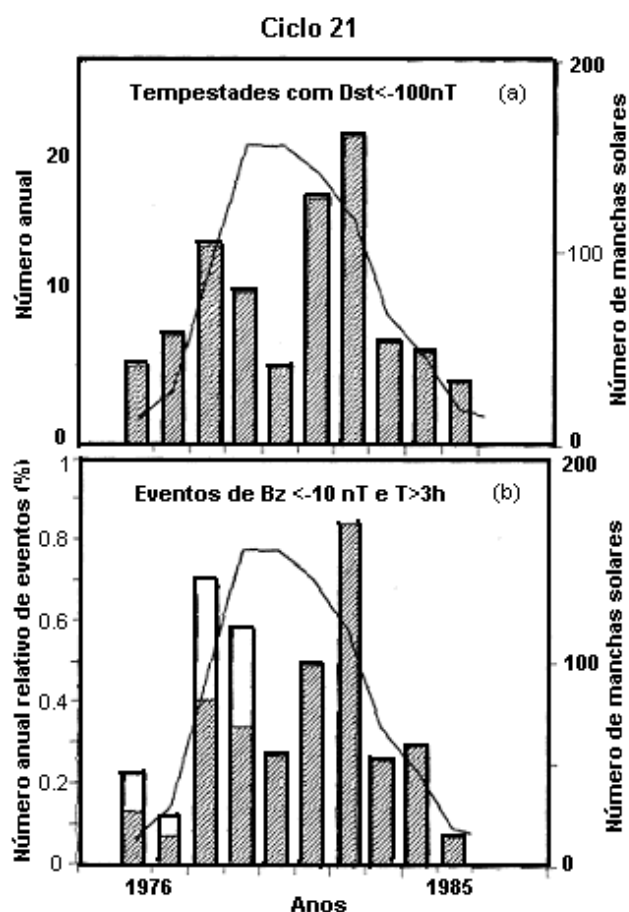


Figura 2.9: a) Distribuição de pico duplo das tempestades intensas (pico de $Dst < -100$ nT) para o ciclo 21. b) Distribuição correspondente de pico duplo do campo Bz com amplitude < -10 nT e duração $T > 3$ h. (Número relativo anual de eventos). Barras em branco são valores corrigidos depois que estes intervalos foram normalizados para a cobertura dos dados de satélites disponíveis.

Fonte: Adaptada de Gonzalez et al. (1994, p. 5780).

Uma subtempestade magnética é um processo transiente iniciado no lado noturno da Terra no qual uma significativa quantidade de energia derivada da interação do vento solar-magnetosfera é depositada na ionosfera auroral e magnetosfera (GONZALEZ et al., 1994). Durante uma subtempestade isolada, a magnetosfera submete-se a uma seqüência distinta de mudanças no seu campo magnético e plasma, associado com mudanças no sistema de correntes aurorais. Uma subtempestade apresenta três fases distintas que estão associados aos índices AU (Limite superior das medidas dos magnetômetros que compõem o índice AE) e AL

(Limite inferior das medidas dos magnetômetros que compõem o índice *AE*). A fase de crescimento de uma subtempestade geomagnética é o intervalo de tempo que antecede o início de expansão, durante o qual a energia extraída do vento solar é armazenada na magnetosfera. A fase de expansão corresponde a liberação da energia armazenada e a fase de recuperação é o retorno da magnetosfera ao seu estado inicial (KIVELSON e RUSSELL, 1995). A Figura 2.10 ilustra os três estágios de uma subtempestade em termos dos índices *AU* e *AL*.

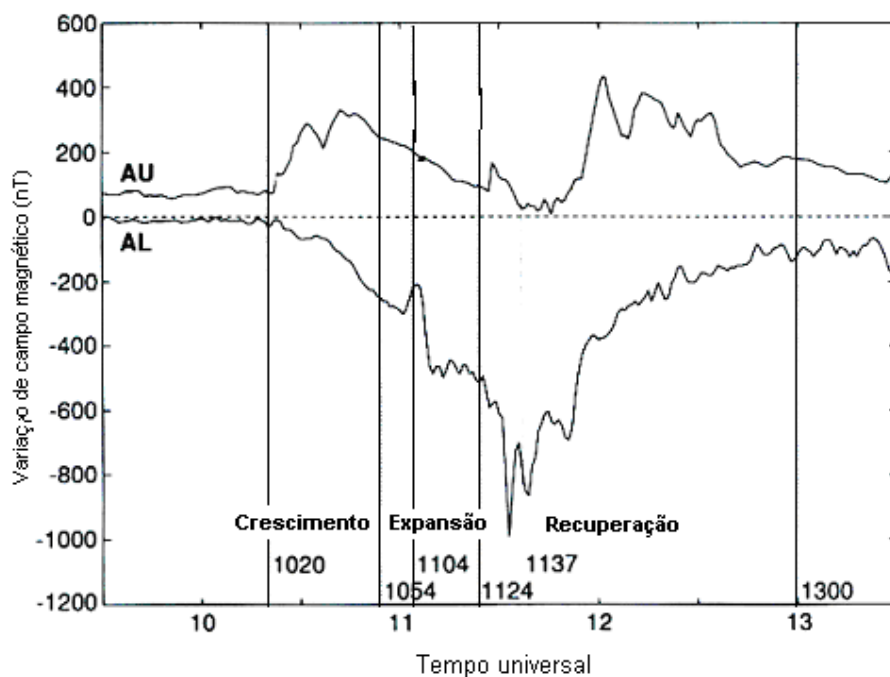


Figura 2.10: Os índices *AU* e *AL* para uma subtempestade particular. Observam-se claramente três fases de uma subtempestade.

Fonte: Adaptada de Kivelson e Russell (1995, p.428).

Embora o Sol seja a causa original de quase toda a atividade geomagnética, o principal meio pelo qual ele exerce sua influência é o vento solar e o campo magnético interplanetário. A interação do vento solar com o campo magnético da Terra causa perturbações nas correntes, causando variações no campo geomagnético. Para se prever as tempestades geomagnéticas, é de vital importância conhecer suas causas no Sol e no vento solar.

Apesar da relação entre a atividade solar e a atividade geomagnética não ser simples, pode-se observar que a atividade geomagnética se intensifica com a

intensificação da atividade solar (e.g., CLÚA DE GONZALEZ et. al., 1993; KIVELSON e RUSSELL, 1995; SUESS e TSURUTANI, 1998; GONZALEZ et. al., 1999; RICHARDSON et. al., 2001; GONZALEZ et. al., 2000; ECHER et. al., 2001).

A Figura 2.11 apresenta as médias anuais de R_z e do índice aa , o qual é o índice geomagnético disponível por um período mais longo (desde 1868).

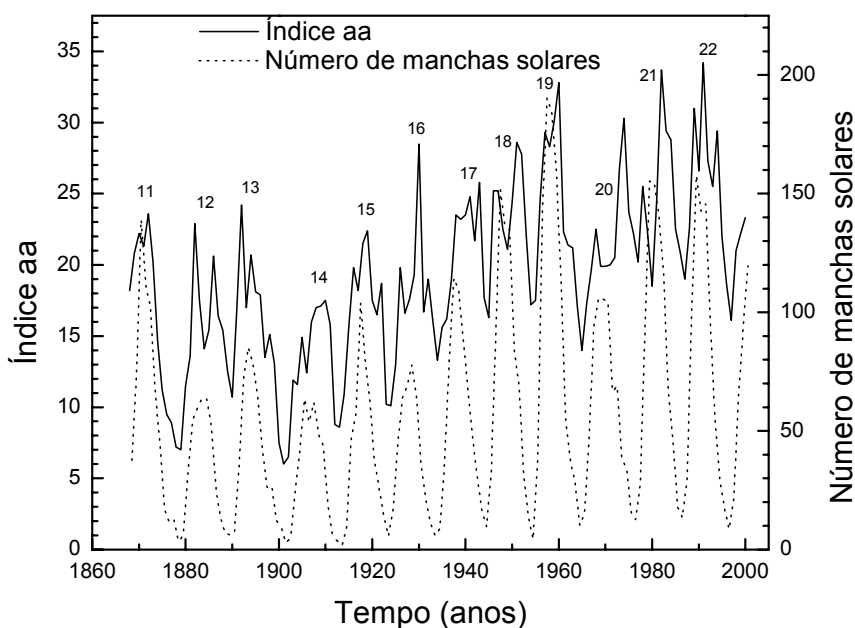


Figura 2.11: Média anual de 1868-1998 do número de Wolf do número de manchas solares e do índice geomagnético aa .

2.3 Índices de Atividade Geomagnética

O estudo da relação da atividade geomagnética devido as variações ocorridas no Sol utiliza medidas do campo magnético da Terra feita por instrumentos chamados magnetômetros. Medidas magnéticas de várias localizações distribuídas sobre o globo terrestre de como a atividade magnética varia, são complexas e volumosas para serem manipuladas facilmente. Índices magnéticos foram desenvolvidos para substituir esses dados (KIVELSON e RUSSELL, 1995). Alguns dos índices mais comumente utilizados e de interesse para este trabalho são os índices aa , A_p , AE (*Auroral Electrojet*), e Dst (*Disturbance Storm Time*). A distribuição global dos

observatórios magnéticos utilizados nas derivações dos índices geomagnéticos *aa*, *Ap*, *AE*, *Dst* e *Kp* são representada na Figura 2.12.

Basicamente, o objetivo de um índice é fornecer informações de uma maneira contínua a respeito de fenômenos mais ou menos complexos que variam com o tempo; isto significa que um índice é constituído por um conjunto de valores discretos, e cada um deles caracteriza o fenômeno sobre consideração para um intervalo de tempo constante.

Um dado índice pode ser utilizado para duas finalidades: para estudar o próprio fenômeno, ou como referência para o estudo de um fenômeno associado. E ainda, se a série de índices for homogênea no tempo e representa significativamente o fenômeno, ela torna-se uma ferramenta para estudos estatísticos com respeito às variações temporais do fenômeno ou suas relações com outros fenômenos (MAYAUD, 1980).

Mapa geomagnético mundial na qual são indicadas as posições das estações pertencentes a diferentes rede usadas na derivação dos índices geomagnéticos.

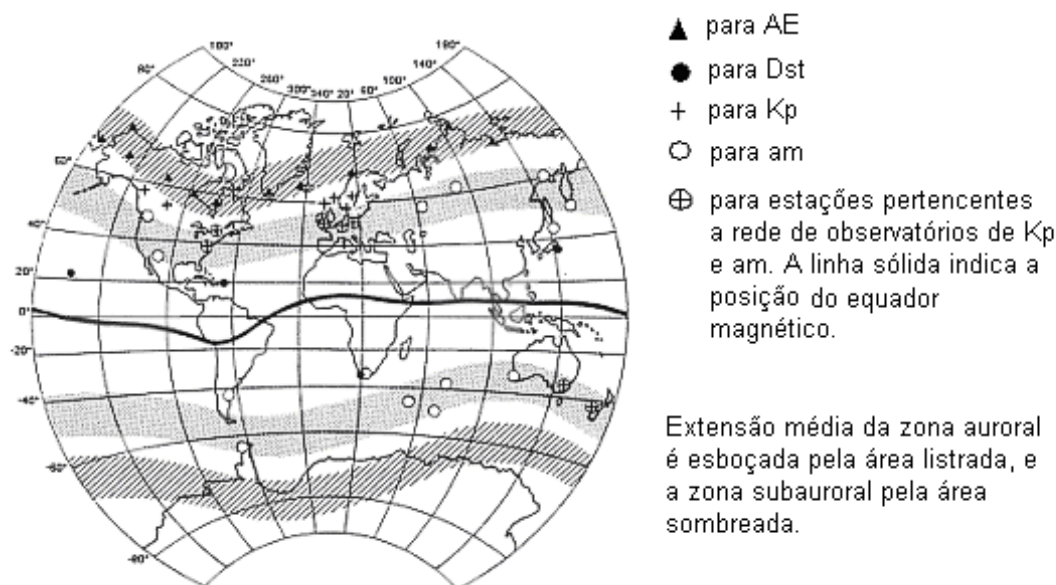


Figura 2.12: Rede mundial de observatórios magnéticos (ano de 1993).

Fonte: International Service of Geomagnetic Indices (I.S.G.I).

2.3.1 Índice k_p e A_p

O índice planetário a_p é um índice da intensidade da atividade magnética em uma escala linear derivado do índice K_p que apresenta uma escala quase-logarítmica. O índice K_p é obtido a cada período de 3 horas (3-h) e é derivado de 13 observatórios em latitudes subaurorais, entre 44 e 60° de latitude, principalmente no hemisfério norte. Ele é obtido como o valor médio dos níveis de perturbação obtidos nos 13 observatórios (Tabela 2.1).

Níveis de perturbação em cada observatório são determinados pela medida da diferença entre o maior e menor valor absoluto, durante o intervalo de tempo de 3-h, para a componente do campo magnético mais perturbado. A variação máxima é então convertida em um índice K local tomando valores de 0 a 9 de acordo com uma escala quase-logarítmica, que é específica a cada estação; isto é feito como uma tentativa de normalizar a frequência de ocorrência de diferentes tamanhos de perturbação. O índice K_p 3-h (média dos valores de K das 13 estações) é expressado em uma escala de um terço de K (28 valores): $0_0, 0+, 1-, \dots, 8+, 9-, 9_0$ isto é, $5-$ é $5-1/3$, 5_0 é 5 e $5+$ é $5+1/3$. O índice a_p é obtido diretamente de K_p através de uma tabela de conversão (Tabela 2.2).

Tabela 2.1- Observatórios Utilizados na Computação do Índice Kp

#	OBSERVATÓRIO				GEOGRÁFICA		GEOMAG.		K=9
	Code	Nome	Localização	Ativa	Lat.	Long.	Lat.	Long.	
1	LER	Lerwick	Scotland	1932 - atual	60°08'	358°49'	62.0°	89.4°	1000 nT
2	MEA	Meanook	Canada	1932-atual	54°37'	246°40'	61.8°	305.1°	1500 nT
3	SIT	Sitka	Alaska (US)	1932-atual	57°03'	224°40'	60.4°	279.2°	1000 nT
4	ESK	Eskdalemuir	Scotland	1932-atual	55°19'	356°48'	57.9°	84.1°	750 nT
5	LOV	Lovö	Schweden	1954-atual	59°21'	17°50'	57.8°	106.7°	600 nT
6	AGN	Agincourt	Canada	1932-1969	43°47'	280°44'	54.4°	350.2°	600 nT
	OTT	Ottawa	Canada	1969-atual	45°24'	284°27'	56.1°	354.8°	750 nT
7	RSV	Rude Skov	Denmark	1932-1984	55°51'	12°27'	55.5°	99.6°	600 nT
	BFE	Brorfelde	Denmark	1984-atual	55°37'	11°40'	55.4°	98.8°	600 nT
8	ABN	Abinger	England	1932-1957	51°11'	359°37'	53.5°	84.6°	500 nT
	HAD	Hartland	England	1957-atual	50°58'	355°31'	54.0°	80.4°	500 nT
9	WNG	Wingst	Germany	1938-atual	53°45'	9°04'	54.2°	95.3°	500 nT
10	WIT	Witteveen	Netherland	1932-1988	52°49'	6°40'	53.7°	92.4°	500 nT
	NGK	Niemegk	Germany	1988-atual	52°04'	12°41'	51.9°	97.8°	500 nT
11	CLH	Cheltenham	USA	1932-1957	38°42'	283°12'	49.4°	353.5°	500 nT
	FRD	Fredericksburg	USA	1957-atual	38°12'	282°38'	48.8°	352.9°	500 nT
12	TOO	Toolangi	Australia	1972-1981	-37°32'	145°28'	-45.8°	223.0°	500 nT
	CNB	Canberra	Australia	1981-atual	-35°18'	149°00'	-43.1°	226.4°	500 nT
13	AML	Amberley	New Zealand	1932-1978	-43°09'	172°43'	-47.0°	254.2°	500 nT
	EYR	Eyrewell	New Zealand	1978-atual	-43°25'	172°21'	-47.3°	253.9°	500 nT

Fonte: http://www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23/GeoMag/niemegk/kp_index/kp.html, 2001.

A Tabela 2.2 é feita de tal maneira que numa estação em aproximadamente 50° de latitude geomagnética, *ap* pode ser considerado como a variação da mais perturbada das duas componentes do campo horizontal, expressa em unidades de 2nT. O intervalo da escala de *ap* é 0-400. Valores de *ap* estão disponíveis desde 1932 (MAYAUD, 1980; COFFEY e ERWIN, 2001; RANGARAJAN, 1989; KIVELSON e RUSSELL, 1995; ROSTOKER, 1972).

Tabela 2.2: Amplitude Equivalente de Ap para um dado Kp.

<i>Kp</i>	0o	0+	1-	1o	1+	2-	2o	2+	3-	3o	3+	4-	4o	4+
<i>ap</i>	0	2	3	4	5	6	7	9	12	15	18	22	27	32
<i>Kp</i>	5-	5o	5+	6-	6o	6+	7-	7o	7+	8-	8o	8+	9-	9o
<i>ap</i>	39	48	56	67	80	94	111	132	154	179	207	236	300	400

Fonte: International Service of Geomagnetic Indices (I.S.G.I).

O índice diário *Ap* é obtido pela média dos oito valores de *ap* para cada dia.

2.3.2 Índice aa

O índice *aa* é uma medida da atividade geomagnética global equivalente ao índice *Ap*, a não ser pelo fato que ele é derivado usando dados de somente dois observatórios aproximadamente antipodais. Os dados estão disponíveis desde 1868. Para cada intervalo de 3 horas, o índice *K* é medido nas duas estações e convertido em amplitude; um índice *aa* individual é a média dos valores do norte e do sul, multiplicado por um peso para explicar pequenas diferenças em latitude das duas estações, e para pequenas mudanças em muitos lugares no observatório. O intervalo da escala de *aa* é 2-600 e os seus valores estão em unidades de 1nT (MAYAUD, 1980; COFFEY e ERWIN, 2000; RANGARAJAN, 1989).

Os observatórios usados para derivar *aa* são dados com os coeficientes peso entre parênteses (Tabela 2.3):

Tabela 2.3: Observatório usado para derivar o índice aa.

Hemisfério norte				Hemisfério sul			
Observatório		Lat. Geom.	Long. Geom.	Observatório		Lat. Geom.	Long. Geom.
1868-1925	Greenwich (1,007)	53,79°	85,10	1868-1919	Melbourne (0,967)	-46,60°	222,30
1926-1956	Abinger (0,934)	53,58°	84,55	1920-1979	Toolangui (1,033)	-46,05°	222,66
1957- ...	Hartland (1,059)	54,17°	80,29	1980- ...	Canberra (1,084)	-43,38°	226,09

Fonte: International Service of Geomagnetic Indices (I.S.G.I).

2.3.3 Índice AE

O índice do Eletrojato Auroral (*AE*) é designado para fornecer uma medida quantitativa da atividade magnética na zona auroral, produzida pelo aumento das correntes ionosféricas fluindo abaixo e dentro da oval auroral. Definido e desenvolvido por Davis e Sugiura em 1966, o índice *AE* tem sido utilizado tanto qualitativamente quanto quantitativamente no estudo da morfologia das subtempestades, através do comportamento dos satélites de comunicação, na propagação de rádio e no acoplamento entre o campo magnético interplanetário e a magnetosfera da Terra. O índice *AE* é derivado das variações geomagnéticas da componente horizontal, observada em observatórios selecionados ao longo da zona auroral no hemisfério norte. A Tabela 2.4 apresenta os observatórios utilizados na derivação do índice *AE*.

O índice *AE* é obtido através da superposição em mesma escala de amplitude e tempo dos vários magnetogramas obtidos nos diferentes observatórios. As variações são medidas de uma linha de base determinada para cada observatório. O nível de campo magnético de tempo calmo deve ser determinado para cada um deles e subtraído dos valores medidos, deixando assim somente o valor da perturbação. O índice *AE* é definido por $AU-AL$, onde os índices *AU* e *AL* representam o envelope superior e inferior da superposição dos dados dos valores a cada minuto de *H* de todos os observatórios, respectivamente, e o valor *AE* dá a separação destes

envelopes. Os índices *AU* e *AL* representam uma medida da densidade máxima de corrente dos Eletrojetos Aurais na direção leste e na direção oeste, respectivamente. O índice *AE* representa uma medida da atividade do Eletrojato Auroral global e esta disponível desde 1957 (ROSTOKER, 1972; MAYAUD, 1980; RANGARAJAN, 1989; KIVELSON e RUSSELL, 1995;).

Tabela 2.4: Observatórios que fazem parte da obtenção do índice *ae*.

Observatório	Abreviatura	Geográfica		Geomagnética	
		Lat.(°N)	Long.(°E)	Lat.(°N)	Long.(°E)
Abisko	ABK	68.36	18.82	66.04	115.08
Dixon Island	DIK	73.55	80.57	63.02	161.57
CApe Chelyuskin	CCS	77.72	104.28	66.26	176.46
Tixie Bay	TIK	71.58	129.00	60.44	191.41
CApe Wellen	CWE	66.17	190.17	61.79	237.10
Barrow	BRW	71.30	203.25	68.54	241.15
College	CMO	64.87	212.17	64.63	256.52
Yellowknife	YKC	62.40	245.60	69.00	292.80
Fort Churchill	FCC	58.80	265.90	68.70	322.77
Poste de la Baleine	PBQ	55.27	282.22	66.58	347.36
Narssarssuaq	NAQ	61.20	314.16	71.21	36.79
Leirvogur	LRV	64.18	338.30	70.22	71.04

Fonte: International Service of Geomagnetic Indices (I.S.G.I).

2.3.4 Índice *Dst*

O índice *Dst* monitora a variação da corrente de anel, que é uma corrente que circula a Terra próxima ao equador magnético fluindo na direção oeste, no cinturão de radiação de Van Allen na magnetosfera (WILLIAMS,1983; DAGLIS,1999). Entre todos os índices, o índice *Dst* é provavelmente aquele que melhor monitora e registra o fenômeno para o qual foi designado. Isto se deve à grande simplicidade das variações magnéticas causadas pela corrente de anel: elas são axialmente simétricas em seu regime estacionário e não dependem da longitude ou da hora local. Supondo que outras variações transitórias regulares ou irregulares são eliminadas na derivação, obtém-se um índice que já não é uma informação sumarizada, mas um registro puro do fenômeno a qualquer taxa de amostragem. No

entanto, várias dificuldades são encontradas na eliminação das variações transitórias e principalmente das variações seculares que, ao longo dos anos, varia de observatório para observatório. Como o campo produzido pela corrente de anel equatorial é quase paralelo ao eixo do dipolo, seu efeito é predominante na componente H e mais forte em baixas latitudes. Nessa região, é menor a amplitude das variações irregulares originadas em latitude aurorais, porém é grande a influência das variações regulares Sq (variação magnética de períodos calmos governada pelo Sol) e do eletrojato equatorial, que devem ser eliminadas no cálculo de *Dst*.

Durante forte atividade magnética, a assinatura da corrente de anel pode ser vista em registros do campo magnético na superfície da Terra em todo o mundo como uma depressão, abaixo do nível de tempo quieto, da intensidade da componente horizontal do campo, também chamada de fase principal. O aumento da energia na corrente de anel, que resulta na típica depressão de mais de 100nT esta relacionada ao processo de reconexão do campo magnético interplanetário e o campo magnético da Terra (MAYAUD, 1980; RANGARAJAN, 1989; KIVELSON e RUSSELL, 1995; ROSTOKER, 1972; MCPHERRON, 1997; SABA, 1992).

O índice *Dst* é derivado usando dados de quatro observatórios magnéticos, apresentados na Tabela 2.5 (IAGA Bulletin 40, 1991). Estes observatórios foram escolhidos com base na qualidade da observação e por razões de que suas localizações são suficientemente distantes dos eletrojetos aurorais e equatorial para minimizar seus efeitos, sendo eles distribuídos em intervalos de longitude aproximadamente equidistantes.

Tabela 2.5: Observatórios utilizados na computação do DST.

Observatório	Abreviatura	Lat. Dipolo	Long. Dipolo	Lat. Geográfica	Long. Geográfica
Honolulu	HON	21.1°	266.4	21.32°	201.98°
San Juan	SJG	29.9°	3.2	18.38°	293.88°
Hermanus	HER	-33.3°	80.3	-34.40°	19.22°
Kakioka	KAK	26.0°	206.0	36.23°	140.18°

Fonte: International Service of Geomagnetic Indices (I.S.G.I) e IAGA Bulletin 40, 1991.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA DE ANÁLISE DE DADOS

A análise estatística fornece um valioso método para estabelecer inicialmente a existência ou falta de existência de uma relação entre diversos conjuntos de dados. Métodos estatísticos também permitem fazer uma avaliação quantitativa da intensidade das relações observadas (BAKER, 1986). Neste Capítulo serão vistas algumas técnicas essenciais e estatística básica para o uso de métodos correlativos no estudo da atividade solar e geomagnética. Análises estatísticas são comumente utilizadas na física espacial para pesquisar inicialmente padrões de relação (“estudo exploratório”) e para verificar uma suposição relação teórica (“estudo confirmatório”) (BAKER, 1986).

3.1 Dados

Os dados a serem utilizados serão as séries temporais do índice solar Rz obtidos do centro de dados do Sunspot Index Data Center em Bruxelas, Bélgica, e dos índices Geomagnéticos AE , Dst , Ap e Aa obtidos dos centros de dados do NGDC – National Geophysical Data Center – National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA, Estados Unidos; e World Data Center – WDC, Kyoto, JApão. Valores horários da velocidade do vento solar foram obtidos da base de dados OMNI para o período de 1964-2000.

3.2 Metodologia

Para entender como a atividade solar e geomagnética varia fazer-se-á uso de análise estatística tais como: correlação e regressão linear simples, regressão linear múltipla, auto-correlação e correlação cruzada, transformada de Fourier discreta, filtros digitais e análise espectral com o método de janelamento múltiplo .

3.2.1 Correlação e Regressão Linear Simples

Considere que temos medidas de pares de quantidades x_i e y_i . Queremos saber se existe uma relação matemática entre as variáveis x e y . A pergunta é se há ou não há correlação nas variações nos valores observados de uma quantidade y , com variações nos valores medidos de outra quantidade x . A correlação expressa o grau de relação entre duas variáveis x e y , isto é, qual é a tendência da variação conjunta das duas variáveis consideradas de se colocarem segundo uma reta. Entretanto, deve-se considerar também a intensidade ou o grau da correlação. Uma medida do grau de correlação linear é dada pelo coeficiente de correlação linear r ,

$$r(n) \equiv \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.1)$$

O coeficiente de correlação é adimensional e varia entre $+1$ e -1 , onde $+1$ mostra perfeita correlação e -1 mostra exatamente o oposto, ou seja, o quanto as variáveis estão perfeitamente anticorrelacionadas. Um valor zero indica que não há relação. Uma correlação significativa indica que uma relação causa-efeito pode existir, mas pode não implicar em uma relação direta entre as variáveis, e sim implicar, simplesmente, a tendência que elas apresentam quanto a sua variação conjunta. A interpretação de um coeficiente de uma medida de intensidade da relação linear entre duas variáveis é uma interpretação puramente matemática e é completamente destituída de qualquer implicação de causa ou efeito. O fato de duas variáveis tenderem a aumentar ou diminuir juntas não implica que tenham qualquer efeito direto ou indireto no outro. Mas podem ser influenciadas por outras variáveis de maneira a aumentar fortemente a relação matemática. Os coeficientes de correlação devem ser tratados com cuidado, pois servem como indicadores de relações entre pares de variáveis.

Quanto à dependência funcional das variáveis envolvidas, elas podem ser tratadas através de regressões. Para o propósito do presente trabalho, supõe-se que a forma da linha de regressão seja uma reta, esta será o melhor ajuste linear através de pontos representando a variável dependente e independente. O melhor ajuste médio que difere entre os pontos medidos e a linha teórica é minimizado. Supõe-se ser a linha teórica de regressão uma reta e que se queira estabelecer a regressão de y em função de x . Logo, a função que se deseja obter é da forma:

$$y = \alpha + \beta x \quad (3.2)$$

Estima-se os parâmetros α e β da reta teórica através dos pontos experimentais fornecidos pela amostra, obtendo-se uma reta estimada na forma

$$\hat{y} = a + bx \quad (3.3)$$

onde a é a estimativa do parâmetro α , e b , também chamado coeficiente de regressão linear, é a estimativa do parâmetro β . Os parâmetros a e b são os coeficientes obtidos do melhor ajuste (JENKINS e WATTS, 1968; BEVINGTON, 1969; COSTA NETO, 1977; HARDIN, 1986).

3.2.2 Regressão Linear Múltipla

Considere agora o caso em que o comportamento de uma variável dependente y é uma função de várias variáveis independentes x_i . Tem-se, então, uma regressão múltipla. Admitindo-se que y varie linearmente com as variáveis x_i , tem-se o caso da regressão linear múltipla (BEVINGTON, 1969).

Tomando o caso em que se tem apenas duas variáveis independentes x_1 e x_2 , o ajuste linear é dado por:

$$y = a + \sum_{j=1}^2 b_j x_j \quad (3.4)$$

onde y e x_j , $j=1,2$, representam diferentes variáveis consideradas pela correlação múltipla, e a e b_j são os coeficientes obtidos dos melhores ajustes.

A covariância da amostra s_{jk}^2 é:

$$s_{jk}^2 \equiv \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{\sigma_i^2} (x_{ij} - \bar{x}_j)(x_{ik} - \bar{x}_k) \right]}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (1/\sigma_i^2)} \quad (3.5)$$

onde $j,k=1,2$; σ_i é o desvio padrão, N é o número de ponto de dados e \bar{x}_j é

$$\bar{x}_j \equiv \frac{\sum_{i=1}^N (x_{ij} / \sigma_i^2)}{\sum_{i=1}^N (1 / \sigma_i^2)} \quad (3.6)$$

A variância da amostra é dada por:

$$s_j^2 \equiv s_{jj}^2 \quad (3.7)$$

O coeficiente de correlação linear pode ser expresso em termos de

$$r_{jk} \equiv \frac{s_{jk}^2}{s_j s_k} \quad (3.8)$$

Em analogia com esta definição de coeficiente de correlação linear, definimos o coeficiente de correlação múltiplo R por:

$$R^2 \equiv \sum_{j=1}^n \left(b_j \frac{s_{jy}^2}{s_y^2} \right) = \sum_{j=1}^n \left(b_j \frac{s_j}{s_y} r_{jy} \right) \quad (3.9)$$

3.2.3- Autocorrelação e Correlação Cruzada

Autocorrelação é uma medida da correlação de uma variável com medidas da mesma variável feita em diferentes tempos. A função de autocorrelação, $r(k)$, na defasagem k (*lag* k), mede a correlação de uma série temporal com ela mesma, $Y(t+k)$, comparada com $Y(t)$, a valores crescentes de k . A função de autocorrelação (também chamada de autocovariância) é definida por;

$$C_{xx}(k) = \frac{1}{N-k} \sum_{t=1}^{N-k} Y_t Y_{t+k} \quad (3.10)$$

onde Y_t é a série temporal dos dados. A função de autocorrelação é definida por:

$$r(k) = \frac{C_{xx}(k)}{C_{xx}(0)} \quad (3.11)$$

onde,

$$C_{xx}(0) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N Y_t^2 \quad (3.12)$$

é a variância. Quando $k=0$ a série temporal é correlacionada com ela mesma e $r(0)=1$. Grandes valores de $r(k)$ implicam forte correlação entre os pontos na série temporal separados pela defasagem k , para pequenos valores de $r(k)$ implicará em uma fraca correlação, e quando $r(k)=0$, têm-se ruído branco.

A correlação cruzada é definida de maneira similar, porém agora a função de correlação cruzada, $\gamma(k)$, na defasagem k , define a correlação entre uma série $y(t+k)$ com outra série $x(k)$, a valores crescentes de k ,

$$\gamma(k) = \frac{C_{xy}(k)}{C_{xy}(0)} \quad (3.13)$$

onde C_{xy} é a função de covariância cruzada,

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{N-k} \sum_{t=1}^{N-k} X_t Y_{t+k} \quad (3.14)$$

e

$$C_{xy}(0) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N X_t Y_t \quad (3.15)$$

A análise de correlação cruzada pode demonstrar a equivalência periódica de duas séries temporais e estabelecer sua relação de fase junto com uma indicação do intervalo comum sobre o qual a periodicidade persistiu (HARDIN, 1986; JENKINS e WATTS, 1968).

3.2.4- Transformada de Fourier Discreta

O método de transformada integral, particularmente a de Fourier, tem importantes aplicações em análises de dados. A principal utilização da transformada de Fourier é no estudo do comportamento periódico de sinais contínuos variantes no tempo. Nas áreas das engenharias, esta ferramenta matemática é freqüentemente utilizada para transformação de sinais do domínio do tempo para o domínio da freqüência. Isso se aplica em áreas como propagação de ondas acústicas, óptica e teoria de ondas eletromagnéticas para, por exemplo, estimar-se o espectro de potência na convolução de duas séries temporais para a montagem de filtro (BERGLAND, 1969).

A transformada de Fourier é, em geral, aplicada a funções contínuas, implicando uma extensão infinita do sinal. Entretanto, quando se realiza uma análise de dados, a série temporal formada pelo conjunto de dados é discreta e finita em extensão, pois o conjunto de dados é finito (COOLEY e TUKEY, 1969; BERGLAND, 1969). Neste caso, deve-se utilizar a transformada de Fourier na sua versão discreta (*Discrete Fourier Transform – DFT*).

Assim, utiliza-se a transformada de Fourier para transformar sinais do domínio do tempo para o domínio da frequência, e a transformada inversa de Fourier para transformar sinais do domínio da frequência para o domínio do tempo. A transformada de Fourier para um sinal contínuo, no domínio do tempo $x(t)$, pode ser escrita da forma:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-\pi i 2ft} dt \quad (3.16)$$

e sua transformada inversa é dada por:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{+\pi i 2ft} df \quad (3.17)$$

Analogamente, a transformada discreta de Fourier (DFT) e sua inversa podem ser escritas da forma:

$$X(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k)e^{\frac{-\pi i 2jk}{N}} \quad (3.18)$$

e

$$x(k) = \sum_{j=0}^{N-1} X(j)e^{\frac{\pi i 2jk}{N}} \quad (3.19)$$

para $j=0,1,\dots,N-1$; $k=0,1,\dots,N-1$, e $x(k)$ e $X(f)$ sendo séries complexas.

3.2.5 Filtros Digitais

Um filtro é qualquer dispositivo físico ou operação matemática que é aplicada a uma série temporal com o objetivo de mudá-la de alguma maneira. A principal

finalidade dos filtros digitais é alterar a informação espectral contida em um sinal de entrada X_k , produzindo um sinal de saída aprimorado y_k . Estes podem ser executados tanto no domínio do tempo, como no domínio da frequência. Filtros são, de um modo geral, classificados como filtro *passa-baixa* (*low-pass*), passando componentes de baixa frequência enquanto atenua frequências altas, filtro *passa-alta* (*high-pass*), permite passar componentes de altas frequências eliminando baixas frequências, filtro *passa-banda* (*band-pass*), rejeita tanto componentes de frequências altas como baixas passando uma banda intermediária, filtro *rejeita-banda* (*band-stop*), rejeita uma banda intermediária de frequência enquanto passa componentes de frequências altas e baixas (HARDIN, 1986; STEARNS e DAVID, 1993).

3.2.6 Método de Janelamento Múltiplo

Em análise espectral, o uso de uma única janela em uma série temporal reduz muito a tendência (“*bias*”), que é uma falsa associação que resulta da falha da avaliação por alguma distorção ou fator de influência, ou uma tendência dos resultados observados que os desvia dos resultados verdadeiros, “*bias*” distorce o resultado em uma direção particular, devido ao vazamento espectral no estimador espectral. Entretanto, ele também reduz o tamanho da amostra e causa a perda de informação (JENKINS and WATTS, 1968). Thomson (1982) introduziu a idéia de usar múltiplas janelas para recuperar as informações perdidas enquanto mantém aceitável o “*bias*”. O método é conhecido como *Multiple Taper Method* -MTM. O MTM usa janelas ortogonais (ou *tapers*) para obter estimativas aproximadamente independentes do espectro de potência e então as combina para produzir uma estimativa. Esta estimativa exhibe mais graus de liberdade e permite fáceis quantificações do compromisso da “*bias*” e variância, comparado à análise de Fourier convencional. O MTM tem habilidade para detectar oscilações de pequenas amplitudes em uma série temporal curta sem a necessidade de filtragem do sinal. Ele tem também um teste estatístico interno F (distribuição F) para obter níveis de significância estatística (confiança) da periodicidade encontrada (THOMSON, 1990).

O parâmetro que controla o compromisso entre baixa variância e baixa tendência (*bias*) é o produto do tempo vezes a largura de banda (NW – número de janelas ou *tapers*). Este é um parâmetro de resolução diretamente relacionado ao número de janelas usadas para o cálculo do espectro. Conforme NW aumenta, têm-se mais estimativas do espectro de potência e a variância do espectro diminui. Entretanto, a largura da banda de cada janela é também proporcional ao NW. Assim, a medida que NW aumenta, cada estimativa exibe mais vazamento espectral (alargamento de picos) e o espectro total estimado é mais tendencioso. Para cada grupo de dados um valor específico de NW pode ser usado (THOMSON, 1982; THOMSON, 1990).

Comumente multiplica-se a série temporal por uma janela (*taper*) antes de realizar a transformada de Fourier para reduzir a vazamento espectral. Sem o janelamento, a parte alta de alta frequência do espectro pode ser tendenciosa (“biased”) para o vazamento espectral (PARKS et al., 1987).

Entretanto, o uso de uma única janela em geral pondera desigualmente os pontos de dados e tende a aumentar a variância estatística da estimativa espectral. Sempre que apenas uma janela for utilizada, haverá um balanço entre a resistência ao vazamento espectral e a variância de uma estimativa espectral (PARKS et al., 1987).

Os dados são multiplicados não apenas por uma, mas por várias janelas resistentes ao vazamento, e cada janela amostra diferentemente a série. A informação estatística perdida pela primeira janela é recuperada pela segunda, e assim por diante.

A estimativa de janelas múltiplas não é então restrita pelo balanço entre vazamento e variância, como é a estimativa por uma única janela.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste Capítulo é feita a descrição dos resultados obtidos da análise estatística e espectral, e suas interpretações físicas. Esta Seção está dividida em quatro tópicos. No primeiro tópico aborda-se a relação entre a atividade solar e geomagnética de longo período analisada através de médias corridas, séries filtradas e de correlação cruzada ciclo a ciclo para as séries anuais e mensais de Rz e aa . No segundo tópico é feita a análise espectral aplicando o método de janelamento múltiplo nas séries de Rz e aa . Na terceira parte é feita uma regressão linear múltipla do índice geomagnético aa em função do número de manchas solares Rz e da fração anual de feixes de alta velocidade ($Fpk500 > 500$ km/s). Finalmente, na quarta parte é feita a correlação de longo período dos índices geomagnéticos (Dst , AE , aa , Ap) e suas dependências entre si e em relação a parâmetros solares (Rz e $Fpk500$).

4.1 Correlação Entre o Número de Manchas Solares Rz e o Índice Geomagnético aa

Nesta Seção descrevem-se as variações temporais das séries anuais e mensais das atividades solar e geomagnética para o período de 1868 a 2000. Analisaram-se as séries de Rz e aa na tentativa de se observar quais são os possíveis processos físicos que estão causando a deriva de longo período na atividade geomagnética em relação à atividade solar Rz . A correlação cruzada é usada para analisar a evolução no tempo da correlação e da defasagem entre as séries. Vários autores têm discutido o que está causando este aumento gradual na atividade geomagnética, desde o início do século XX, quantificado pelo índice aa (e. g., FEYNMAN e CROOKER, 1978; CLILVERD et al., 1998; STAMPER et al., 1999; KISCHA et al., 1999; LOCKWOOD et al., 1999; WANG et al., 2000). Feynman e Crooker mostraram que para os anos de 1900-1968, o valor médio de aa aumentou 0,22 nT por ano (dando uma deriva total durante o período de estudo de 15 nT), sobreposto numa variação do ciclo solar de amplitude próximo a 10 nT. Em adição ao aumento na atividade

geomagnética desde 1900, a média do número de manchas solares (média sobre cada ciclo solar) tem aumentado (RUSSELI, 1975) e os ciclos solares têm ficado mais curtos (FRIIS-CHRISTENSEN e SVENSMARK, 1997).

A Figura 4.1 mostra as séries temporais anuais do número de manchas solares Rz e o índice geomagnético aa para o intervalo de 1868 a 2000. Através da correlação cruzada se estimou o coeficiente de correlação r e a sua defasagem média. O maior coeficiente de correlação entre aa e Rz foi ($r=0,65$) encontrado para uma defasagem de -1 ano, isto significa que em média o valor máximo de Rz ocorre um ano antes do máximo de aa .

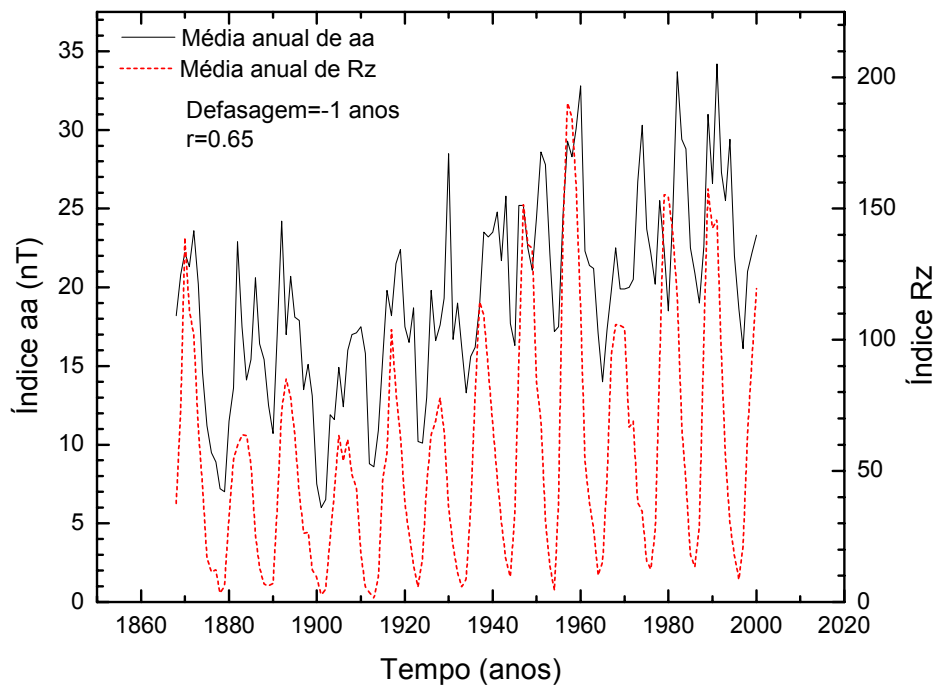


Figura 4.1: Média anual do número de manchas solares (Rz) e o índice geomagnético aa para o intervalo de 1868 a 2000.

Neste trabalho a análise de correlação cruzada é feita entre parâmetro 1 *versus* parâmetro 2, assim uma defasagem positiva indica que o parâmetro 2 tem máximo “ t ” anos depois que o parâmetro 1, enquanto uma defasagem negativa indica que o parâmetro 2 tem máximo “ t ” anos antes que o parâmetro 1.

O número de manchas solares tem um comportamento cíclico com o mínimo de um ciclo alcançando o mesmo nível do mínimo dos ciclos precedentes. O índice *aa* também apresenta comportamento cíclico, mas apresenta uma tendência de aumentar tanto o valor mínimo quanto o máximo com o decorrer do tempo (GORNEY, 1990; ECHER et al. 2001, STAMPER et al., 1999).

A Figura 4.2 mostra os valores mensais das séries de *Rz* e *aa*. Observa-se nesta figura a variabilidade interanual sobreposta às variações de longo período discutidas anteriormente. Durante os períodos próximos aos máximos solares observa-se um aumento da variabilidade de *Rz*. Esta mesma característica também é observada na série de *aa* antes de 1930. A partir de 1930 se observa um aumento da variabilidade durante os períodos de mínimos na série de *aa*. Este aumento é confirmado pelos estudos realizados por Cillverd et al. (1998). Eles obtiveram que a ocorrência de tempestades no mínimo solar tem aumentado tipicamente 40% mais do que em outras fases.

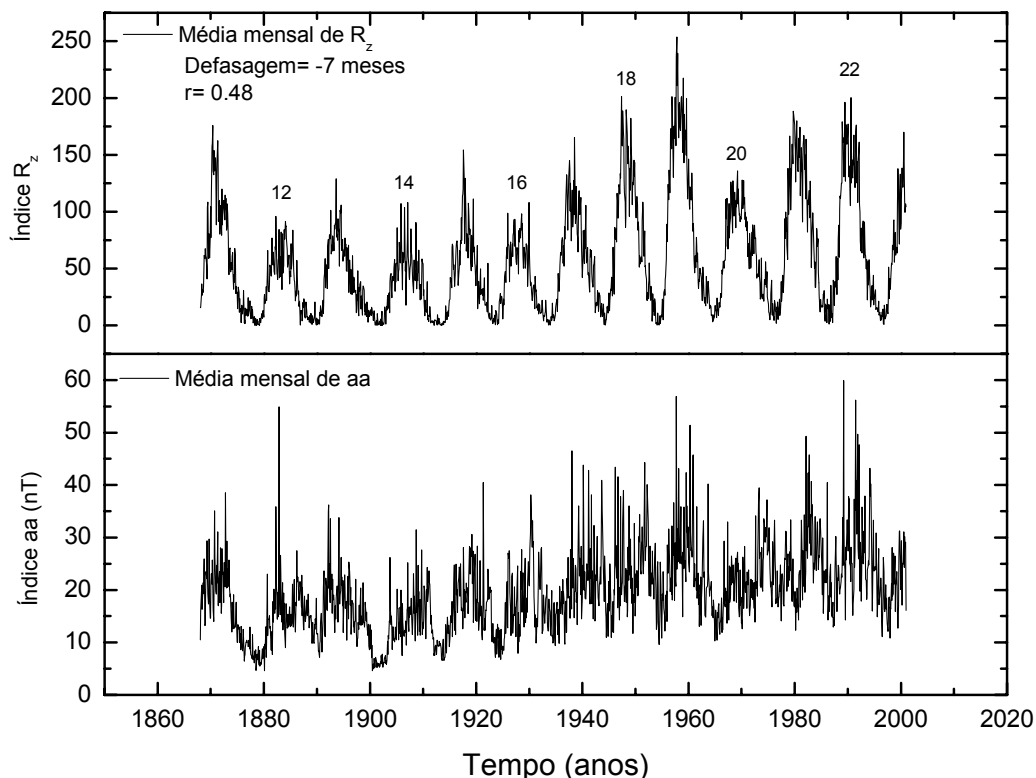


Figura 4.2: Médias mensais do número de manchas solares *Rz* (painel superior) e o índice geomagnético *aa* (painel inferior) para o intervalo de 1868 a 2000.

Outra característica observada na série temporal de *aa* é a presença da estrutura de pico duplo (GONZALEZ et al., 1990), mostrando um pico próximo ao máximo do ciclo de manchas solares e outro na fase descendente, sendo este último dominante para todos os ciclos exceto para os ciclos 12 e 13. Acredita-se que o primeiro pico é causado por distúrbios geomagnéticos devido a CMEs, enquanto feixes corrotantes produzem o segundo pico, possivelmente com adicional aumento na atividade causada pela interação de estruturas relacionadas a CMEs (choques/pós choques/ejetado) e feixes rápidos (RICHARDSON et al., 2000).

A Figura 4.3 mostra, de cima para baixo, a diferença entre o primeiro e segundo pico do índice geomagnético *aa* e a diferença deles em relação ao pico de *Rz*. Estes valores foram obtidos das séries anuais de *aa* e *Rz*, tomados ciclo a ciclo. Em média o segundo pico de *aa* ocorre 3,5 anos após o primeiro. O primeiro pico de *aa* em relação ao pico de *Rz* em média ocorre meio ano antes e o segundo ocorre 3 anos depois.

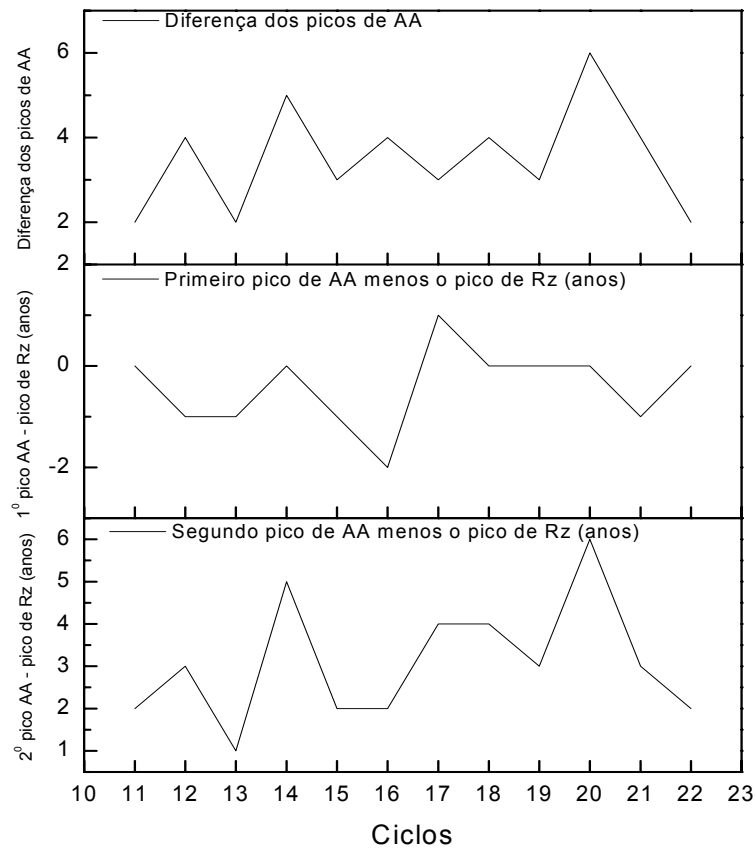


Figura 4.3: Diferença entre o primeiro e segundo picos em anos do índice geomagnético *aa* em cada ciclo (painel superior), Diferença do primeiro pico de *aa* em relação ao pico de *Rz* (painel central), e diferença do segundo pico de *aa* em relação ao pico de *Rz* (painel inferior).

Em alguns ciclos está presente um terceiro pico na fase descendente que talvez esteja relacionado à existência de estruturas de campo magnético aberto no Sol (buracos coronais) que geram os feixes rápidos. Acredita-se que este pico é gerado somente pela interação dos feixes rápidos com a magnetosfera como será mostrado em seção posterior. Vennerstrom e Friis-Christensen (1996) sugeriram que a atividade geomagnética durante o ciclo solar pode ser dividida em três picos. O primeiro pico ocorre brevemente antes do máximo do número das manchas solares, e está quase exclusivamente ligado com a

atividade solar transiente, e é visto com amplitude relativamente maior na atividade da corrente de anel em relação à atividade de subtempestade. O segundo pico, que ocorre aproximadamente 2 a 3 anos após o máximo do número das manchas solares, é estatisticamente o maior pico e é uma componente da atividade magnética transiente e recorrente, provavelmente com atividade transiente como característica dominante. Esta sugestão para a existência do segundo pico, de ser dominado pela atividade transiente, é contraditória aos resultados de Richardson et al. (2000). Eles obtiveram que aproximadamente 70% do valor médio de *aa* fora do máximo solar é devido a contribuição dos feixes corrotantes de alta velocidade, que são uma característica da atividade magnética recorrente. O terceiro pico que ocorre perto do final da fase descendente do ciclo solar, é amplamente recorrente, e é visto com maior amplitude na atividade de subtempestade do que na atividade da corrente de anel. Kischa et al. (1999) também consideraram que para médias anuais, a atividade esporádica / transiente poderia ser negligenciada. Segundo Legrand e Simon (1989), 90% do tempo a atividade geomagnética seria controlada por feixes de buracos coronais.

Outro fato a ser observado é que em alguns ciclos onde o número de manchas solares não foi muito alto, como por exemplo, nos ciclos 16 e 20, a atividade geomagnética foi bem alta. Nestes ciclos observa-se que o segundo pico na fase descendente é bem acentuado, o que indica que os feixes rápidos gerados nos buracos coronais influenciaram mais no valor médio do índice geomagnético *aa*. Através deste ponto de vista, somos levados a pensar que os fatores que mais contribuem para o valor médio anual de *aa* nem sempre estão associados à atividade solar relacionada ao ciclo das manchas solares. Então é coerente afirmar que a atividade geomagnética pode ser separada em duas componentes, como sugerido por Bartels (1963), Venkatesan (1991) e outros, uma componente associada com a atividade solar *Rz* (atividade magnética transiente) e uma associada com feixes rápidos do vento solar causado por buracos coronais solares (atividade magnética recorrente).

As séries de *Rz* e *aa* apresentam uma tendência de aumento de longo período mostrada através das médias corridas de 11 e 22 anos e 132 e 264 meses

para as séries anuais e mensais, respectivamente, como se observa na Figura 4.4. As médias corridas são calculadas para os períodos de 11 e 22 anos em torno de cada ano, tal que as variações do ciclo solar (11 anos) e da reversão do campo magnético solar (22 anos) sejam suavizadas. Observa-se que o aumento na média de *aa* é similar a *Rz*, mas levemente maior. Em ambas as séries, existem claros aumentos nos intervalos de 1900 a 1955 e 1967 a 1987, com marcantes decréscimos nos intervalos entre 1955 a 1967 e 1987 a 1996, nas médias corridas de 11 anos e 132 meses. Nas médias de 22 anos e 264 meses o aumento tanto quanto o decréscimo são um pouco mais suaves.

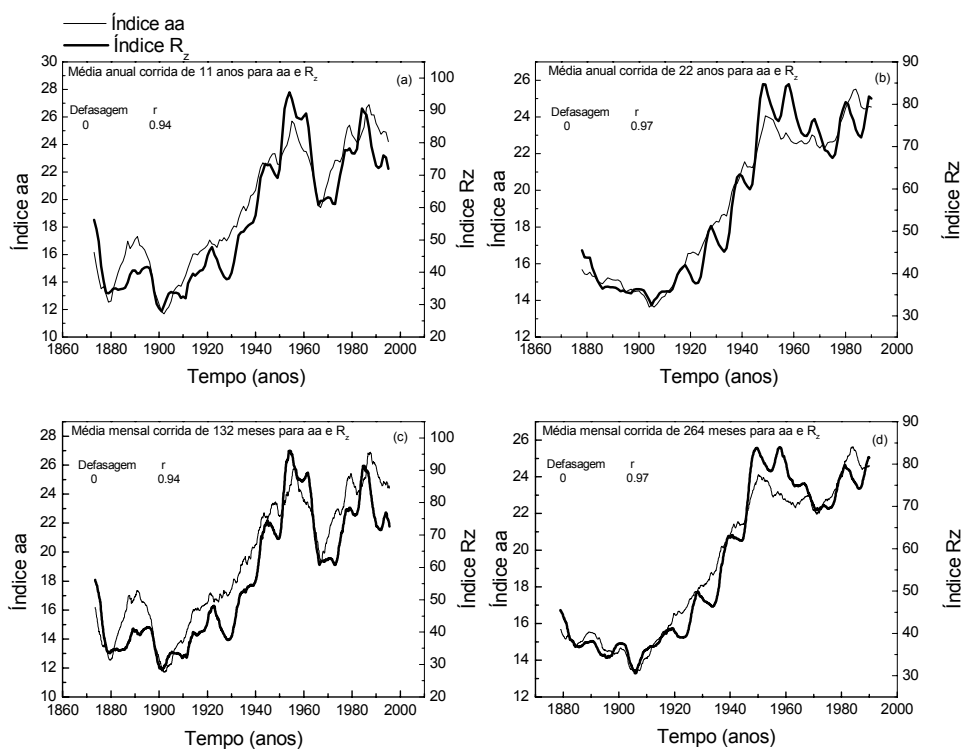


Figura 4.4: Médias corridas das séries de *Rz* e *aa*. (a) Média corrida de 11 anos das séries anuais de *Rz* e *aa*. (b) Média corrida de 22 anos das séries anuais de *Rz* e *aa*. (c) Média corrida de 11 anos das séries mensais de *Rz* e *aa*. (d) Média corrida de 22 anos das séries mensais de *Rz* e *aa*.

As variações de longo período em ambas as séries mostram que elas têm uma alta correlação e estão em fase, o que indica que ambas estão respondendo a

uma variação de longo período na atividade solar. O coeficiente de correlação obtido de ambas as médias corridas de 11 anos e 132 meses é 0,94 com defasagem 0, e o coeficiente para as médias de 22 anos e 264 meses é 0,97 com defasagem 0.

Vários fatores têm sido sugeridos como possíveis causas do aumento da atividade geomagnética. Fatores relacionados a efeitos instrumentais, efeitos ionosféricos, efeitos magnetosféricos, efeitos interplanetários e efeitos solares. Clilverd et al., (1998) mostraram que nenhum aumento significativo na atividade geomagnética pode ser devido a efeitos instrumentais, ionosféricos ou magnetosféricos. Stamper et al. (1999) avaliaram as possíveis causas solares que poderiam causar o aumento de longo período na atividade geomagnética. Eles obtiveram que o fator que mais contribui para o aumento, causando aproximadamente 50% do aumento na atividade geomagnética durante os três últimos ciclos, é um aumento na intensidade do campo magnético interplanetário; a outra metade surge do aumento na velocidade do vento solar e densidade.

Os coeficientes de correlação e as defasagens das séries anuais e mensais, e das médias corridas de *aa* e *Rz*, obtidas através da correlação cruzada, são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Correlação cruzada dos dados brutos e das médias corridas de $aaxR_z$.

		R	Defasagem
<i>aaxRz</i>	Anos (médias anuais)	0,65	-1
	11 Anos (Média corrida)	0,94	0
	22 Anos (Média corrida)	0,97	0
<i>aaxRz</i>	Meses (médias mensais)	0,48	-7
	132 Meses (11anos) Médias corridas	0,94	0
	264 Meses (22anos) Médias corridas	0,97	0

Em paralelo ao aumento de longo período das atividades solar e geomagnética, há um deslocamento da série do *aa* em relação ao número de manchas solares (*Rz*) no decorrer dos ciclos solares. Isto é observado nas séries anuais e mensais filtradas do *aa* e *Rz*, mostradas nas Figuras 4.5 e 4.6. As séries foram filtradas utilizando um filtro *passa banda* para o intervalo de 9 a 13 anos. Este período foi utilizado em função da largura dos ciclos solares variar neste intervalo. Observa-se na Figura 4.5 (médias anuais filtradas do *aa* e *Rz*) que nos ciclos 11 a 14 os máximos das séries do *aa* e *Rz* estão em fase. A partir do ciclo solar 15 os máximos começam a se defasar no decorrer dos ciclos. A correlação cruzada aplicada entre as séries anuais filtradas do *aa* e *Rz* mostra uma defasagem média de um ano entre os máximos de *aa* e *Rz*, com um coeficiente de correlação de 0,73. Os máximos de *Rz* acontecendo um ano antes dos máximos em média. Na Figura 4.6 (médias mensais filtradas) observa-se um comportamento similar ao da Figura 4.5. Entre os ciclos 11 e 13, os máximos estão em fase, a partir do ciclo 15 os máximos estão defasados. Uma defasagem média de 16 meses entre *aa* x *Rz* foi encontrada, com um coeficiente de correlação de 0,76, através da correlação cruzada.

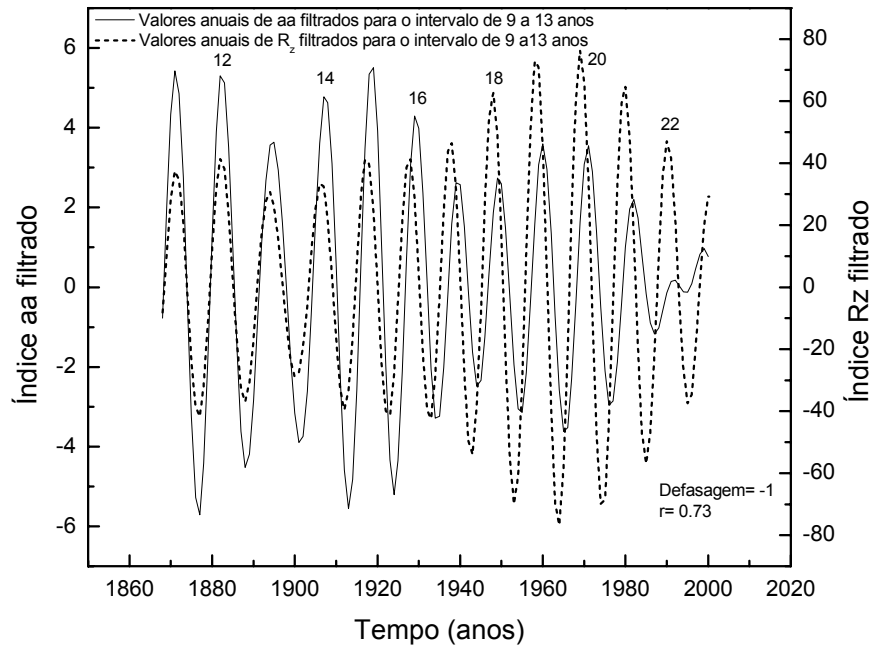


Figura 4.5: Séries temporais anuais filtradas de R_z e aa para a banda de 9 a 13 anos.

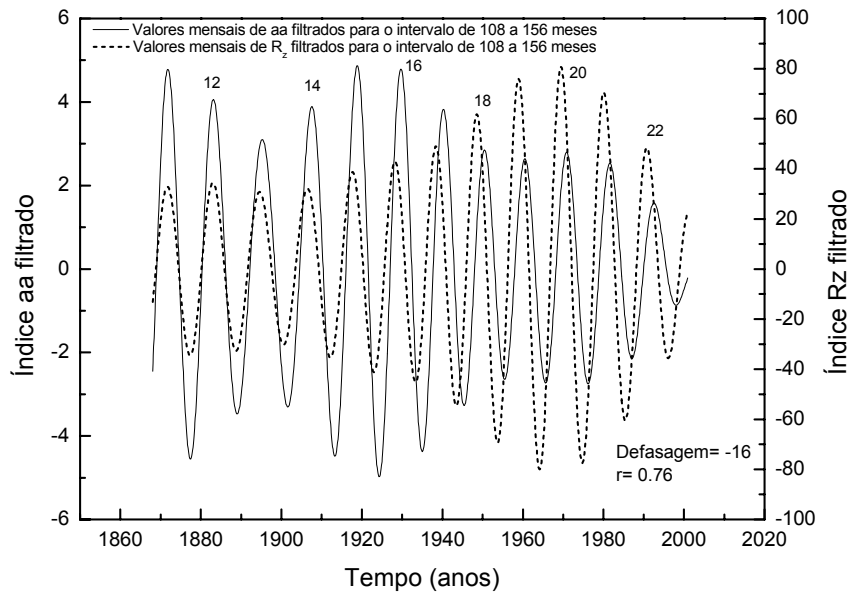


Figura 4.6: Séries temporais mensais filtradas de R_z e aa para a banda de 108 a 156 meses.

Com a finalidade de estudar a evolução da defasagem e do coeficiente de correlação entre as séries de Rz e aa , através dos ciclos solares, calculou-se a correlação cruzada ciclo a ciclo entre as séries. O tamanho dos ciclos foi determinado, para os dados anuais, do ano de mínimo valor de Rz ao ano anterior ao mínimo seguinte a partir dos dados brutos. Para os dados filtrados foi levado em consideração os mínimos dos valores filtrados. E para determinar os ciclos em meses foi feita uma média corrida de 13 meses, e aplicou-se o mesmo critério dos dados anuais, como apresentado em Kivelson e Russell (1995), página 73. Os intervalos dos ciclos são apresentados na Tabela 4.2.

A variação de longo período das correlações e das defasagens entre a atividade solar (Rz) e a atividade geomagnética (aa) para as séries anuais e mensais brutas e para as séries filtradas, obtidas através de correlação cruzada ciclo a ciclo, são mostradas nas Figuras 4.7 e 4.8.

Tabela 4.2: Intervalos de cada ciclo.

Ciclos	Intervalos dos dados brutos	Intervalos dos dados filtrados
11	1868 a 1877	1868 a 1876
12	1878 a 1888	1877 a 1887
13	1889 a 1900	1888 a 1899
14	1901 a 1912	1900 a 1911
15	1913 a 1922	1912 a 1922
16	1923 a 1932	1923 a 1932
17	1933 a 1943	1933 a 1942
18	1944 a 1953	1943 a 1952
19	1954 a 1963	1953 a 1963
20	1964 a 1975	1964 a 1973
21	1976 a 1985	1974 a 1984
22	1986 a 1995	1985 a 1994

A Figura 4.7 mostra as variações dos coeficientes de correlação e das defasagens de ciclo para ciclo, obtidos das séries anuais e mensais brutas de *Rz* e *aa* através da correlação cruzada, compreendendo os ciclos solares do 11 ao 22. Observou-se tanto nas séries anuais como nas mensais que quanto maior a defasagem menor o coeficiente de correlação. Nos ciclos iniciais as séries estão praticamente em fase, se defasando a partir do ciclo 14. No ciclo 11 o coeficiente de correlação é $r=0,89$ com uma defasagem de zero anos para a série anual (para a série mensal $r=0,75$ para uma defasagem de 1 mês). O coeficiente diminui até alcançar um valor mínimo no ciclo 18, à medida que a defasagem aumenta. O ciclo 18 apresenta uma defasagem de 4 anos com coeficiente $r=0,40$ ($r=0,25$ para defasagem de 47 meses). Do ciclo 18 até o ciclo 22 se observa uma tendência de aumento nos coeficientes de correlação, ao passo que a defasagem apresenta uma oscilação de mínimo a máximo e novamente a mínimo. Para o ciclo 22 o coeficiente de correlação é $r=0,69$ para uma defasagem de zero anos ($r=0,45$; Defasagem=3 meses).

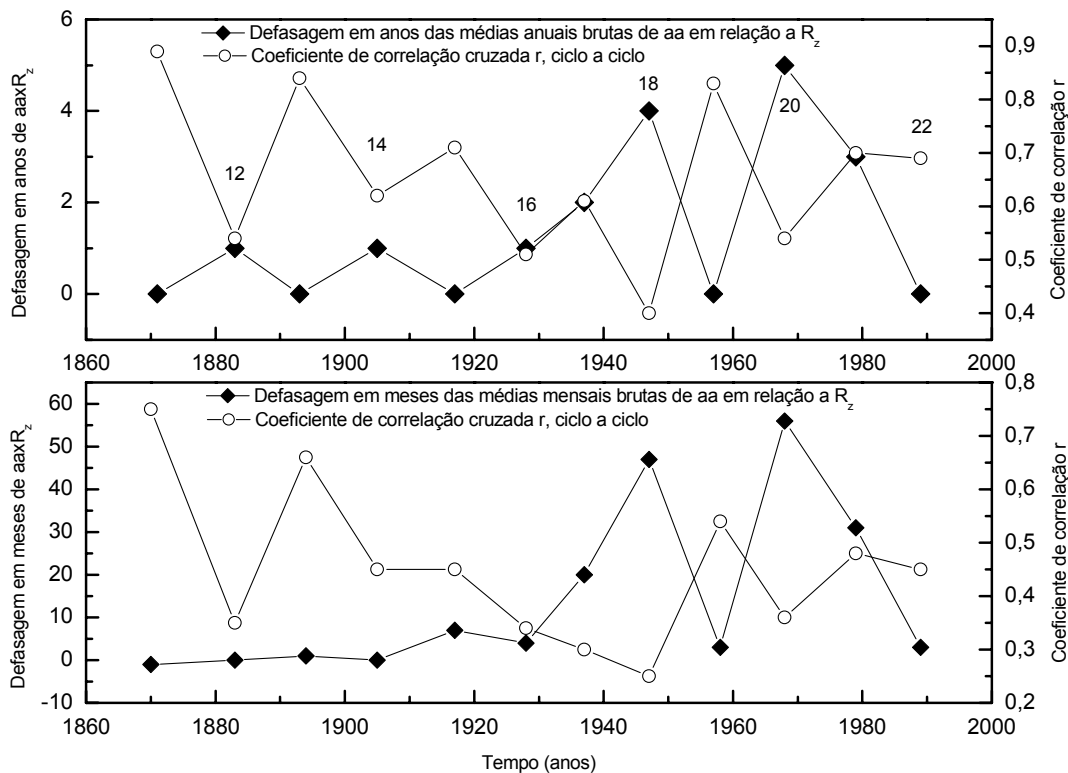


Figura 4.7: Tendência da defasagem e do coeficiente de correlação das séries anuais e mensais de R_z e aa ciclo a ciclo. A) séries anuais, b) séries mensais.

A Figura 4.8 mostra as variações dos coeficientes de correlação e das defasagens de ciclo para ciclo, das séries anuais e mensais filtradas de R_z e aa , obtidos através da correlação cruzada, compreendendo os ciclos solares do 11 ao 22. Observa-se um comportamento similar ao das séries brutas, mas com uma variação bem definida. A primeira vista, há a impressão que a variação da correlação entre aa e R_z , de ciclo para ciclo, apresenta um comportamento periódico, com um grande período, mas não é possível afirmar isto com toda certeza pelo fato que não temos uma série de dados suficientemente grande. Tanto nas séries anuais filtradas como nas mensais observou-se que quanto maior a defasagem menor o coeficiente de correlação. Nos ciclos iniciais as duas séries estão em fase. No ciclo 11 o coeficiente de correlação para a série anual filtrada é $r=0,99$ com uma defasagem de zero anos (para a série mensal $r=0,99$ para uma defasagem de 0 meses). O

coeficiente diminui até alcançar um valor mínimo no ciclo 17 na série anual à medida que a defasagem aumenta. O ciclo 17 apresenta uma defasagem de 2 anos com coeficiente de correlação de $r=0,72$ ($r=0,25$; Defasagem= 47 meses). Do ciclo 18 até o ciclo 22 se observa uma tendência de aumento. Para o ciclo 22 o coeficiente de correlação é $r=0,69$ para uma defasagem de zero anos ($r=0,45$; Defasagem=3 meses).

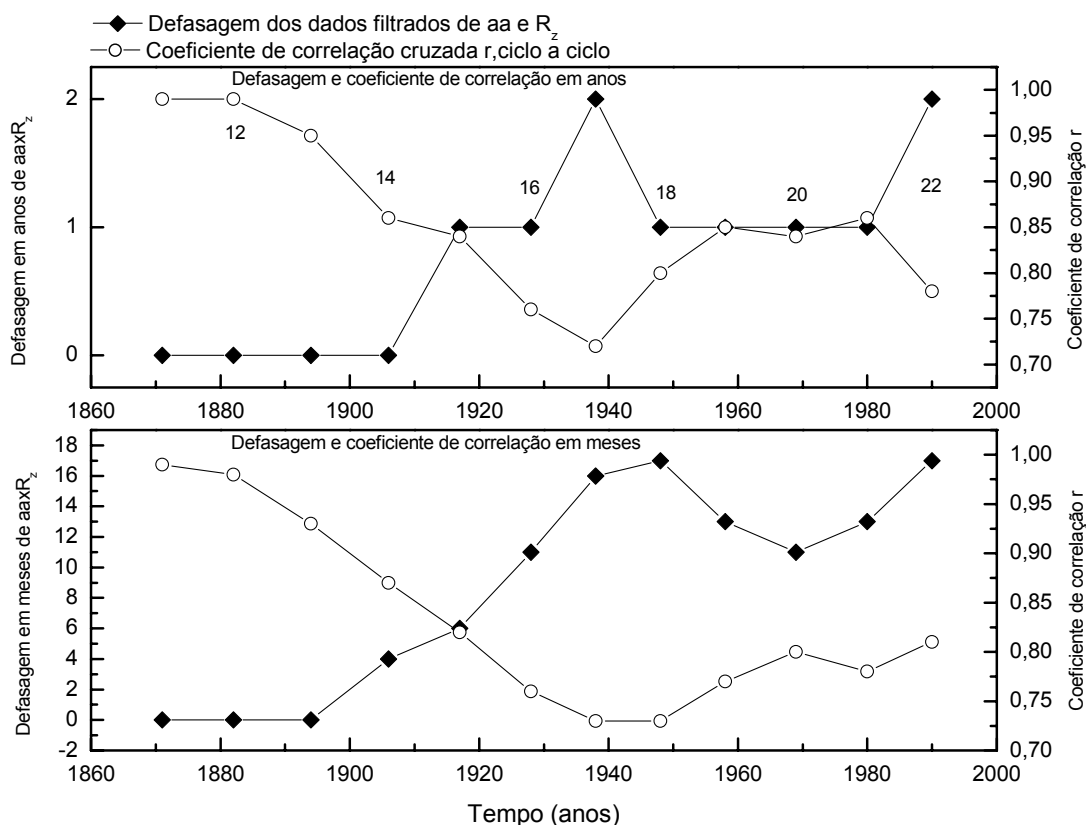


Figura 4.8: Tendência da defasagem e do coeficiente de correlação das séries anuais e mensais filtradas entre o intervalo de 9 a 13 de R_z e aa ciclo a ciclo. A) Séries anuais filtradas, b) séries mensais filtradas.

A defasagem entre o índice geomagnético aa e o número de manchas solares R_z , no decorrer dos ciclos, pode estar relacionada principalmente ao forte pico da velocidade do vento solar na fase descendente do ciclo solar. Pode-se observar que com o passar dos ciclos o segundo pico da atividade geomagnética torna-se preponderante em relação ao primeiro, como mostrado na Figura 4.1. Nos ciclos iniciais o primeiro pico de aa é maior que o segundo.

Com o decorrer dos ciclos o segundo pico torna-se maior que o primeiro, e com isso, sua influência no valor médio do índice *aa* se torna maior.

Encontrou-se que quanto maior a defasagem menor é o coeficiente de correlação, indicando que as estruturas que influenciam mais o valor médio da atividade geomagnética, descrita por *aa*, não estão variando em fase com o ciclo de 11 anos das manchas solares.

O comportamento oscilatório e com tendência de decréscimo, na correlação entre *Rz* e *aa* foi também encontrado por Kishcha et al. (1999).

As variações da correlação entre atividade solar (quantificada pelo número de manchas solares) e a atividade geomagnética (quantificada pelo índice geomagnético *aa*) podem resultar das flutuações da defasagem no tempo do índice geomagnético relativo ao número das manchas solares.

Kishcha et al. (1999) deram uma explicação física para o decréscimo na correlação entre a atividade solar e geomagnética, como segue: a atividade geomagnética pode ser separada em duas componentes, como sugerido por Bartels (1963), Venkatesan (1991), Gonzalez et al. (1990) e outros, uma componente associada com o número de manchas solares (atividade magnética transiente) e outra associada com feixes rápidos do vento solar emitidos por buracos coronais solares (atividade magnética recorrente). O máximo na componente recorrente está fora de fase em relação ao máximo do número de manchas solares, por causa da configuração magnética aberta na coroa solar ser mais estável na fase descendente no ciclo das manchas solares. Kishcha et al. (1999) propuseram que o decréscimo na correlação e aumento na defasagem entre *aa* e *Rz* estão conectados à estabilidade da configuração magnética aberta na coroa solar; uma variabilidade de longo período no campo magnético solar de grande escala pode estar causando uma mudança no fluxo magnético aberto, e nas condições do vento solar.

Lockwood et al. (1999) usaram o índice *aa* para extrapolar a variação do fluxo magnético total saindo do Sol desde 1901, encontrando que este aumentou por um fator de 2,3. Considerando-se o período de dados do meio interplanetário, o

aumento foi de 1,4 desde 1964. Eles atribuíram este aumento a variações no dínamo magnético solar, o qual poderia ser aleatório e não quase-periódico.

Os coeficientes de correlação e as defasagens, obtidas ciclo a ciclo (do ciclo 11 ao 22), das séries anuais e mensais de *aa* e *Rz*, e das séries filtradas são mostrados na Tabelas 4.3a e 4.3b.

Tabela 4.3a: Correlações cruzadas ciclo a ciclo dos dados brutos e dos dados filtrados.

Dados	Ciclo 11		Ciclo 12		Ciclo 13		Ciclo 14		Ciclo 15		Ciclo 16	
	<i>lag</i>	<i>r</i>	<i>lag</i>	<i>r</i>	<i>Lag</i>	<i>r</i>	<i>lag</i>	<i>r</i>	<i>lag</i>	<i>r</i>	<i>lag</i>	<i>r</i>
Anual	0	0,89	-1	0,54	0	0,84	-1	0,62	0	0,71	-1	0,51
Mensal	1	0,75	0	0,35	-1	0,66	0	0,45	-7	0,45	-4	0,34
Filtrado Anual	0	0,99	0	0,99	0	0,95	0	0,86	-1	0,84	-1	0,76
Filtrado Mensal	0	0,99	0	0,98	0	0,93	-4	0,87	-6	0,82	-11	0,76

Tabela 4.3b: Correlações cruzadas ciclo a ciclo dos dados brutos e dos dados filtrados.

Dados	Ciclo 17		Ciclo 18		Ciclo 19		Ciclo 20		Ciclo 21		Ciclo 22	
	<i>lag</i>	<i>r</i>	<i>lag</i>	<i>r</i>	<i>lag</i>	<i>r</i>	<i>Lag</i>	<i>r</i>	<i>lag</i>	<i>r</i>	<i>lag</i>	<i>r</i>
Anual	-2	0,61	-4	0,40	0	0,83	-5	0,54	-3	0,70	0	0,69
Mensal	-20	0,30	-47	0,25	-3	0,54	-56	0,36	-31	0,48	-3	0,45
Filtrado Anual	-2	0,72	-1	0,80	-1	0,85	-1	0,84	-1	0,86	-2	0,78
Filtrado Mensal	-16	0,73	-17	0,73	-13	0,77	-11	0,80	-13	0,78	-17	0,81

4.2- Análise Espectral do *Rz* e do *aa* Utilizando o Método de Janelamento Múltiplo

Nesta Seção é feita a análise espectral das séries temporais anuais e mensais do número de manchas solares (*Rz*) e do índice geomagnético *aa* para o intervalo de 1868 a 2000. Para esta análise foi aplicado o método de janelamento múltiplo (*MULTIPLE TAPER METHOD* – MTM) desenvolvido por Thomson (1982). O MTM foi aplicado para 8 janelas ($NW=8$), e somente períodos com nível de confiança acima de 95% são considerados. Utilizaram-se 8 janelas por que foi o número que apresentou melhores valores do nível de confiança. Através desta análise pretende-se investigar a constituição espectral das séries temporais dos índices que representam a atividade solar e geomagnética, buscando correlacioná-los como causa e efeito, avaliá-las e compará-las com resultados publicados na literatura científica. Pontos de correspondências e diferenças são relatados.

Na Figura 4.9 é mostrada a análise espectral utilizando MTM para as séries anuais de *Rz* e *aa* no intervalo de 1868 a 2000. São apresentados os períodos com nível de confiança maior que 95%. Esta análise revela que o ciclo solar de 11 anos esta presente em ambas às séries (11,1 anos), com uma forte amplitude. Na série de *Rz* também aparece um período de 10,2 anos que não esta presente na série do *aa*. O espectro do *aa* mostra em adição ao período de 11 anos os períodos de 5,3; 4,3; 2,7 e 2,1 anos. O ciclo de Hale de 22 anos não foi detectado no espectro das séries anuais de *Rz* nem no do *aa* para período de 1868 a 2000. A existência deste ciclo de 22 anos tem sido questionável (GOSLING et al., 1977; CLIVER et al., 1996), enquanto em algumas análises espectrais esta periodicidade tem sido encontrada (CURRIE, 1973; COURTILLOT et al., 1977; TSIRULNIK et al., 1997; JUCKETT, 2001), em outras tem falhado em sua detecção (FRASER e SMITH, 1972; DELOUIS e MAYAUD, 1975).

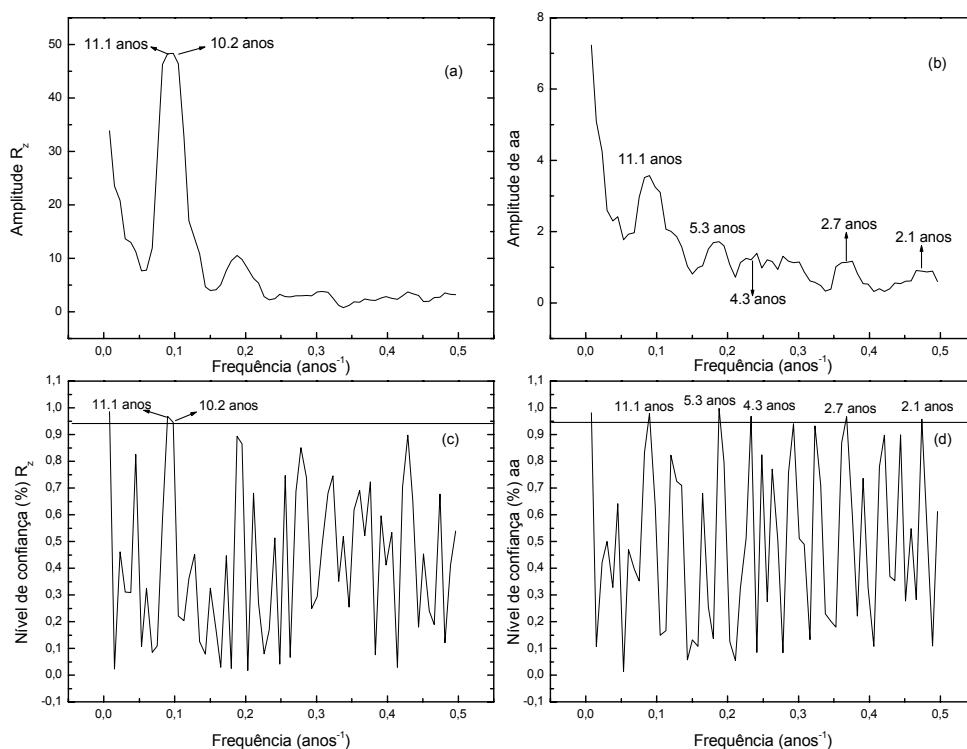


Figura 4.9: Análise espectral das séries anuais de R_z e aa obtidas através do método de múltiplo janelamento (*Multiple Taper Method* – MTM). (a) análise espectral da série anual de R_z . (b) análise espectral da série anual de aa . (c) e (d) apresentam os níveis de confiança dos períodos encontrados através da análise espectral das séries anuais de R_z e aa com confiança > que 95%.

Períodos maiores na série temporal de R_z , como por exemplo, o ciclo de Gleissberg, em torno de 90 anos, é encontrado aplicando análise espectral para um intervalo bem longo, 1700 a 2000. Para este período, aplicando as mesmas condições, os períodos mais significantes encontrados foram 100,7; 21,6; 10,1; 8,1; 4,8; 3,9; 3,6; 3,4; 3,1 e 2,8 anos. O período de 5,5 anos não apresentou um nível de confiança maior que 95%, por isso não relacionado. A Figura 4.10 apresenta o espectro de R_z para o intervalo entre 1700 e 2000. Nota-se que para intervalo de 1700 a 2000, o ciclo em torno de 22 anos foi encontrado.

Várias análises espectrais de Rz foram feitas aplicando diferentes métodos (análise de Fourier, método da máxima entropia) para diferentes períodos (CURRIE, 1973; RODASKI et al., 1975; COURTILLOT et al., 1977; CLUA DE GONZALEZ et al., 1993; TSIRULNIK et al., 1997; JUCKETT, 2001). As características gerais encontradas nas várias análises espectrais são similares entre si com respeito a três fatores: parecer existir um curto ciclo de 5,5 anos; o pico de 11 anos pode ser um triplo pico com um período mais curto, em torno de 8 anos, um mais longo, em torno de 13 anos; e existe um longo ciclo que é encontrado mais frequentemente em torno de 90 anos (HERMAN e GOLDBERG, 1978).

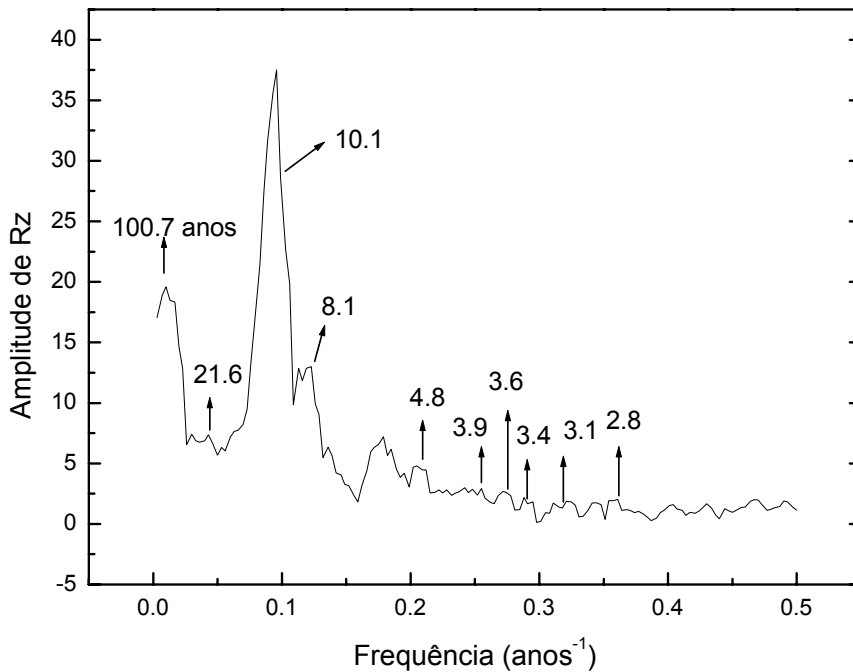


Figura 4.10: Espectro de série anual do número de manchas solares para o período entre 1700 e 2000.

Na Figura 4.11 são apresentados os períodos mais significativos, com nível de confiança maior que 95%, obtidos pelo método MTM para as séries mensais de Rz e aa no intervalo de 1868 a 2000. Para a série de Rz foram encontrados os períodos de 133 meses (11,1 anos), 18,5 e 17,7 meses. Na série do aa foram encontrados, além do período de 133 e 17,5 meses, os períodos de 63,8 (2,3

anos); 51,5 (4,3 anos); 12,7 e 6 meses. O período de 6 meses apresentou uma confiabilidade de 100%, com uma forte amplitude. Outros períodos que foram encontrados são mostrados na Tabela 4.4b.

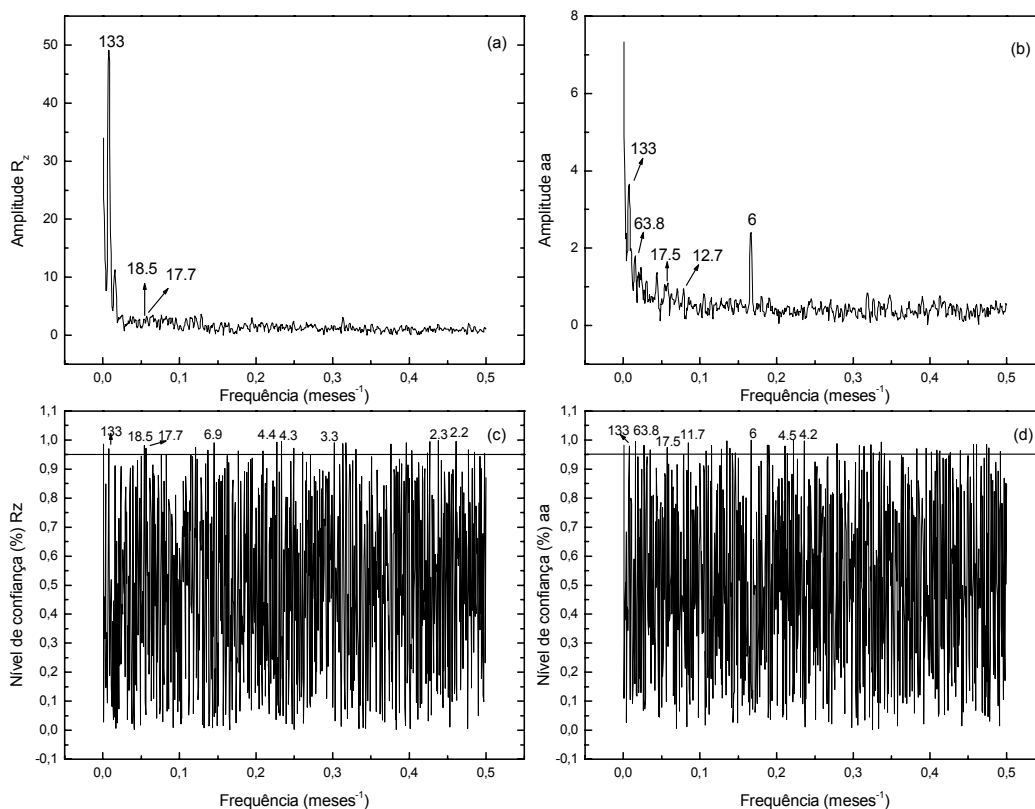


Figura 4.11: Análise espectral das séries mensais de R_z e aa obtidas através do método de múltiplo janelamento (MTM). (a) análise espectral da série mensal de R_z . (b) análise espectral da série mensal de aa . (c) e (d) apresentam os níveis de confiança dos períodos encontrados através da análise espectral das séries mensais de R_z e aa com confiança > que 95%.

Tanto a atividade solar quanto a geomagnética apresentam uma tendência de aumento com o passar do tempo, como observado nas séries anuais e mensais de R_z e aa , mostradas nas Figuras 4.12 e 4.13.

Na Figura 4.12 são apresentadas as séries temporais anuais de R_z e aa para o período de 1868 a 2000 com suas tendências de aumento com o passar do tempo, estimadas através de um ajuste linear ($y= a+bx$), e também são mostradas as séries de R_z e aa sem suas tendências lineares.

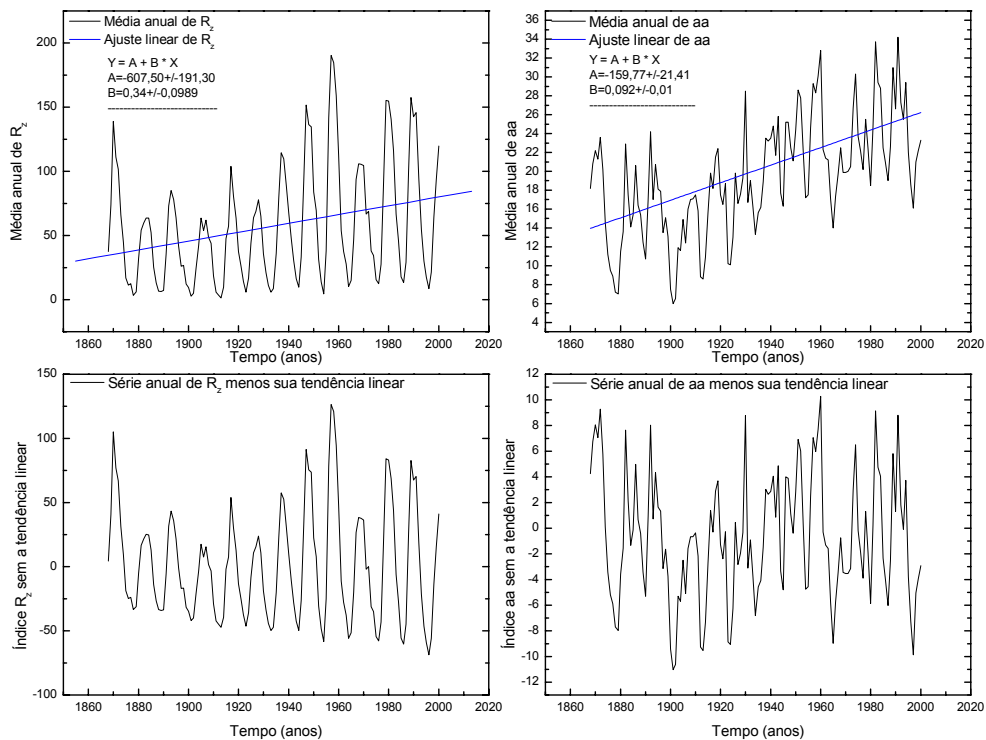


Figura 4.12: Séries anuais de R_z e aa com suas tendências lineares de aumento (painéis superiores), e as séries sem suas tendências (painéis inferiores).

A Figura 4.13 mostra as séries temporais mensais de R_z e aa com suas tendências de aumento com o passar do tempo, e as séries de R_z e aa sem suas tendências lineares.

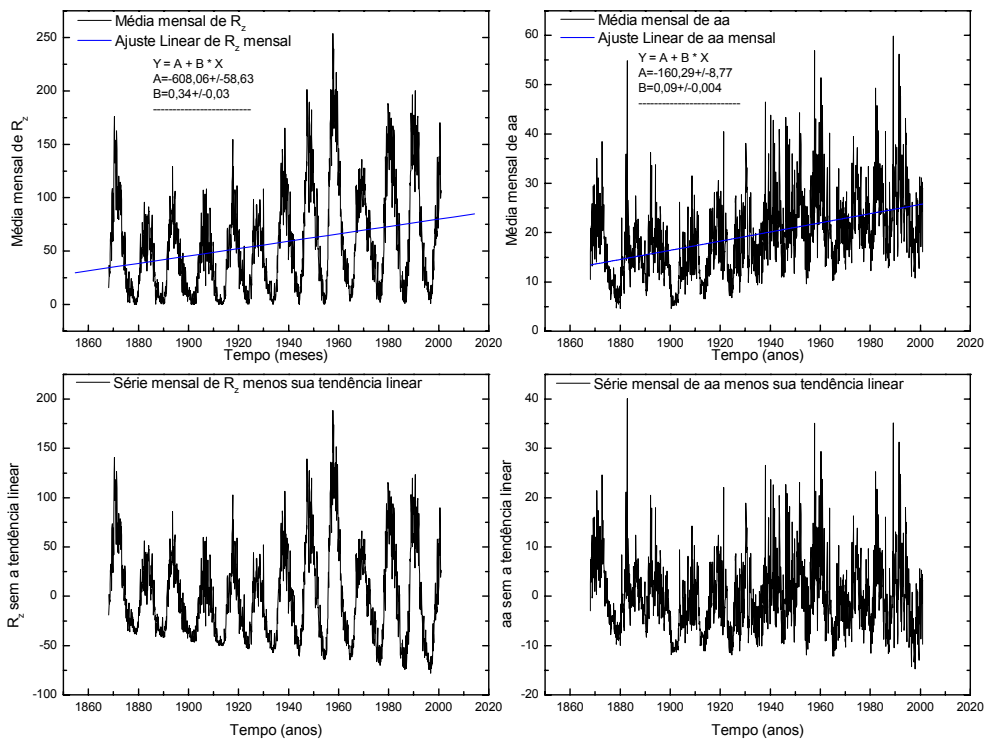


Figura 4.13: Séries mensais de R_z e aa com suas tendências lineares de aumento (painéis superiores), e as séries sem suas tendências (painéis inferiores).

Na Figura 4.14 são apresentados os espectros e os períodos mais significativos, com nível de confiança maior que 95%, obtidos pelo método MTM para as séries anuais de R_z e aa sem sua tendência linear de aumento no intervalo de 1868 a 2000. Os períodos encontrados para ambas as séries sem suas tendências de aumento, são praticamente os mesmos encontrados nas séries normais de R_z e aa . Para a série de R_z foram encontrados os períodos de 11,1 e 10,2 anos. Na série do aa foram encontrados, além do período de 11,1 anos, os períodos de 5,3; 4,3; 3,4 e 2,7.

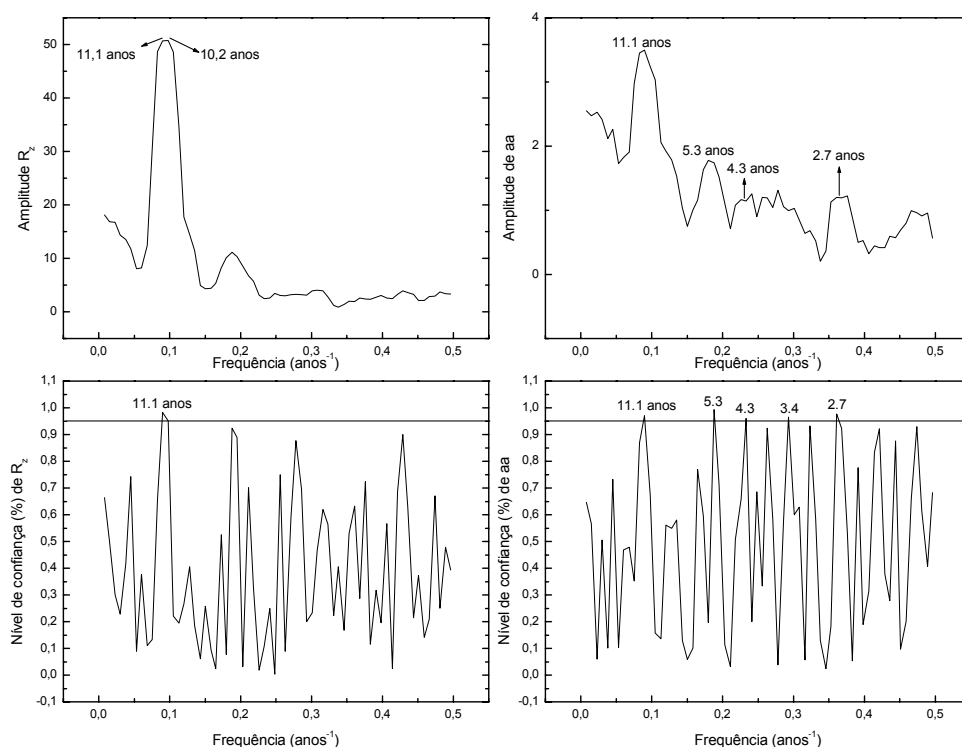


Figura 4.14: Análise espectral das séries anuais de R_z e aa sem sua tendência linear de aumento, obtidas através do método de múltiplo janelamento (MTM). (a) análise espectral da série anual de R_z sem sua tendência. (b) análise espectral da série anual de aa sem sua tendência. (c) e (d) apresentam os níveis de confiança dos períodos encontrados através da análise espectral das séries mensais de R_z e aa com confiança > que 95%.

Na Figura 4.15 são apresentados os espectros e os períodos mais significativos, com nível de confiança maior que 95%, obtidos pelo método MTM para as séries mensais de R_z e aa sem sua tendência linear de aumento no intervalo de 1868 a 2000. Os períodos encontrados para ambas as séries são semelhantes aos encontrados nas séries normais de R_z e aa com suas tendências. Os períodos mais significativos encontrados na série de R_z foram de 133 meses (11,1 anos); 17,7; 13; 12 e 4,3 meses. Na série do aa foram encontrados, além do período de 133 meses, os períodos de 63,8; 6 e 3 meses.

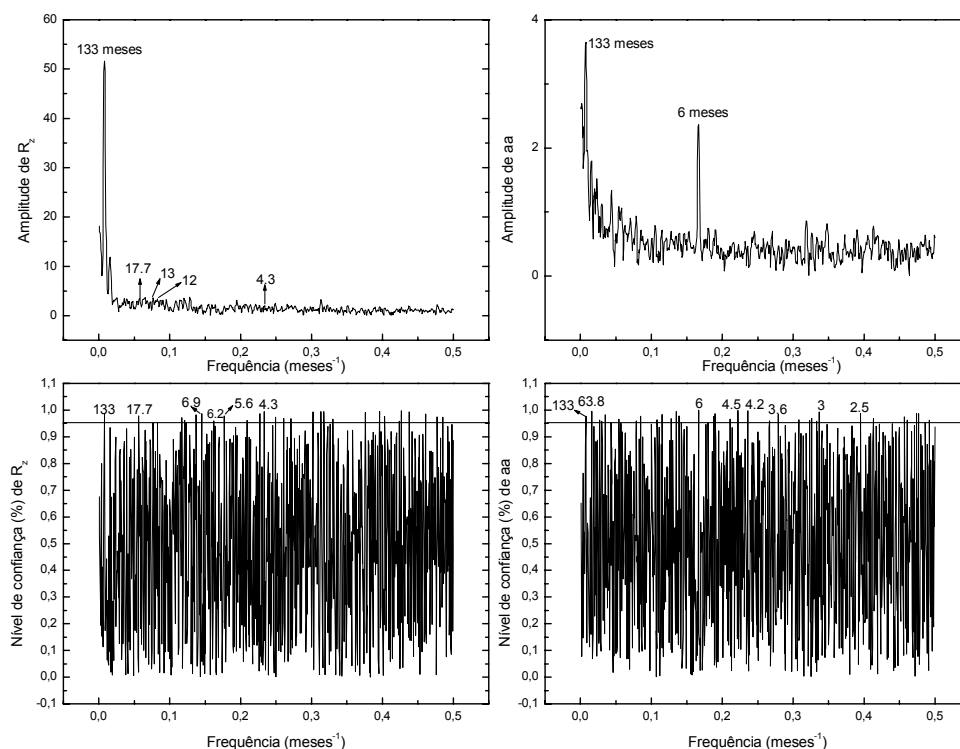


Figura 4.15: Análise espectral das séries mensais de Rz e aa sem sua tendência linear de aumento, obtidas através do método de múltiplo janelamento (MTM). (a) análise espectral da série mensal de Rz sem sua tendência. (b) análise espectral da série mensal de aa sem sua tendência. (c) e (d) apresentam os níveis de confiança dos períodos encontrados através da análise espectral das séries mensais de Rz e aa com confiança $>$ que 95%.

Como era de se esperar, a análise espectral utilizando MTM mostra o período de 11 anos na série temporal do número de manchas solares (Rz) e na série geomagnética (aa), com forte amplitude.

Foram sugeridas duas causas para a existência do período de 4,3 anos no espectro do aa , que não está presente no espectro de Rz . Uma possível causa estaria ligada à distribuição de pico duplo das tempestades geomagnéticas intensas, sugerida por Clúa de Gonzalez et al. (1993), por causa da separação entre os picos ser de 3 a 4 anos; e a outra causa estaria relacionada a uma

periodicidade similar nos feixes de alta velocidade associada à passagem de setor, sugerida por Rangarajan e Iyemori (1997).

Dimitriev et al. (2000) analisaram os parâmetros do vento solar próximo à órbita da Terra durante os últimos três ciclos solares. Eles encontraram que a densidade do vento solar variou de 10 a 30% em torno de seu valor médio durante os ciclos solares, e esta variação apresentou uma onda de cinco anos dominante sobre a onda de onze anos no ciclo solar. Como relatado por Stamper et al. (1999), que a densidade é um dos fatores que mais contribui para a atividade geomagnética, sugere-se que uma possível causa para o período de 5,3 anos (63,8 meses) encontrado na série anual (série mensal) do *aa* é esta variação na densidade do vento solar. Outra hipótese para este período em *aa* pode ser o primeiro harmônico do ciclo solar de 11 anos.

O período de 6 meses, associado a variação semi-anual ou sazonal da atividade geomagnética, é caracterizado por um nível maior da geofetividade nos equinócios do que nos solstícios. Há três hipóteses aceitas para explicar esta variação sazonal, que são: o efeito Russell-McOherron (1973), a hipótese equinocial e a hipótese axial. O mecanismo Russell-McPherron (RM) é um efeito de projeção que depende da estação. O campo magnético interplanetário (IMF), orientado no sistema de coordenadas heliosférica do Sol, projeta uma componente na direção sul no sistema de coordenada de orientação do dipolo da Terra quando ele aponta na direção do Sol no outono do hemisfério norte (pico de março) e para fora do Sol durante a primavera do hemisfério norte (pico de setembro). Na hipótese equinocial a atividade geomagnética é máxima quando o ângulo entre a linha Sol-Terra (isto é, direção do fluxo do vento solar) e o eixo de dipolo da Terra é 90° , e menor em outras épocas do ano. Este efeito contribui para reduzir a eficiência de acoplamento da magnetosfera nos solstícios. Na hipótese axial, os picos da atividade geomagnética aparecem quando a Terra está em suas latitudes heliosféricas mais alta, onde ela está melhor alinhada com qualquer fluxo de ICME (ejeção de massa coronal interplanetária) transiente propagando-se radialmente e feixes de alta velocidade de buracos coronais de média latitude. Clúa de Gonzalez et al. (1993) mostraram que os três efeitos trabalham juntos para produzir a variação

observada na atividade geomagnética e propuseram que estes mecanismos atuam como fatores moduladores na resposta geomagnética para fontes de atividade aleatórias, ao passo que as tempestades geomagnéticas também apresentam variação sazonal. Cliver et al. (2000) sugeriram que a hipótese equinocial explica melhor as muitas modulações semi-anuais em vez dos mecanismos de Russell-McPherron e axial. Eles estimaram que o efeito equinocial é responsável por Aproximadamente 65% da modulação sazonal ao passo que os outros dois mecanismos fornecem somente 15 a 20% de cada.

As Tabelas 4.4a e 4.4b apresentam os períodos e suas respectivas amplitudes obtidos através do método MTM, com nível de confiança maior que 95%. A Tabela 4.4a mostra os períodos obtidos das séries anuais de *Rz* e *aa* e a Tabela 4.4b mostra os períodos obtidos das séries mensais.

Tabela 4.4a: Períodos encontrados com os valores anuais brutos de *Rz* e *aa* (8 janelas).

<i>Rz</i>		<i>aa</i>	
Período(anos)	Amplitude	Período(anos)	Amplitude
11,1	48,275	11,1	3,568
10,2	48,315	5,3	1,717
		4,3	1,215
		2,7	1,136
		2,1	0,895

Tabela 4.4b: Períodos encontrados com os valores mensais brutos de *Rz* e *aa*.

<i>Rz</i>		<i>aa</i>	
Período(meses)	Amplitude	Período(meses)	Amplitude
133 (11,1)	49,11	133 (11,1)	3,66
122,8 (10,2)	49,11	63,8 (5,3)	1,8
63,8	11,28	51,5 (4,3)	1,25
20	1,36	37,1	0,92
18,5	2,72	32,7	1,12
17,7	2,8	28,5	0,6
13	3,45	17,5	1,03
12	3	12,7	0,95
8,7	2,95	11,7	0,70
8,5	2,36	9,2	0,30
8,3	1,65	8,7	0,57
7,3	2,06	7,8	0,56
6,9	1,87	7,4	0,57
6,2	1,47	7,1	1,14
5,6	1,91	6,8	0,66
4,8	1,83	6	2,4
4,4	1,7	5,2	1,28
4	2,4	4,6	1,28
3,8	1,01	4,3	0,47
3,7	1,72	3,7	0,99
3,3	1,6	3,2	0,67
3,2	3,1	3	1,04
3,1	1,52	2,9	1,63
3	1,16	2,7	0,67
2,8	1,9	2,5	1,22
2,7	1,05	2,4	1,91
2,5	3,09	2,3	0,99
2,3	4,31	2,2	1,85
2,1	2,99	2,1	0,75
2	3,8	2	0,54

4.3 Regressão Linear Múltipla Entre aa , Rz e $Fpk500$

A atividade geomagnética é modulada pelo nível de atividade solar, caracterizada pelo número de manchas solares (Rz). As variações na atmosfera do Sol são transmitidas para a magnetosfera da Terra através do vento solar. Durante um ciclo solar, diferentes estruturas contribuem para o nível da atividade geomagnética, por exemplo, feixes rápidos emitidos de buracos coronais de baixas latitudes e ejeções de massa coronal (e. g., GOSLING, 1993; KIVELSON e RUSSELL, 1995; BRAVO et al., 1998; STAMPER et al., 1999; BAKER, 2000; RICHARDSON et al., 2000; GONZALEZ et al., 2001; WEBB et al., 2001). Para quantificar a atividade geomagnética, valores médios anuais do índice aa foram utilizados. Com o objetivo de quantificar a contribuição de diferentes estruturas solares para a atividade geomagnética de longo período, uma regressão linear múltipla entre o índice aa^* (aa estimado), Rz e a fração de dias por ano cujo pico da velocidade do vento solar foi maior que 500km/s ($Fpk500$) foi feita. Uma função empírica foi derivada para calcular aa^* a partir de Rz e $Fpk500$. Para o cálculo de $Fpk500$ foram utilizados os dados obtidos da base de dados OMNI entre 1964 e 2000.

Para a análise dos dados, usou-se a média anual do índice aa , o valor médio anual do número de manchas solares (Rz) e a fração anual de feixes de alta velocidade ($Fpk500$), para o período de 1964 a 2000, período no qual os dados do vento solar estão disponíveis. Utilizaram-se os parâmetros Rz e $Fpk500$ para quantificar a atividade geomagnética, descrita pelo índice aa , pelo fato de que o número de manchas (Rz) está relacionado principalmente a regiões de campo magnético solar fechado, e $Fpk500$ está associado a regiões de campo aberto (RICHARDSON et al., 2000; WANG et al., 2000; WEBB et al., 2001).

Os feixes de alta velocidade são gerados por buracos coronais e por CMEs, mas nem todas as CMEs têm alta velocidade. Elas podem apresentar velocidade da ordem de grandeza do vento solar ambiente ou menor (GOSLING et al., 1991; VENNERSSTROEM, 2001). Gosling et al. (1991) relatou que ejeções de massa coronal (CMEs) interplanetária rápidas são a causa de quase todas grandes tempestades não-recorrentes mas, também, que somente um sexto de todas as CMEs interplanetárias direcionadas para a Terra

produzem grandes tempestades. Quando se utilizou *Fpk500* para o cálculo de *aa** consideraram-se feixes de altas velocidades causados tanto por CMEs, quanto por buracos coronais. Como está se considerando uma média de longo período de todos feixes rápidos *Fpk500* (valores anuais), as contribuições das CMEs não são preponderantes para *Fpk500*. Isto ocorre porque as CMEs além de serem esporádicas duram um período curto, em média 2 a 3 dias, enquanto *Fpk500* causado por buracos coronais, além de durarem vários dias, se repetem por várias rotações solares. Com isso, a periodicidade de *Fpk500* total ($Fpk500 \text{ total} = Fpk500 \text{ devido a CMEs} + FPK \text{ devido ao buracos coronais}$) vai seguir o ciclo dos buracos coronais, devido aos feixes rápidos gerados por eles serem preponderantes. Como há mais buracos coronais em baixas e médias latitudes na fase descendente do ciclo de *Rz*, teremos um pico nos feixes rápidos nesta fase. Isto se observa na Figura 4.16.

A Figura 4.16 mostra as séries temporais do índice geomagnético (*aa*), da fração de feixes rápidos do vento solar (*Fpk500*) e do número de manchas solares (*Rz*). Observa-se que o índice geomagnético *aa* apresenta um comportamento semelhante ao *Fpk500*, e que a máxima intensidade no valor médio de *Fpk500* esta deslocado em relação ao número de manchas solares (*Rz*).

Fez-se a correlação cruzada entre os parâmetros envolvidos nesta análise, no intervalo de 1964 a 2000, e obtem-se os seguintes resultados: da correlação entre *aa* x *Fpk500* obteve-se um coeficiente de correlação (*r*) de 0,72 com uma defasagem de zero anos; entre *aa* x *Rz* obteve-se $r = 0,50$ para uma defasagem = -2 anos, e *Fpk500* x *Rz* obteve-se $r = 0,57$ com uma defasagem = 6 anos ou uma anticorrelação $r = -0,48$ com uma defasagem = 2 anos.

A Terra passa aproximadamente 10% do tempo no mínimo solar em estruturas de vento solar relacionadas a CMEs e 30% no máximo; enquanto que a Terra passa aproximadamente 60% do tempo no mínimo em estruturas de feixes corrotantes e 30% no máximo (RICHARDSON et al., 2000).

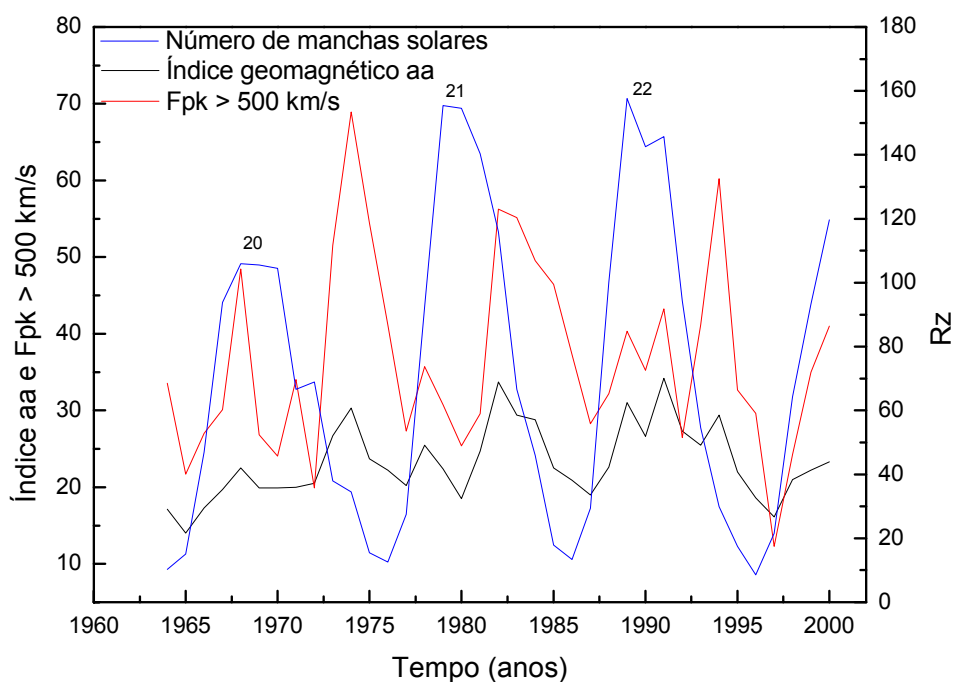


Figura 4.16: Médias anuais das séries temporais de Rz e aa e fração de dias por ano cujo pico da velocidade do vento solar foi maior que 500km/s ($Fpk500\text{km/s}$) para o intervalo de 1966 a 2000.

A Figura 4.17 Apresenta a comparação das séries temporais anuais do índice geomagnético aa^* estimado, em função do número de manchas solares Rz , da fração anual de feixes de alta velocidade ($Fpk500 > 500\text{ km/s}$), e do índice aa observado.

O índice aa^* foi estimado através da correlação múltipla. Considerando o caso em que o comportamento de uma variável dependente y , no caso o índice aa^* , em função de várias variáveis independentes x_i , neste caso levando em consideração apenas duas variáveis independentes, Rz e $Fpk500$, a equação que se obtém é:

$$aa^* = a_0 + a_1 Fpk500 + a_2 Rz \quad (4.1)$$

onde os parâmetros a_0 , a_1 e a_2 são os coeficientes obtidos do melhor ajuste linear.

Os valores obtidos da regressão linear múltipla para os coeficientes foram: $a_0=9,25\pm 1,58$; $a_1=0,29\pm 0,03$ e $a_2=0,04\pm 0,01$. Estes valores são significativos ao nível de 99% (teste t). Logo o melhor ajuste é dado por:

$$aa^* = (9,25\pm 1,58) + (0,29\pm 0,03)Fpk500 + (0,04\pm 0,01)Rz \quad (4.2)$$

Através de aa^* calculado, obteve-se que 71% da variabilidade no aa pode ser explicado por uma dependência linear do aa em relação à Rz e $Fpk500$ ($R^2=0,71$; obtido da correlação múltipla). Observa-se na Figura 4.17 que aa^* perde intensidade a partir de 1980.

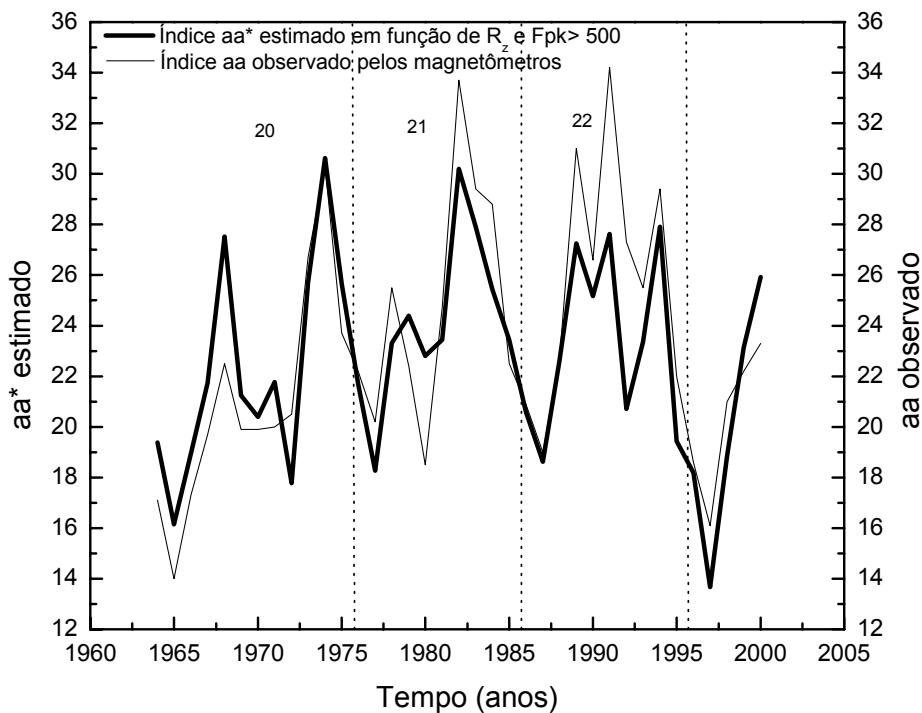


Figura 4.17: Índice geomagnético aa^* estimado a partir de Rz e $Fpk500$ (linha grossa), e o índice aa observado (linha fina).

A Figura 4.18 mostra a regressão linear de aa observado com o valor estimado através da equação 4.2 (aa^*). A equação de regressão linear é;

$$aa = a + b aa^* \quad (4.3)$$

Através da regressão linear obtiveram-se os seguintes coeficientes: $a = -0,33$ e $b = 1,03$. Logo; $aa = -0,33 + 1,03 aa^*$. O coeficiente de correlação entre eles foi $r = 0,84$. Com esses valores pode-se concluir que aa^* estimado é uma boa representação do aa observado.

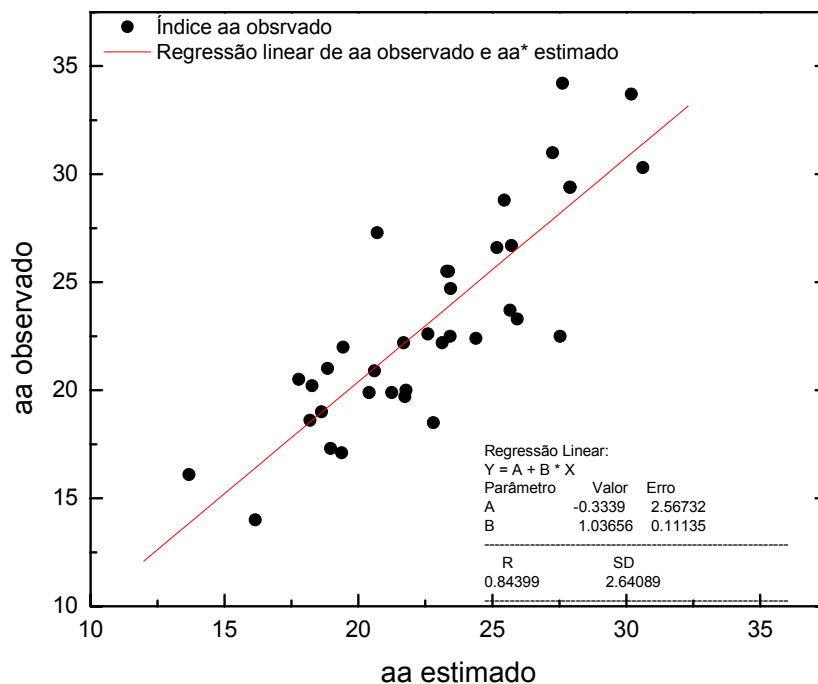


Figura 4.18: Regressão linear entre aa observado contra aa^* estimado (dado pela equação 4.2).

Stamper et al. (1999) encontraram da regressão linear de aa contra aa^* o melhor ajuste entre eles dado por; $aa^* = 2,91 + 0,88 aa$. Na reconstrução obtida por Stamper et al. (1999), uma melhor concordância foi observada pois mais variáveis foram consideradas. Particularmente o efeito do campo magnético total, não considerado neste trabalho, pode responder por 50% da variação de aa (STAMPER et al., 1999). A reconstrução deste trabalho é melhor até aproximadamente 1980; isto é explicado, pois até cerca de 1976, a correlação entre a atividade geomagnética e v^2 do vento solar é alta ($r = 0,86$ segundo Crooker et al. 1977). Após 1976 a correlação $Ap \times v^2$ começa cair (CROOKER e GRINGAUZ, 1993) o que pode ser explicado pela maior magnitude das

variações de Bz no ciclo 21 e conseqüentemente maior dependência da atividade geomagnética de B (STAMPER et al., 1999).

Através desta reconstrução de aa em função de Rz e $Fpk500$ somos levados a concluir que se deve levar em consideração, além da periodicidade de Rz , o comportamento dos buracos coronais, para estimar qual será o comportamento de AA , devido aos buracos coronais gerarem feixes de alta velocidade.

A Figura 4.19 mostra o índice geomagnético aa observado e aa^* estimado em função de Rz e $Fpk500$. Apresenta também a comparação das séries temporais anuais do índice geomagnético aa^1 calculado só com $Fpk500$, aa^2 calculado só em função de Rz e o termo independente aa^3 .

Obteve-se aa^1 através do coeficiente de $Fpk500$ obtido pela regressão múltipla e pela série temporal de $Fpk500$;

$$aa^1 = a_1 Fpk500 \quad (4.4)$$

E aa^2 através do coeficiente de Rz obtido pela regressão múltipla e pela série temporal de Rz ;

$$aa^2 = a_2 Rz \quad (4.5)$$

Fez-se este cálculo para ver qual seria o comportamento de aa se ele fosse só dependente de $Fpk500$ ou só dependente de Rz . Pode-se ver pelo gráfico que se aa^1 só depender de $Fpk500$, ele apresenta um comportamento semelhante ao aa observado só com valores menores. Isto indica que as estruturas relacionadas aos buracos coronais estão contribuindo mais para o índice geomagnético aa . Se aa^2 depender só da série de Rz ele apresenta um comportamento periódico com período médio de 11 anos e não apresenta picos múltiplos, e ele teria um valor menor, em torno de uma ordem de grandeza. Vê-se que Rz modula o período de 11 anos em aa e $Fpk500$ modula freqüências maiores.

Através desta regressão, onde estão envolvidas duas configurações distintas do campo magnético solar, pode-se observar qual delas está contribuindo mais para a atividade geomagnética.

Pelos resultados obtidos pode-se ver que os feixes de alta velocidade contribuem mais para o valor médio de aa do que as estruturas que estão em fase com o ciclo solar.

As ejeções de massa coronal e associados (choques/região da bainha/ejeção) estão em fase com o ciclo solar, ou seja, com o número de manchas solares; já os buracos coronais, que são fontes de feixes de alta velocidade, estão presentes predominantemente nas fases ascendente e descendente do ciclo solar, como se observa na Figura 2.4 (GONZALEZ et al. 1996).

Podemos ver também que ao se calcular aa dependente de Rz e $Fpk500$, ele apresenta o pico duplo como o aa observado. Já, se fizermos aa só dependente de Rz não temos a presença do pico duplo e se fizermos só dependente de $Fpk500$ o pico duplo está presente; em ambos os casos o valor de aa dependente apenas de uma variável ou de outra, tem um valor menor que aa observado.

A dependência de aa em função de $Fpk500$ é devido aos feixes de alta velocidade contribuírem aproximadamente 70% de valor médio de aa fora do máximo solar e aproximadamente 30% no máximo solar como mostrado por Richardson et al. (2000).

Como o índice aa está bem correlacionado com o vento solar de altas velocidades, que são gerados em buracos coronais e está em fase com este, pode-se concluir que o valor médio do índice aa é mais suscetível as condições do vento solar relacionadas aos buracos coronais do que com as condições do vento solar relacionadas ao ciclo do número das manchas solares Rz . Podemos observar isto quando escrevemos o índice aa só em função de $Fpk500$ e comparamos com aa só dependente de Rz .

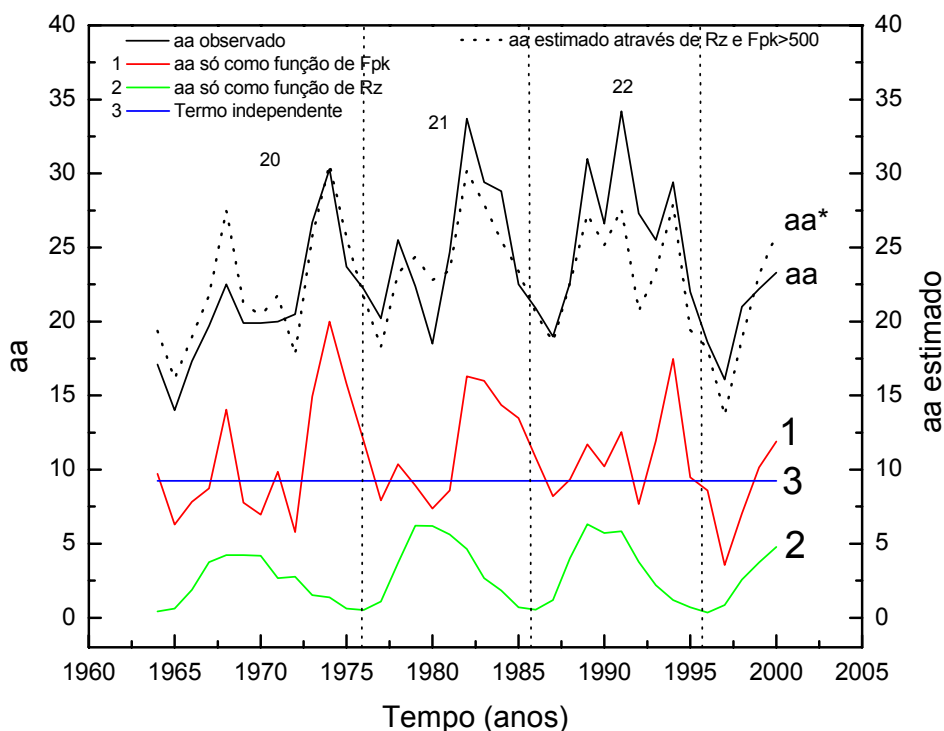


Figura 4.19: Índice geomagnético aa observado (linha pontilhada), e aa^* estimado em função de Rz e $Fpk500$ (linha cheia), aa^1 estimado só em função de $Fpk500$ (linha vermelha), aa^2 estimado só em função de Rz (linha verde), aa^3 termo independente (linha azul).

Esta reconstrução está mostrando que o índice geomagnético aa é influenciado pelo número de manchas e a atividade associada a este, mas principalmente pelas variações causadas no meio interplanetário pelas atividades solares relacionadas à existência de feixes rápidos, que estão principalmente ligados aos buracos coronais.

A Figura 4.20 mostra o índice geomagnético aa^* estimado com Rz e $Fpk500$ em fase com aa , e o índice aa observado. Fez-se este cálculo para ver qual era o comportamento do aa , considerando que as estruturas de campo magnético solar aberto e fechado estivessem em fase.

Os valores obtidos da regressão linear múltipla para os coeficientes foram: $a_0=11,84\pm 1,50$; $a_1=0,24\pm 0,04$ e $a_2=0,04\pm 0,01$. Estes valores são significativos em 99%. Logo o melhor ajuste é dado por:

$$aa^* = (11,84 \pm 1,50) + (0,24 \pm 0,04)Fpk500 + (0,04 \pm 0,01)Rz \quad (4.6)$$

Através de aa^* calculado, obteve-se que 67% da variabilidade no aa pode ser explicado por uma dependência linear do aa em relação à Rz e $Fpk500$ ($R^2 = 0,67$; obtido da correlação múltipla). Observa-se na Figura 4.20 que aa^* perde potência a partir de 1977 e que para o último ciclo o índice aa^* estimado usando $Fpk500$ e Rz em fase, apresenta somente dois picos.

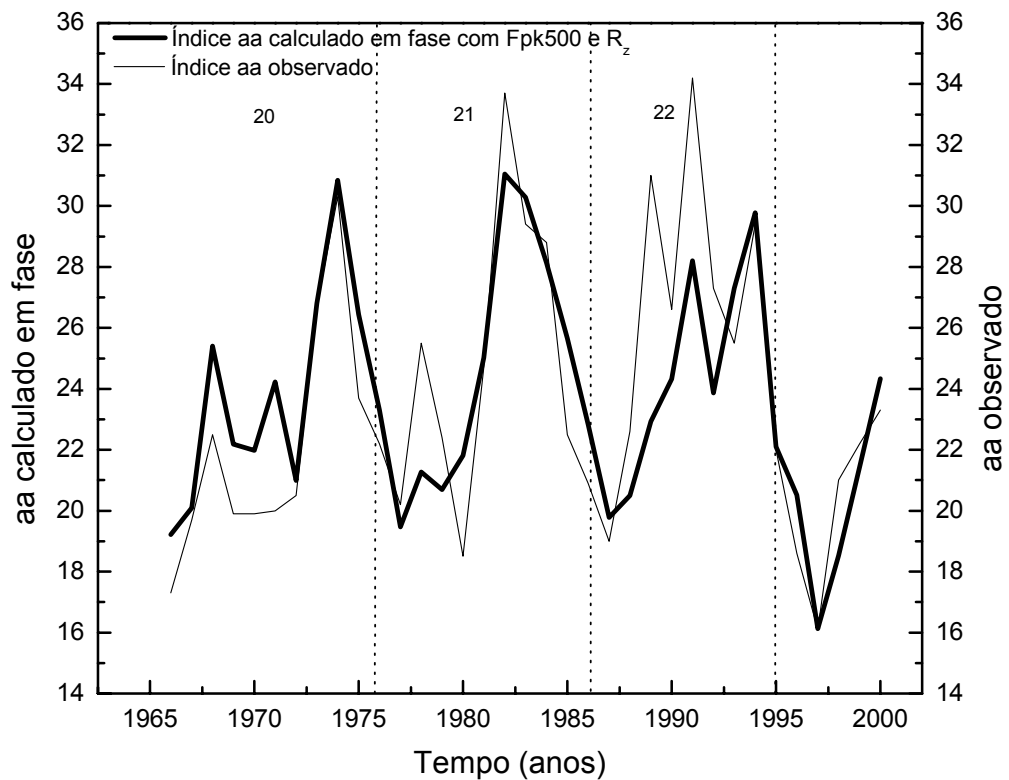


Figura 4.20: Índice geomagnético aa^* estimado com Rz e $Fpk500$ em fase (linha grossa), e o índice aa observado (linha fina).

Através da regressão linear de aa observado com o valor estimado através da equação 4.6 (aa^*), obteve-se os seguintes coeficientes: $a = -1,70$ e $b = 1,06$. Logo; $aa = -1,70 + 1,06 aa^*$. O coeficiente de correlação entre eles foi $r = 0,81$.

Através deste estudo concluímos que aproximadamente 71% da variabilidade do índice *aa* está associada a variação de *Rz* e *Fpk500*. Os feixes de alta velocidade estão em fase com *aa* e tem um peso maior do que *Rz* que está defasado de *aa* por 2 anos. Com o resultado que obtivemos podemos ver que o índice geomagnético *aa* não está somente associado com *Rz*, o qual está associado a regiões de campo magnético solar fechado, mas também com a ocorrência de buracos coronais, associados a regiões de campo magnético aberto e identificados no meio interplanetário através de feixes rápidos (SUESS e TSURUTANI, 1998; RICHARDSON et al., 2000).

Observa-se através desta análise que a atividade geomagnética (*aa*) de longo período esta mais relacionada a estruturas de campo magnético solar aberto (buracos coronais) do que estrutura de campo fechado. Os buracos coronais, que podem durar algumas semanas, geram feixes recorrentes de partículas que provocam um aumento na velocidade média do vento solar. Sendo a energia de acoplamento (*E*), entre o vento solar e a magnetosfera proporcional à velocidade do vento solar e à componente vertical do campo magnético interplanetário ($\mathbf{v} \times \mathbf{B}_z$), tem-se, com o aumento da velocidade média do vento solar, um conseqüente aumento de *E* (GONZALEZ et al., 1992; VENNERSTROEM, 2001).

Nos ciclos iniciais *aa* e *Rz* apresentam uma alta correlação e estão em fase. Extrapolando a análise de *aa*, *Rz* e *Fpk500*, para o intervalo de 1868 a 2000 (compreendendo ciclo 11 ao 22), e supondo que as relações *aa* e *Fpk500* se mantêm, pode-se dizer que *Fpk500* estava em fase com *Rz* nos ciclos iniciais. Com o passar do tempo *aa* e *Rz* ficam fora de fase, logo se infere que *Fpk500* esta se defasando de *Rz* com o passar do tempo. Especula-se que as estruturas de campo magnético aberto (buracos coronais) estão variando de maneira diferente do que estruturas de campo magnético relacionadas às manchas solares. A causa desta variação seria uma evolução temporal do campo magnético total solar, o qual estima-se teria aumentado 2,4 vezes desde 1900 (LOCKWOOD et al., 1999).

4.4 Correlação de Longo Período dos Índices Geomagnéticos *AE*, *Dst*, *Ap* e *aa*, e suas Dependências com Fatores Solares (*Rz* e *Fpk500*).

A atividade geomagnética pode ser separada em duas componentes, a componente associada com a atividade solar transiente (componente esporádica) e uma associada com feixes rápidos do vento solar causados por buracos coronais (componente recorrente) (LEGRAND e SIMON, 1981; VANNERSTROM e FRIIS-CHRISTENSEN, 1996). A atividade geomagnética é causada por uma ampla variedade de diferentes sistemas de correntes magnetosféricas e ionosféricas, geradas por diferentes processos físicos. Com isso, diferentes índices geomagnéticos têm sido construídos, para monitorar diferentes partes desses sistemas de correntes. O índice *Dst* é derivado de observatórios de baixas e médias latitudes para monitorar a corrente de anel magnetosférica; e *AE* é derivado de observatórios em latitudes aurorais para monitorar os eletrojetos ionosféricos. O índice *Dst* e o *AE* são derivados das perturbações da componente horizontal, assim a separação das fontes (corrente de anel/eletrojato auroral) é somente devido a diferenças nas latitudes dos observatórios. Em médias e baixas latitudes, praticamente nenhum efeito do eletrojato auroral ionosférico pode ser observado na superfície, e em altas latitudes a principal contribuição da corrente de anel é observada na componente vertical da perturbação magnética. Os índices de médias latitudes *Ap* e *aa* foram originalmente definidos como grandezas puramente empíricas de distúrbios magnéticos irregulares observados em médias latitudes (MAYAUD, 1980; VANNERSTROM e FRIIS-CHRISTENSEN, 1996).

Para estudar a variação temporal da atividade geomagnética de longo período, originadas em diferentes fontes, comparou-se as médias anuais dos índices geomagnéticos (*aa*, *Ap*, *AE* e *Dst*) e das séries relacionadas com a atividade solar (*Rz* e *Fpk500*). Fez-se a regressão linear múltipla dos índices planetários *aa* e *Ap* em função do índice *Dst* e do *AE*. Também foram feitas as correlações cruzadas entre as séries anuais dos índices geomagnéticos com os parâmetros solares para ver suas dependências e defasagens.

A Figura 4.21 mostra as variações das séries anuais dos índices geomagnéticos *aa*, *-Dst* e *AE/2*; a série anual do número de manchas solares (*Rz*) e a fração anual de feixes de alta velocidade (*Fpk500*).

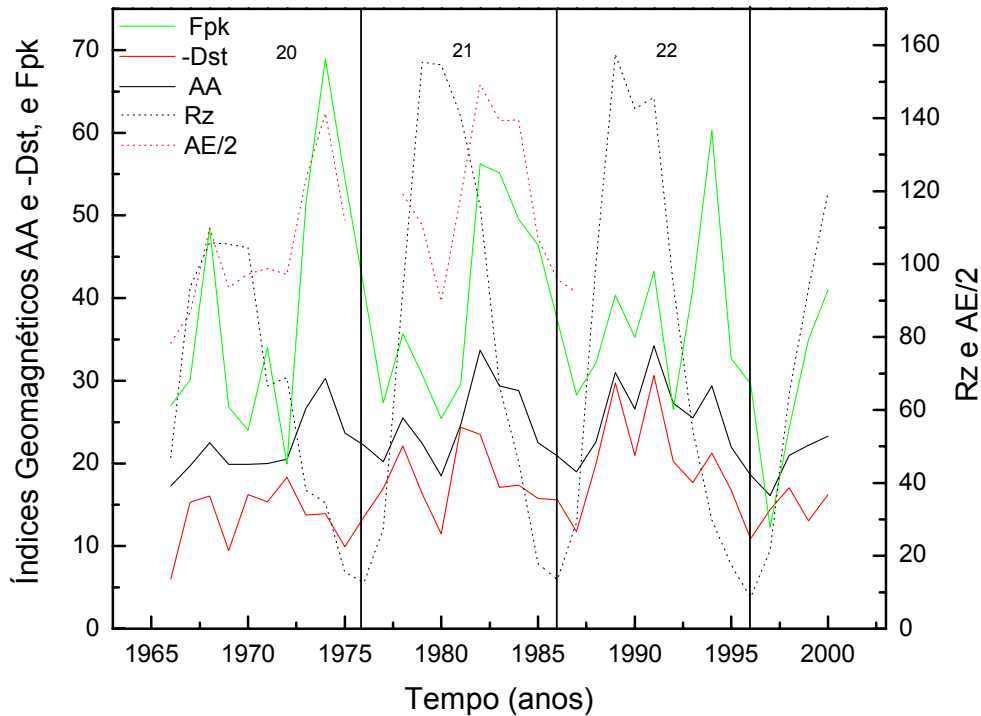


Figura 4.21: Séries anuais dos índices geomagnéticos *aa*, *-Dst* e *AE/2*; série anual do número de manchas solares (*Rz*) e a fração anual de feixes de alta velocidade (*Fpk500*).

Para ver a relação entre os parâmetros da atividade geomagnética e da atividade solar fez-se a correlação cruzada entre as séries anuais dos índices geomagnéticos entre si e com os parâmetros solares.

Os coeficientes de correlação e as defasagens entre os índices geomagnéticos são apresentados na Tabela 4.5. Através dos valores obtidos observa-se que, tanto o índice *aa* como o *Ap* são bem relacionados com os índices *Dst* e *AE*. O índice *aa* também apresenta uma boa relação com o *Dst* calmo (*Dst* > -30 nT). O sinal negativo nos coeficientes é devido ao *Dst* ser negativo e os outros índices serem positivos. Este sinal não está indicando uma anti-correlação, mas sim uma correlação.

Tabela 4.5: Correlação cruzada das médias anuais dos dados brutos aa x Dst , aa x AE , Ap x Dst , Ap x AE , Dst x AE e aa x Ap .

	r	Defasagem
aa x Dst (anos)	-0,73	0
aa x AE (anos)	0,81	0
Ap x Dst (anos)	-0,78	0
Ap x AE (anos)	0,77	0
Dst x AE (anos)	-0,68	0
aa x Ap (anos)	0,98	0
aa x $Dst < -100$ nT	0,64	0
aa x Dst calmo (>-30 nT)	0,74	0

Os índices geomagnéticos aa e Ap têm suas maiores divergências em períodos curtos de tempo (variações durante o dia), sendo 84% da diferença entre eles no intervalo de 0 a 20 nT para dados de 3 horas. Também apresentam uma pequena variação na correlação entre os ciclos solares ímpar ($r=0,925$) e par ($r=0,915$), e nas correlações nas três fases do ciclo solar (ascendente/máximo/descendente) que são 0,906/0,924/0,918 respectivamente (COFFEY e ERWIN, 2001). Logo, ao se considerar médias anuais dos dois índices as variações de curto período são eliminadas, restando somente as pequenas variações nos ciclos solares. Isso é coerente, à medida que a correlação das séries anuais de aa e Ap é 0,98 com uma defasagem de zero anos, ou seja, 0,02 restantes podem ser devido às variações nas fases dos ciclos e nos ciclos pares e ímpares.

Os índices Dst e AE apresentam uma boa correlação, apesar de eles medirem fontes distintas. Grafe e Feldstein (2000) mostraram que a intensidade da corrente de anel não depende do desenvolvimento de subtempestades intensas, isto é, subtempestades podem não ser a primeira fonte de energia da corrente de anel. Conclusão semelhante foi encontrada por McPherron (1997).

A Tabela 4.6 mostra os coeficientes de correlação e as defasagens entre os índices geomagnéticos e os parâmetros solares. Observa-se que os índices aa , Ap e AE têm uma boa correlação com $Fpk500$ e estão em fase. O índice Dst

apresenta uma fraca correlação com *Fpk500* e esta defasado em média de 1 ano. Os índices geomagnéticos não estão bem correlacionados em relação ao número de manchas solares e apresentam uma defasagem. O máximo do *aa* e *Ap* ocorre em média dois anos após o máximo de *Rz*. Os feixes de alta velocidade têm uma baixa correlação com *Rz* e estão defasados em 4 anos, indicando que o máximo de *Fpk500* ocorre quatro anos após o máximo de *Rz*. Isto é um indicativo de que as estruturas de campo magnético solar aberto e fechado não se comportam da mesma maneira.

Tabela 4.6: Correlação cruzada das médias anuais de *RzxFpk500*, *Rzxaa*, *RzxAE*, *RzxAp*, *RzxDst*, *Fpk500xAA*, *Fpk500xAE*, *Fpk500xAp*, *Fpk500xDst*.

	r	Defasagem
<i>Rz x Fpk500</i>	0,37 (0,57)	4 (-6)
<i>Rz x aa</i>	0,50	2
<i>Rz x Ap</i>	0,53	2
<i>Rz x Dst</i>	-0,57	0
<i>Rz x AE</i>	0,52	2
<i>Fpk500 x Dst</i>	-0,28	-1
<i>Fpk500 x AE</i>	0,75	0
<i>Fpk500 x aa</i>	0,72	0
<i>Fpk500 x Ap</i>	0,70	0

A Figura 4.22 mostra as médias anuais das séries temporais do *aa* e do *-Dst* para o intervalo entre 1957 e 2000, e as séries temporais do *aa* e *AE* para o intervalo entre 1957 e 1987. Observa-se que os índices *aa* e *Dst* estão em fase nos intervalos de 1957 a 1965 e 1987 a 2000, e estão fora de fase no intervalo restante. Já os índices *aa* e *AE* estão em fase em todo o intervalo.

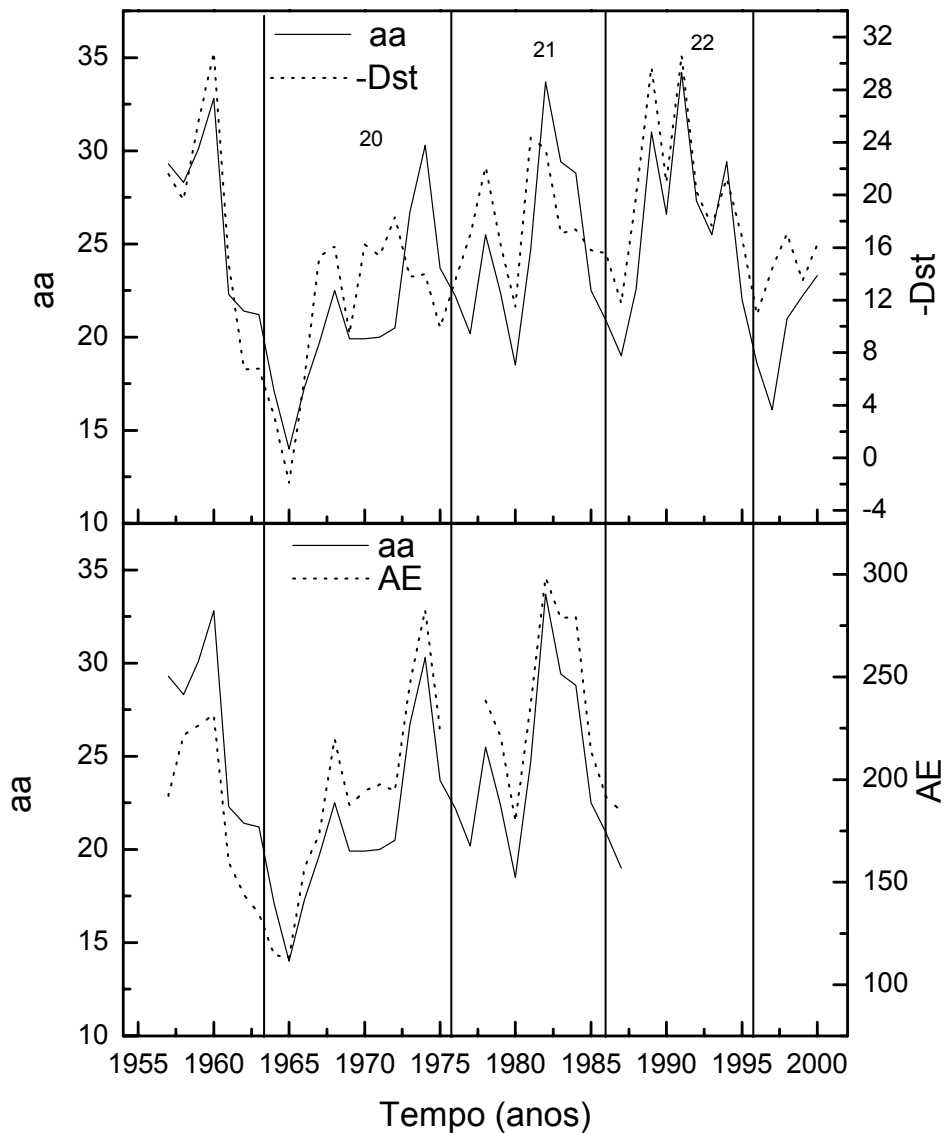


Figura 4.22: Médias anuais das séries temporais do aa e do $-Dst$ para o intervalo entre 1957 e 2000 (painel superior). Médias anuais das séries temporais do aa e do AE para o intervalo entre 1957 e 1987 (painel superior).

A Figura 4.23 apresenta a comparação das séries temporais anuais do índice geomagnético aa_c estimado, em função dos índices geomagnéticos Dst e AE , e aa observado.

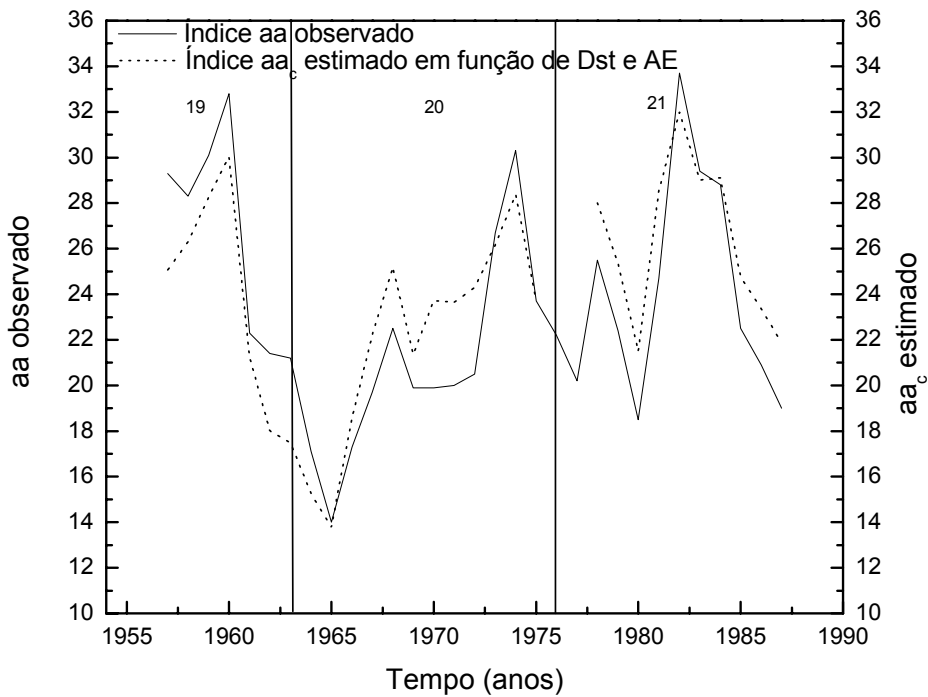


Figura 4.23: Índice geomagnético aa observado (linha cheia), e o índice aa_c estimado a partir do Dst e AE (linha grossa).

O índice aa_c foi estimado através da correlação múltipla como segue:

$$aa_c = b_0 + b_1 Dst + b_2 AE \quad (4.7)$$

onde os parâmetros b_0 , b_1 e b_2 são os coeficientes obtidos do melhor ajuste linear.

Os valores obtidos da regressão linear múltipla para os coeficientes foram: $b_0 = 7,50 \pm 2,23$; $b_1 = -0,28 \pm 0,09$ e $b_2 = 0,06 \pm 0,01$. Estes valores são significativos pelo menos 99% (teste t). Logo o melhor ajuste é dado por:

$$aa_c = (7,50 \pm 2,23) + (0,29 \pm 0,03) Dst + (0,04 \pm 0,01) AE \quad (4.8)$$

Através de aa_c calculado, obteve-se que 75% da variabilidade no aa pode ser explicado por uma dependência linear do aa em relação a Dst e AE ($R^2 = 0,75$; obtido da correlação múltipla).

A Figura 4.24 mostra o índice geomagnético aa observado e aa_c estimado em função de Dst e AE . Apresenta também a comparação das séries temporais anuais do índice geomagnético aa^1_c calculado só com Dst , aa^2_c calculado só em função de AE e o termo independente aa^3_c . Aplicaram-se as mesmas metodologias que em aa estimado em função de $Fpk500$ e Rz , na Seção 4.3.

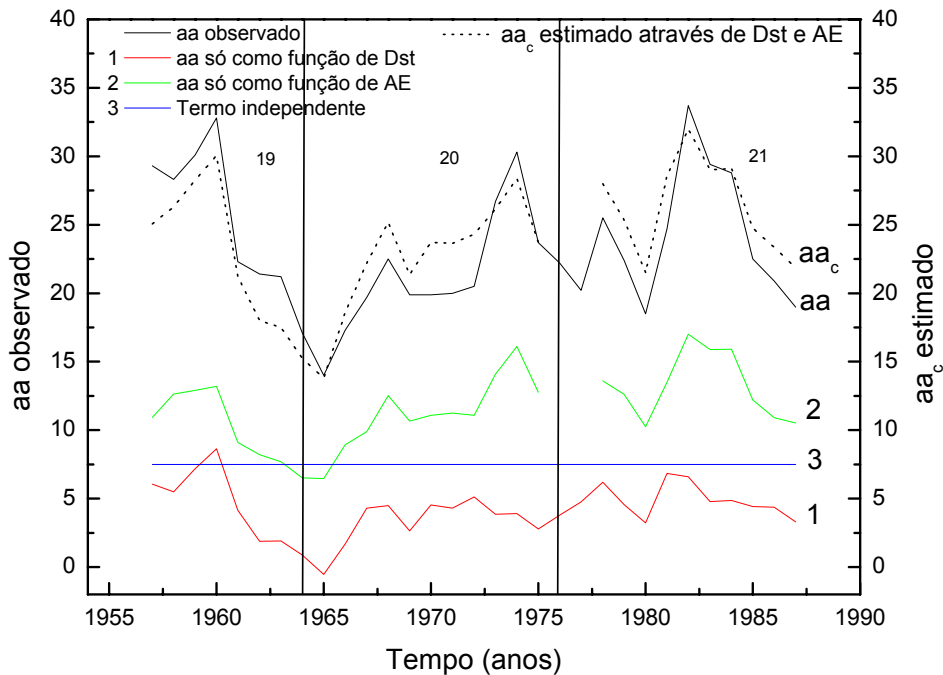


Figura 4.24: Índice geomagnético aa observado (linha preta), e aa_c estimado em função do Dst e AE (linha pontilhada).

Fez-se este cálculo para ver qual seria o comportamento de aa se ele fosse só dependente do Dst ou só dependente do AE . Pode-se ver pelo gráfico que se aa_c só depender do Dst (aa^1_c) ou depender só do AE (aa^2_c), ele apresenta um comportamento semelhante ao aa observado só com valores menores.

A Figura 4.25 mostra as médias anuais das séries temporais do Ap e do $-Dst$ para o intervalo entre 1957 e 2000, e as séries temporais do Ap e AE para o intervalo entre 1957 e 1987. O índice apresenta um comportamento similar ao índice aa em relação aos índices Dst e AE .

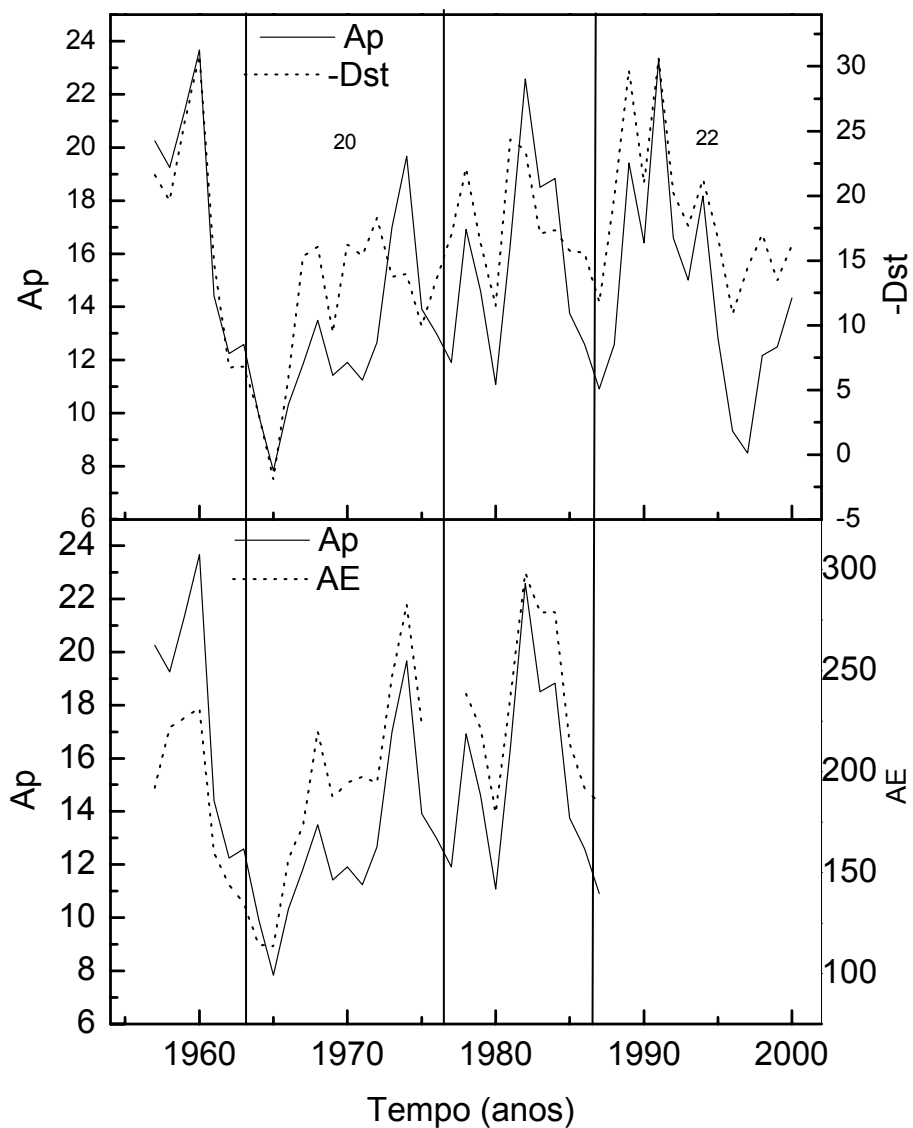


Figura 4.25: Médias anuais das séries temporais do Ap e do $-Dst$ para o intervalo entre 1957 e 2000 (painel superior). Médias anuais das séries temporais do Ap e do AE para o intervalo entre 1957 e 1987 (painel inferior).

A Figura 4.26 apresenta a comparação das séries temporais anuais do índice geomagnético Ap_c estimado, em função dos índices geomagnéticos Dst e AE , e Ap observado.

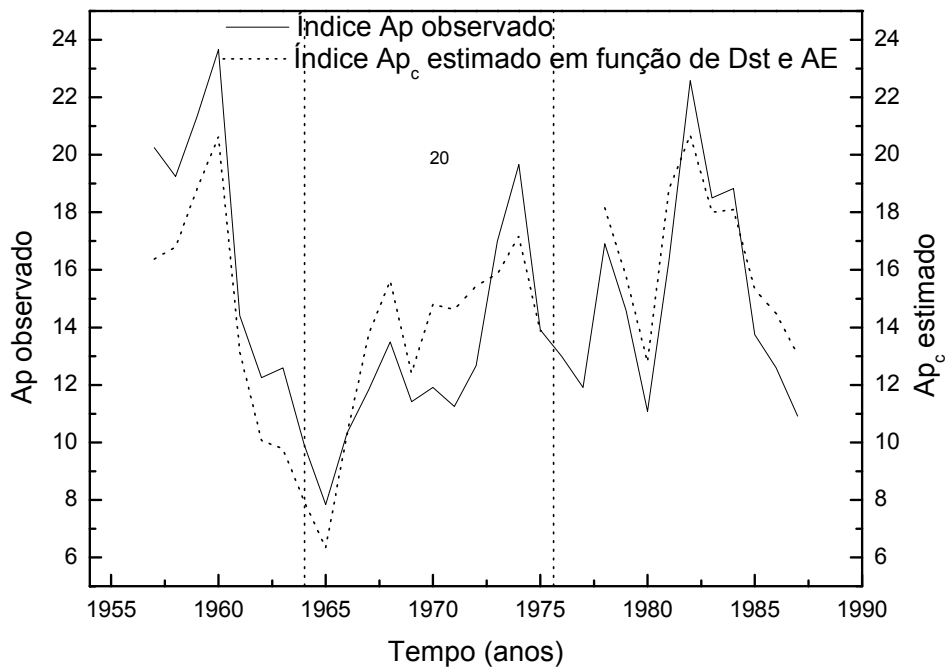


Figura 4.26: Índice geomagnético A_p observado (linha cheia), e o índice A_{p_c} estimado a partir do Dst e AE (linha grossa).

O índice A_{p_c} foi estimado através da correlação múltipla como segue:

$$A_{p_c} = c_0 + c_1 Dst + c_2 AE \quad (4.9)$$

onde os parâmetros c_0 , c_1 e c_2 são os coeficientes obtidos do melhor ajuste linear.

Os valores obtidos da regressão linear múltipla para os coeficientes foram: $c_0 = 2,95 \pm 1,88$; $c_1 = -0,31 \pm 0,08$ e $c_2 = 0,04 \pm 0,01$. Estes valores são significativos pelo menos em 99% (teste t). Logo o melhor ajuste é dado por:

$$A_{p_c} = (2,95 \pm 1,88) + (-0,31 \pm 0,08) Dst + (0,04 \pm 0,01) AE \quad (4.10)$$

Através de A_{p_c} calculado, obteve-se que 74% da variabilidade no A_p pode ser explicado por uma dependência linear do A_p em relação a Dst e AE ($R^2 = 0,74$; obtido da correlação múltipla).

A Figura 4.27 mostra o índice geomagnético Ap observado e Ap_c estimado em função de Dst e AE . Apresenta também a comparação das séries temporais anuais do índice geomagnético Ap^1_c calculado só com Dst , Ap^2_c calculado só em função de AE e o termo independente Ap^3_c . Aplicaram-se as mesmas metodologias que em aa estimado em função de $Fpk500$ e Rz , na Seção 4.3. O comportamento do índice Ap é muito semelhante ao do índice aa .

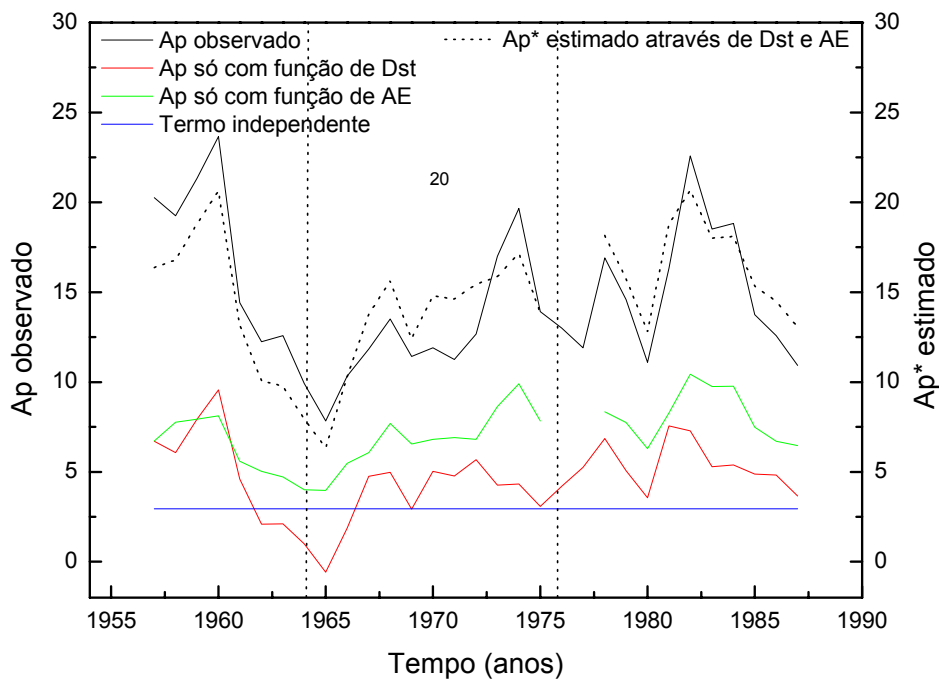


Figura 4.27: Índice geomagnético Ap observado (linha preta), e Ap^* estimado em função do Dst e AE (linha pontilhada).

Através dos resultados obtidos para aa e Ap de Dst e AE , conclui-se que tanto aa quanto Ap estão respondendo aos mesmos efeitos, e que as principais fontes de energia para eles são os Eletrojetos Aurorais e a corrente de anel.

A Figura 4.28 mostra o índice geomagnético $-Dst$ e a porcentagem dos valores horários do Dst por ano com intensidades menores que -30 , -50 , -80 e -100 nT. Observa-se no intervalo de 1986 a 1996 (intervalo correspondente ao ciclo solar 22) que para níveis de intensidade do Dst menor que -80 nT o terceiro pico deixar de existir.

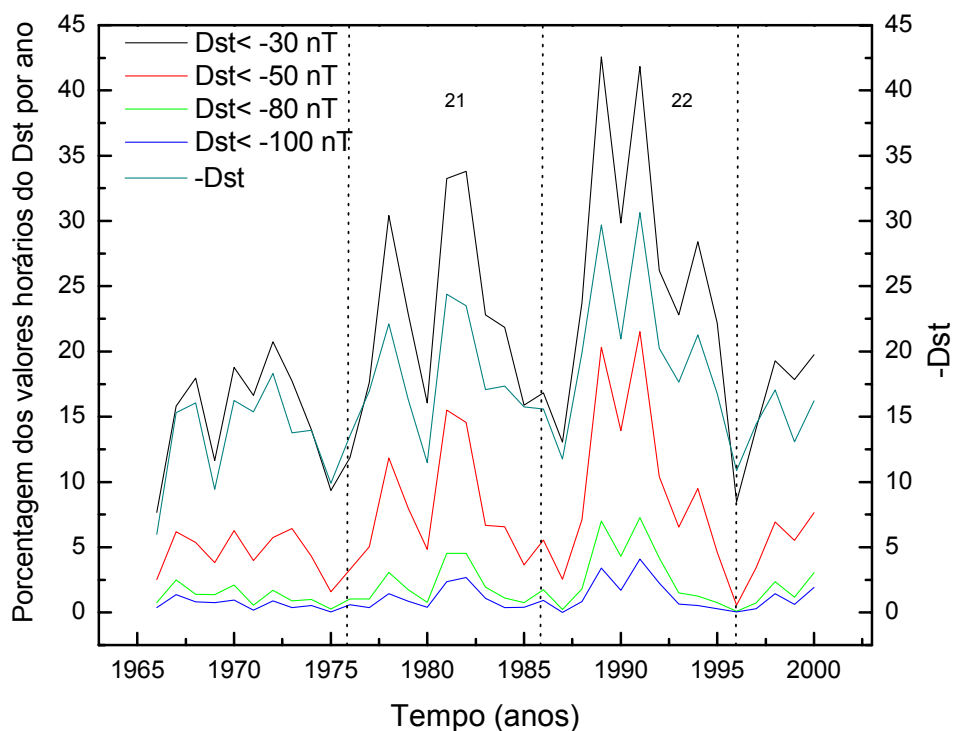


Figura 4.28: Índice geomagnético $-Dst$ e a porcentagem dos valores horários do Dst por ano com intensidades menores que -30 , -50 , -80 e -100 nT.

A Figura 4.29 mostra a porcentagem dos valores horários do Dst por ano com intensidades menores que -30 , -50 , -80 e -100 nT, e o índice geomagnético aa . Observa-se no intervalo correspondente ao ciclo solar 22 que o índice aa tem o comportamento similar aos níveis mais baixos de intensidade do Dst ($Dst < -80$ nT).

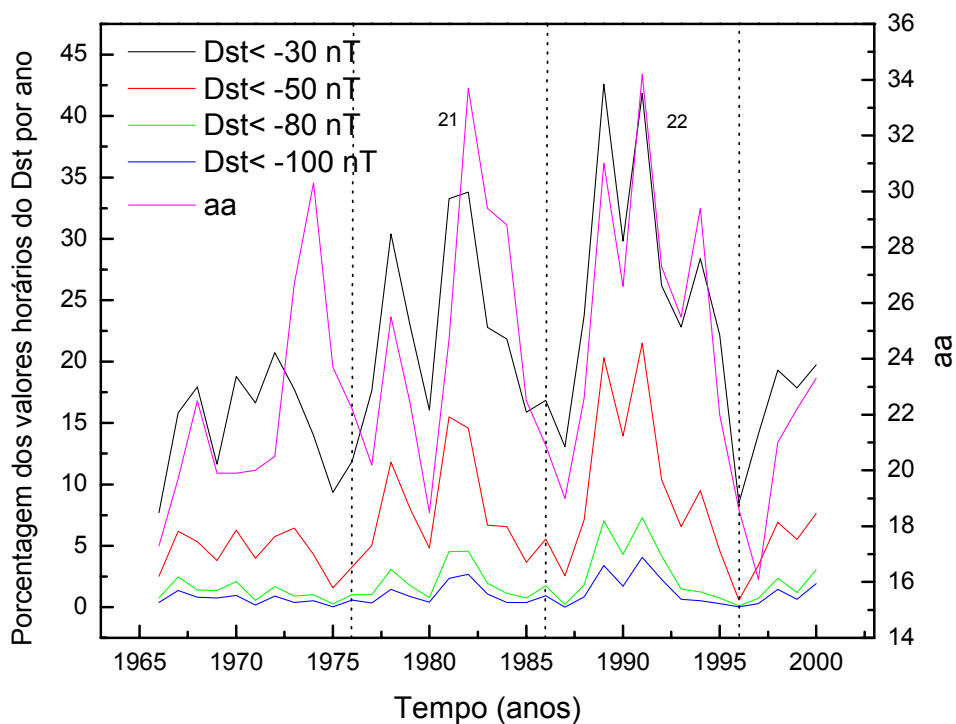


Figura 4.29: Porcentagem dos valores horários do *Dst* por ano com intensidades menores que -30 , -50 , -80 e -100 nT, e o índice *aa*.

A Figura 4.30 apresenta fração de dias por ano com velocidade do vento solar maior que 500 km/s (*Fpk500*), e a série anual do número de manchas (*Rz*). Observa-se que os valores máximos de *Fpk500* ocorrem na fase descendente do ciclo solar, descrito pelo número de manchas solares.

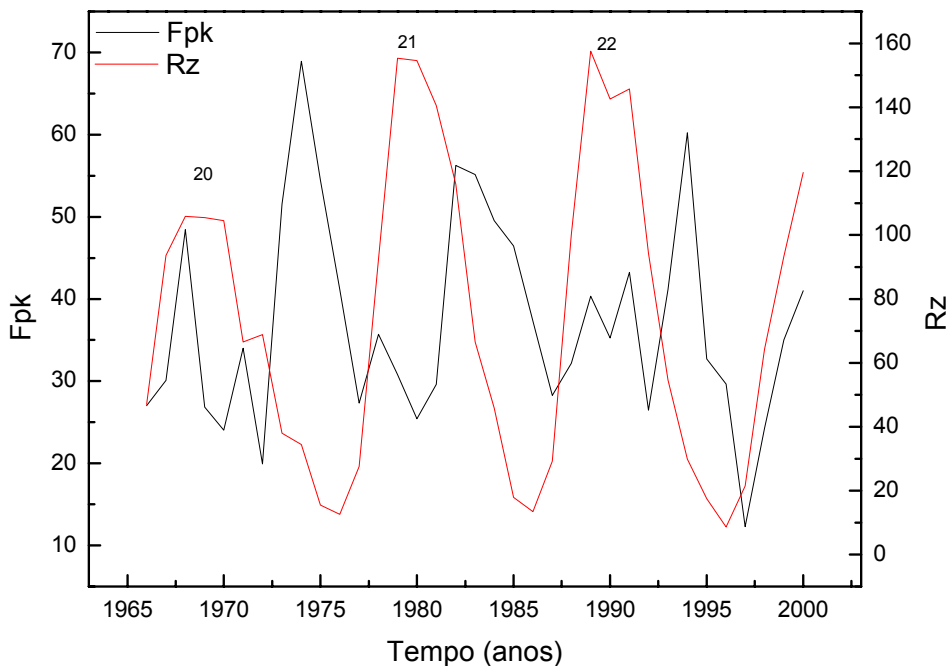


Figura 4.30: Fração de dias por ano com velocidade do vento solar maior que 500 km/s, e a série anual do número de manchas (Rz).

A Figura 4.31 apresenta as séries anuais dos índices geomagnéticos aa e $-Dst$, e a Fração de dias por ano com velocidade do vento solar maior que 500 km/s. Observa-se que o valor máximo do vento solar coincide com o máximo de aa nos ciclos solares 20 (intervalo de 1964 a 1975) e 21 (de 1975 a 1985). E para o ciclo 22 o máximo de $Fpk500$ coincide com o terceiro pico na atividade geomagnética descrita por aa . Já em relação ao Dst , o máximo de $Fpk500$ se encontra na fase descendente dos ciclos solares.

Durante o máximo solar, as fontes solares de estruturas interplanetárias que resultam em distúrbios geomagnéticos são transientes e, usualmente, referem-se à CMEs. No mínimo solar; as fontes solares de estruturas interplanetárias que resultam em distúrbios geomagnéticos tem sido geralmente classificadas como recorrentes, embora agora saibamos que estas categorias não são exclusivas. Recorrentes referem-se à distúrbios que se repetem com o período de rotação sinótico de 27 dias do Sol. CMEs são explosões de grande quantidade de plasma e campo magnético da coroa do Sol. A taxa de ocorrência de CMEs aproximadamente segue o ciclo da atividade solar

(número de manchas solares). Fontes recorrentes são usualmente atribuídas a feixes de alta velocidade no vento solar emanados de buracos coronais. Entretanto, compressões nas bordas dos feixes quando ele se propaga dentro do fluxo lento de alta densidade nas circunvizinhanças das lâminas de corrente heliosféricas conduz para uma região de interação corrotante (CIR), e esta passagem de CIR, não fluxo de alta velocidade, resulta no aumento dos distúrbios geomagnéticos recorrentes. Além disso, as grandes tempestades geomagnéticas recorrentes são causadas por CMEs presas nas CIRs (GONZALEZ et al., 1999; WEBB et al. 2001).

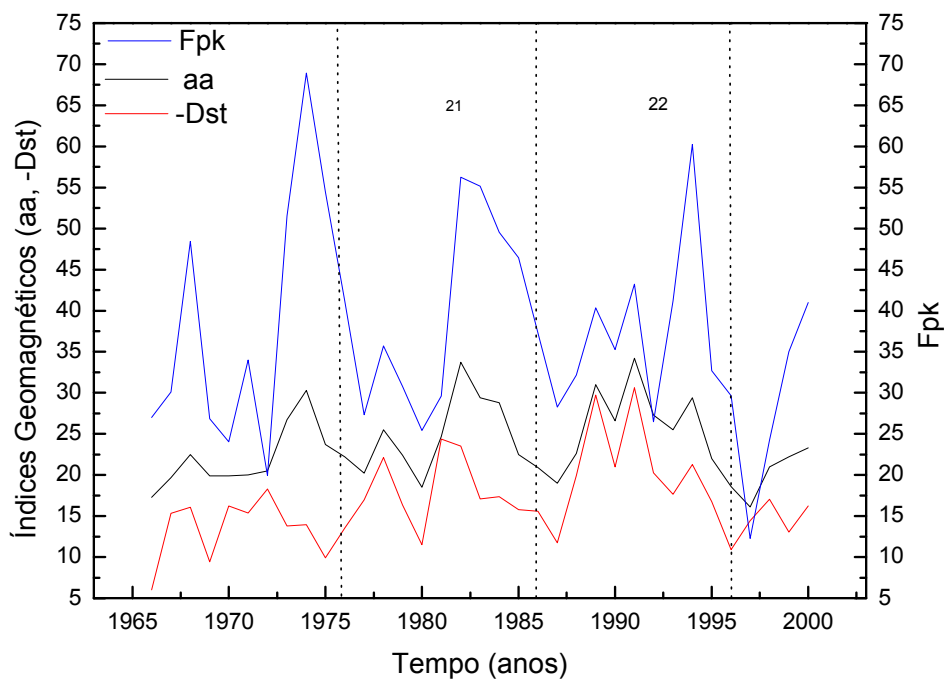


Figura 4.31: Séries anuais dos índices geomagnéticos *AA* e *-Dst* e a Fração de dias por ano com velocidade do vento solar maior que 500 km/s

A velocidade afeta a atividade geomagnética de várias maneiras: (1) A grande diferença da velocidade inicial entre CMEs e o vento ambiente a sua frente gera interações entre eles, levando a substancial compressão do plasma ambiente e do próprio plasma da CMEs na parte frontal. Isto leva a intensos campos magnéticos, que, quando eles têm uma componente significativa na direção sul, criam forte atividade geomagnética. (2) A interação entre CME e o vento solar ambiente causa empilhamento das linhas de campo, criando uma

componente na direção sul do campo da bainha, e (3) a velocidade do vento solar influencia o nível da atividade geomagnética diretamente pelos seus efeitos no campo elétrico convectivo que é dado pelo produto $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ (VENNERSTROEM, 2001).

A Figura 4.32 mostra o índice *aa*, porcentagem dos valores horários do *Dst* por ano com intensidades menores que -30 , -50 , -80 e -100 nT, e o número anual de manchas solares (*Rz*). Observa-se que o máximo do índice geomagnético *aa* ocorre na fase descendente do ciclo solar, e os sub-níveis do *Dst* estão em fase com o ciclo solar (*Rz*).

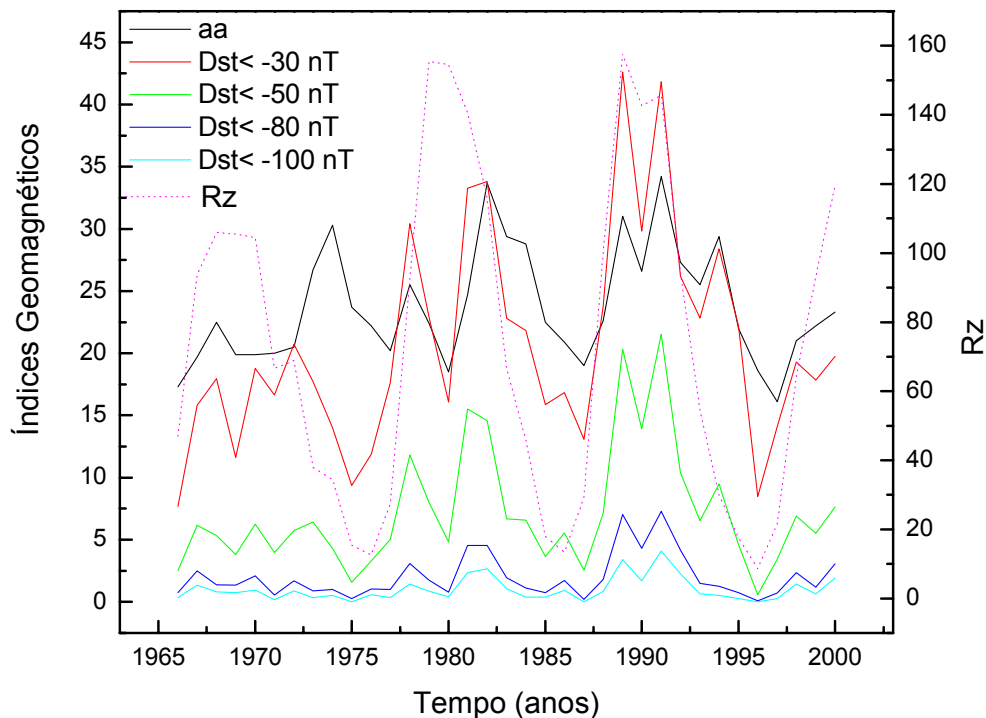


Figura 4.32: Índice *aa*, porcentagem dos valores horários do *Dst* por ano com intensidades menores que -30 , -50 , -80 e -100 nT, e o número anual de manchas solares (*Rz*).

Com base na análise do ciclo solar (*Rz*) e dos feixes de alta velocidade (*Fpk500*) em relação aos índices geomagnéticos *aa*, *Dst* e seus sub-níveis, pode-se concluir que o terceiro pico no ciclo solar 22 é predominantemente devido aos feixes de alta velocidade originados em buracos coronais. Chegou-se a esta conclusão pelo fato de que para os valores níveis de *Dst* < -80 nT o

terceiro pico não está presente. Níveis com $Dst < -100$ nT são tempestades magnéticas intensas, que são geradas principalmente por estruturas que estão em fase com o ciclo solar. São estruturas que geram intensos campos magnéticos interplanetários na direção sul e de grande duração (por exemplo, CMEs). Esta configuração origina a reconexão magnética entre o campo magnético terrestre e o campo magnético interplanetário, ocasionando uma grande penetração de energia suficiente para intensificar a corrente de anel, dando lugar às tempestades. Já os feixes rápidos, que são gerados por buracos coronais, geralmente não apresentam configurações propícias para que ocorra reconexão magnética o tempo suficiente para intensificar a corrente de anel que se mantém em nível calmo. Assim, eles não geram tempestades intensas muito frequentemente.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

No presente trabalho desenvolveu-se um estudo das relações de longo período entre a atividade solar e a atividade geomagnética. Para isso, utilizaram-se as séries anuais e mensais do número de manchas solares (Rz) e o índice geomagnético aa de 1868 a 2000. Também foram utilizadas as séries anuais (no intervalo de tempo entre 1957 e 2000) dos índices geomagnéticos Dst , AE , Ap , e da velocidade do vento solar (1964 a 2000). Neste estudo foram utilizadas técnicas de análise estatística e análise harmônica.

Através da análise espectral, encontrou-se que os períodos mais significativos obtidos nas séries temporais do aa e Rz foram os de 11 anos, para ambas as séries, e de 5,3; 4,3 anos e 6 meses no aa . Sugere-se que uma possível causa para o período de 5,3 anos (63,8 meses) encontrado na série anual (série mensal) do aa seja devido à variação de 5 anos na densidade do vento solar. Outra hipótese para este período em aa pode ser o primeiro harmônico do ciclo solar de 11 anos.

Na análise de longo período do Rz e aa observou-se uma tendência de aumento com o tempo da média corrida de 11 e 22 anos, a qual é mais acentuada na série do aa . Na correlação cruzada de ciclo a ciclo entre Rz e aa observou-se que os coeficientes de correlação apresentam uma tendência de diminuição, ao passo que a defasagem tem uma tendência de aumento. Encontrou-se que quanto maior a defasagem menor é o coeficiente de correlação, indicando que estruturas que influenciam mais o valor médio da atividade geomagnética, descrita por aa , não estão variando em fase com o ciclo de 11 anos das manchas solares.

Através da regressão múltipla do índice aa em função de Rz e dos feixes de alta velocidade ($Fpk500$), obteve-se que aproximadamente 71% da variabilidade do índice aa é explicada pelas variações de Rz e $Fpk500$. Efetuando a correlação cruzada entre o índice aa x $Fpk500$ e aa x Rz

observou-se uma melhor correlação entre $aa \times Fpk500$ do que com o $aa \times Rz$. A atividade geomagnética representada por aa responde mais às estruturas relacionadas aos feixes rápidos do que às relacionadas a Rz .

Da correlação de longo período entre índices geomagnéticos AE , Dst , Ap e aa , bem como suas relações com Rz e $Fpk500$, obteve-se que os índices Dst e AE estão bem relacionados aos índices aa e Ap . Observou-se que 75% da variabilidade do aa pode ser obtida por uma relação linear entre os índices Dst e AE . O índice Ap apresenta um comportamento semelhante, pois 74% de sua variabilidade é descrita por uma relação linear destes mesmos dois índices. Com base na análise do número de manchas solares (Rz) e dos feixes de alta velocidade ($Fpk500$) em relação aos índices geomagnéticos aa , Dst e seus sub-níveis, conclui-se que o terceiro pico no ciclo solar 22 é predominantemente devido aos feixes de alta velocidade originados em buracos coronais.

Para a complementação deste trabalho pretende-se fazer:

Na análise de regressão múltipla pretende-se incluir a contribuição do campo magnético interplanetário e da densidade.

Análise da correlação do índice geomagnético entre si durante tempestades magnéticas fortes, moderadas e fracas, e período de atividade calma durante diferentes fases ciclo solar.

Análise mais detalhada do comportamento dos dois picos da atividade geomagnética – defasagem e razão entre esses dois picos – e a relação deles com a atividade solar Rz .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAKER, D. N. Statistical analyses in the study of solar wind-magnetosphere coupling. In: KAMIDE, Y.; SLAVIN, J. A. (eds). **Solar wind-magnetosphere coupling**. Tokyo: Terra Scientific, 1986. p.17-38.
- BAKER, D. N. Effects of the sun on the Earth's environment. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v.62, p.1669-1681, 2000.
- BARTELS, J. Discussion of time variations of geomagnetic indices Kp and Ap 1932-1961. **Annales Geophysicae**, v.19, p.1-20, 1963.
- BERGLAND, G. D. A guided tour of the fast Fourier transform. **IEEE Spectrum**, v. 6, p. 41-52, 1969.
- BEVINGTON, P. R. **Data reduction and error analysis for the physical sciences**. New York: McGraw-Hill, 1969. 335p.
- BRAVO, S.; CRUZ-ABEYRO, J. A. L.; ROJAS, D. The spatial relationship between active regions and coronal holes and the occurrence of intense geomagnetic storms throughout the solar activity cycle. **Annales Geophysicae**, v.16, p.49-54, 1998.
- BURLAGA, L. F. **Interplanetary magnetohydrodynamics**. New York: Oxford University, 1995.
- CLILVERD, M. A. et al. Increased magnetic storm activity from 1868 to 1995. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v.60, p.1047-1056. 1998.
- CLIVER, E. W.; BORIAKOFF, V.; BOUNAR, K. H. The 22-year cycle of geomagnetic and solar wind activity. **Journal of Geophysical Research**, v.101, p.27091-27110, 1996.
- CLIVER, E. W.; KAMIDE, Y.; LING, A. G. Mountains versus valleys: semiannual variation of geomagnetic activity. **Journal of Geophysical Research**, v.105, p.2413, 2000.
- CLÚA DE GONZALEZ, A. L. et al. Periodic variation in the geomagnetic activity: a study based on the Ap index. **Journal of Geophysical Research**, v. 98, n. A6, p. 9215-9231, June 1993.
- CLÚA DE GONZALEZ, A. L. et al. Annual variation of geomagnetic activity. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v.63, p.367-374, 2001.
- COFFEY, H. E.; ERWIN, E. H. When do the geomagnetic aa and Ap indices disagree? **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v.63, p.551-556, 2001.

- COOLEY, J. W.; TUKEY, J. W. An algorithm for the machine calculation of complex of complex Fourier series. **Mathematics of Computation: The American Mathematical Society**, v.19, p.297-301, 1969.
- COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.
- COURTILLOT, V.; LE MOUËL, J. L.; MAYAUD, P. N., Maximum entropy spectral analysis of the geomagnetic activity index *aa* over a 107-year interval, **Journal of Geophysical Research**, v.82, p.2641, 1977.
- CROOKER, N. U; FEYNMAN, J.; GOSLING, J. T. On the high correlation between long-term averages of solar wind speed and geomagnetic activity. **Journal of Geophysical Research**, v.82, p.1933, 1977.
- CROOKER, N. U.; GRINGAUZ, K. I. On the low correlation between long-term averages of the solar wind speed and geomagnetic activity after 1976. **Journal of Geophysical Research**, v.98, p.59-62, 1993.
- CURRIE, R. G. Geomagnetic line spectra- 2 to 70 years. **Astrophysical Space Science**, v.21, p.425-438, 1973.
- DAGLIS, I. A.; et al. The terrestrial ring current: origin, formation and decay. **Reviews of Geophysics**, v.37, n.4, p.407-438, Nov. 1999.
- DELOUIS, H.; MAYAUD, P. N. Spectral analysis of the geomagnetic activity index *aa* over a 103-year interval. **Journal of Geophysical Research**, v.80, p.4681-4688, 1975.
- DMITRIEV, A. V.; SUVOROVA, A. V.; VESELOVSKY, I. S. Solar wind and interplanetary magnetic field parameters at the Earth's orbit during three solar cycles. **Physical Chemics Earth (c)**, v.25, n.1/2, p.125-128, 2000.
- DUNGEY, J. W. Interplanetary magnetic field and the auroral zones. **Physical Review Letters**, v.6, p.47, 1961.
- ECHER, E. et al. A study of the solar-geomagnetic indices correlation. [CD-ROM]. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY,7. Salvador, BA, . **Proceeding...** Salvador: [S.n.], 2001. p.1369-1372.
- FEYNMAN, J.;CROOKER, N. U. The solar wind at the turn of the century. **Nature**, v.275, p.626, 1978.
- FRASER-SMITH, A. C. Spectrum of the geomagnetic activity index *Ap*. **Journal of Geophysical Research**, v.77, p.4209-4220, 1972.
- FRIIS-CHRISTENSEN, E.; SVENSMARK, H. What do we really know about the Sun-climate connection? **Advances in Space Research**, v.20, p.4/5, p.913-920, 1997.

- GONZALEZ, W.D.; GONZALEZ, A.L.C.; TSURUTANI, B.T. Dual-peak solar cycle distribution of intense geomagnetic storms. **Planetary Space Science**, v.8, n.2, p.181-187, 1990.
- GONZALEZ, W.D.; GONZALEZ, A.L.C.; TSURUTANI, B.T. Interplanetary-magnetosphere coupling during intense geomagnetic storms at solar maximum. **Geofísica Internacional**, v.31, n.1, p.11-18, 1992.
- GONZALEZ, W.D. et al. What is a geomagnetic Storm? **Journal of Geophysical Research**, v.99, n.A4, p.5771-5792, Apr. 1994.
- GONZALEZ, W.D. et al. Coronal Hole-Active Region-Current Sheet (CHARCS) association with intense interplanetary and geomagnetic activity. **Geophysical Research Letters**, v.23, n.19, p.2577-2580, 1996.
- GONZALEZ, W.D.; TSURUTANI, B.T.; GONZALEZ, A.L.C. Interplanetary origin of geomagnetic storms. **Space Science Reviews**, v.88, p.529-562, 1999.
- GONZALEZ, W.D. et al. Solar and interplanetary cause of very intense geomagnetic storms. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v.63, p.403-412, 2001.
- GOSLING, J.T. et al. Solar wind speed variations:1962-1974. **Journal of Geophysical Research**, v.81, p.5061, 1977.
- GOSLING, J.T. et al. Geomagnetic activity associated with Earth passage of interplanetary shock disturbances and coronal mass ejections. **Journal of Geophysical Research**, v.96, p.7831-7839, 1991.
- GOSLING, J.T. Coronal mass ejections: the link between solar and geomagnetic activity. **Physics Fluids B**, v.5, n.7, July 1993.
- GORNEY, D.J. Solar cycle effects on the near-Earth space environment. **Reviews Geophysics**, v.28, p.315-336, 1990.
- GRAFE, A.; FELDSTEIN, Y.I. About the relationship between auroral eletrojets and ring currents. **Annales Geophysicae**, v.18, p.874-886, 2000.
- HARDIN, J.C. Introduction to time series analyses. **NASA reference Publication**, v.1145, p.119-129, 1986.
- HERMAN, J.R.; GOLDBERG, R.A. **Sun, weather, and climate**. Washington: Scientific and Technical Information Branch, 1978. 360p. (NASA SP-426).
- HOYT, D.V.; SCHATTEN, K.H. **The role of sun in climate change**. Oxford University Press, 1997.
- JENKINS, G.M.; WATTS, D.G. **Spectral analysis and its applications**. San Francisco: Holden Day, 1968. 524 p.

JUCKETT, D.A. Period and phase comparisons of near-decadal oscillations in solar, geomagnetic, and cosmic ray time series. **Journal of Geophysical Research**, v.106, n.A9, p.18/651-18/665, 2001.

KAMIDE, Y. et al. Current understanding of magnetic storms: Storm-substorm relationships. **Journal of Geophysical Research**, v.103, p.17705-17728, 1998.

KISHCHA, P.V.; DMITRIEVA, I.V.; OBRIDKO, V.N. Long-term variations of the Solar-geomagnetic correlation, total Solar irradiance, and northern hemispheric temperature (1868-1997). **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v.61, p.799-808, 1999.

KIVELSON, M.G.; RUSSELL, C.T. **Introduction to space physics**. Los Angeles: Cambridge University, 1995.

LEGRAND, J-P.; SIMON, P.A. Ten cycles of solar and geomagnetic activity. **Solar Physics**, v.70, p.173-195, 1981.

LEGRAND, J-P.; SIMON, P.A. Solar cycle and geomagnetic activity: a review for geophysicists - parts I and II. **Annales Geophysicae**, v.7, p.565-594, 1989.

LOCKWOOD, M.; STAMPER R.; WILD, M.N. A doubling of the Sun's coronal magnetic field during the past 100 years. **Nature**, v.399, p.437-439, 1999.

LYONS, L.R. Geomagnetic disturbances: characteristics of, distinction between types, and relations to interplanetary conditions. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v.62, p.1087-1114, 2000.

MAYAUD, P.N. The *aa* indices: a 100-year series characterizing the magnetic activity. **Journal of Geophysical Research**, v.77, p.6870, 1972.

MAYAUD, P.N. **Derivation, meaning, and use of geomagnetic indices**. Washington: American Geophysical Union, 1980. (Geophysical Monograph 22).

MCPHERRON, R.L. The role of substorms in the generation of magnetic storms. In: TSURUTANI, B. et al. (eds). **Magnetic storms**. Washington: American Geophysical Union, 1997. p.131-147.

MENDES JÚNIOR, O. **A origem interplanetária e o desenvolvimento da fase principal das tempestades geomagnéticas moderadas (1978 -1979)**. 1992. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1992. (INPE-5445-TDI/491).

MERRIL, R.T.; MCELHINNY, M.W. **The Earth's magnetic field**. New York: Academic press, 1983.

MULLIGAN, T.; RUSSELL, C.T.; LUHMENN, J.G. Interplanetary magnetic clouds: Statistical patterns and radial variations. **Advances in Space Research**, v.26, n.5, p.801-806, 2000.

NISHIDA, A. **Geomagnetic diagnosis of the magnetosphere**. New York: Springer-Verlag, 1978.

- PARKINSON, W.D. **Introduction to geomagnetism**. Edinburgh: Scottish Academic, 1983.
- PARKS, J.; LINDBERG, C.R.; VERNON III, F.L. Multitaper spectral analysis of high-frequency seismograms. **Journal of Geophysical Research**, v.92, n.B12, p.12/675-12/684, 1987.
- PARKS, G.K. **Physics of space plasmas**. Washington: Addison-Wesley, 1991.
- PRIEST, E.R. **Solar magneto-hydrodynamics**. Dordrecht: D. Reidel, 1987. 369p. (Geophysics and Astrophysics Monographs).
- RANGARAJAN, G.K. Indices of geomagnetic activity. In: JACOBS, J.A. (ed). **Geomagnetism**. London: Academic Press, 1989. v.3, Cap.5, p.323-384.
- RANGARAJAN, G.K.; IYEMORI, T. Time variations of geomagnetic activity indices K_p and A_p : an update. **Annales Geophysicae**, v.15, p.1271-1290, 1997.
- RADOSKI, H.R.; FOUGERE, P.F.; ZAWALIK, E.J. A comparison of power spectral estimates and applications of the maximum entropy model. **Journal of Geophysical Research**, v.80, p.619, 1975.
- RICHARDSON, I.G.; CLIVER, E.W.; CANE, H.V. Sources of geomagnetic activity over the solar cycle: relative importance of coronal mass ejections, high-speed streams, and slow solar wind. **Journal of Geophysical Research**, v.105, n.A8, p.18/203-18/213, Aug. 2000.
- ROSTOKER, G. Geomagnetic indices. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v.10, n.4, p.935-990, Nov. 1972.
- RUSSELL, C.T. On the possibility of deducing interplanetary and solar parameters from geomagnetic records. **Solar Physics**, v.42, n.1, p.259-269, 1975.
- RUSSELL, C.T.; MCPHERRON, R.L. Semiannual variation of geomagnetic activity. **Journal of Geophysical Research**, v.78, n.1, p.92-108, 1973.
- RUSSELL, C.T. The solar wind interaction with Earth's magnetosphere: a tutorial. Disponível em: <http://www-ssc.igpp.ucla.edu/ssc/tutorial.html>. Acesso em: 13 maio 2000.
- SABA, M.M.F. **Estudo da atividade magnetosférica através dos índices geomagnéticos AE, ap e Dst**. 1992. 108p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1992. (INPE - 5470 -TDI/501).
- SABA, M.M.F.; GONZALEZ, W.D.; GONZALEZ, A.L.C. Relationships between the AE , A_p and Dst indices near Solar minimum (1974) and at maximum (1979). **Annales Geophysicae**, v.15, p.1265-1270, 1997.

STEARNS, S.D.; DAVID, R.A. **Signal processing algorithms in fortran and C**. Englewood Cliffs: PTR Prentice Hall, 1993.

STAMPER, R. et al. Solar causes of the long-term increase in geomagnetic activity. **Journal of Geophysical Research**, v.104, n.A12, p.28/325-28/342, 1999.

SUESS, S.T.; TSURUTANI, B.T. **From the sun: auroras, magnetic storms, solar flares cosmic rays**. Washington: American Geophysical Union, 1998. p.172.

SUGIURA, M. Hourly values of equatorial *Dst* for the IGY. **Annual International Geophysical Year**, v.35, p.9, 1964.

SUGIURA, M.; KAMEI, T. Derivation of *Dst*. **IAGA Bulletin**, v.40, 1991.

THOMSON, D.J. Spectrum estimation and harmonic analysis. **Proceedings of IEEE**, v.70, p.1055-1096, 1982.

THOMSON, D.J. Quadratic-inverse spectrum estimates: applications to palaeoclimatology. **Philosophy Transactions Royal Society London A**, v.332, p.539-597, 1990.

TSIRULNIK, L.B.; KUZNETSOVA, T.V.; ORAEVSKY, V.N. The MGM spectral analysis of Wolf sunspot numbers: preliminary results. **Advances in Space Research**, v.20, n.12, p.2365- 2368, 1997.

VENKATESAN, D. et al. Relationship between solar and geomagnetic activity. **Journal of Geophysical Research**, v.96, p.9811-9813, 1991.

VENNERSTROM; FRIIS-CHRISTENSEN. Long-term and solar cycle variation of the ring current. **Journal of Geophysical Research**, v.101, p.24727, 1996.

VENNERSTROEN, S. Interplanetary sources of magnetic storms: a statistical study. **Journal of Geophysical Research**, v.106, n.A12, p. 29/175-29/184, 2001.

VIEIRA, L.E.A. et al. Geomagnetic-solar activity correlation evolution. In: AGU SPRING MEETING 2001, Boston. **Proceedings...** Boston: [S.n.], 2001.

WANG, Y.M.; LEAN, J.; SHEELEY Jr., N.R. The long term variation of the Sun's open magnetic flux. **Geophysical Research Letters**, v.27, p.505-508, 2000.

WILLIAMS, D.J. The Earth's ring current: causes, generation, and decay. **Space Science Reviews**, v.34, p.223-234, 1983.

WEBB, D.F. et al. The solar sources of geoeffective structures. In: _____ (ed). **Space weather**. Washington: American Geophysical Union, 2001. p.123-141.

ZIRIN, H. **Astrophysics of the sun**. New York: Cambridge University, 1988. 433 p.