

ESTUDO DAS CORRELAÇÕES ENTRE A ATIVIDADE SOLAR E PROCESSOS ATMOSFÉRICOS

Antonio Carlos Aido de Almeida

Orientador: Prof. Dr. Inácio Malmonge Martin

**Tese de Mestrado apresentada ao Instituto de Física
da UNICAMP para a obtenção do título de Mestre em Física**

Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP

Instituto de Física “Gleb Wataghin”

Departamento de Raios Cósmicos (DRCC)

Campinas, 26 de Abril de 2001

Dedicatória

Aos meus pais,

Álvaro Nunes de Almeida & Maria da Natividade do Aido

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Inácio Malmonge Martin pela orientação, incentivo e ensinamentos durante o trabalho.

Aos Professores Doutores Anatoli Gusev e Galina Pougatcheva, pela co-orientação e ensinamentos durante o trabalho.

Ao Prof. Dr. Aluísio Pinheiro (IMECC – UNICAMP) , que nos ajudou a entender e desenvolver métodos estatísticos para a análise das séries de dados.

Ao Prof. Dr. Rajaram Purushottam Kane (INPE – São José dos Campos), que nos emprestou o software MESA para a análise espectral das séries de dados.

Ao Prof. Dr. Jurandir Zullo Jr. (CEPAGRI – UNICAMP), que nos forneceu as séries de chuvas do Estado de São Paulo.

Às instituições que nos forneceram os dados meteorológicos: FUNCEME, IAC e o Departamento de Meteorologia da UFPel.

Ao Guilherme, que me ajudou na revisão final do texto e na edição de figuras e tabelas desta tese.

Ao Instituto de Física “Gleb Wataghin”, que me deu a oportunidade de estudar gratuitamente em um dos melhores institutos de pesquisa do Brasil.

Ao CNPq, pelo suporte financeiro.

Aos meus familiares e amigos que de alguma forma contribuíram para que eu seguisse em frente.

Prólogo ...

“Pode mesmo suceder que você volte à sua tese dez anos depois. Porque ela ficará como o primeiro amor, e ser-lhe-á difícil esquecê-la. No fundo, será esta a primeira vez que você fez um trabalho científico sério e rigoroso, e isto não é uma experiência de menor importância.”

Umberto Eco, em “Como se Faz uma Tese”

Esta tese é fruto de meu trabalho de mestrado de agosto de 1998 a abril de 2001 no Departamento de Raios Cósmicos da Universidade Estadual de Campinas, sob a orientação do Prof. Dr. Inácio Malmonge Martin e a co-orientação da Prof. Dra. Galina Ivanovna Pougatcheva.

O tema aqui abordado, os mecanismos de interação Sol-Terra e a previsão do “tempo espacial”, é um dos mais estudados atualmente em geofísica e os resultados destas pesquisas costumam promover discussões sobre os novos rumos das políticas internacionais para o meio ambiente terrestre.

Quem enveredar por esta área, certamente terá a seu dispor grandes bancos de dados geofísicos e meteorológicos ainda não estudados com o rigor e a abrangência estatística necessária. Mas, pelo mesmo motivo, terá que ter sensibilidade aguçada para determinar quais bancos de dados e métodos matemáticos podem fornecer os resultados mais significativos. Uma tarefa árdua, mas certamente compensadora.

Eu e o grupo de pesquisas de geofísica espacial da UNICAMP esperamos ter contribuído para o progresso desta área que está em pleno desenvolvimento.

Conteúdo

Ata da Defesa de Tese	i
Dedicatória	ii
Agradecimentos	iii
Prólogo	iv
Conteúdo	v
Lista de Figuras e Tabelas	viii
Lista de Siglas	xi
Abstract	xii
Resumo	xiii
Capítulo 1. Introdução	01
1.1 Aspectos da Variabilidade Solar	02
1.1.1 O Campo Magnético Solar	02
1.1.2 As Manchas Solares	03
1.1.3 Os Ciclos Solares	05
1.1.4 A Emissão Corpuscular do Sol	05
1.2 O Meio Interplanetário	07
1.2.1 O Vento Solar	07
1.2.2 Os Setores Magnéticos Solares	07
1.2.3 Os Raios Cósmicos Galácticos	09
1.2.4 A Magnetosfera Terrestre e os Cinturões de Radiação	09
1.2.5 A Penetração de Partículas na Atmosfera	10
1.3 A Ação da Atividade Solar na Baixa Atmosfera	11
1.4 A Variabilidade Climática	13
Capítulo 2. Dados Experimentais e Métodos Estatísticos	16

2.1	As Séries de Manchas Solares e de Chuvas	16
2.1.1	A Série de Manchas Solares	16
2.1.2	As Séries de Chuvas	17
2.2	A Análise Espectral das Séries	18
2.2.1	O Método de Entropia Máxima	18
2.2.2	A Descrição do Software de Trabalho	19
2.3	Métodos Estatísticos para Séries Temporais	20
2.3.1	Os Filtros de Médias Móveis	20
2.3.2	Cálculo do Coeficiente de Correlação	21
2.3.3	Desvio Padrão e Nível de Confiabilidade do Coeficiente de Correlação	22
2.4	Eventos de Curto Prazo	22
2.4.1	Eventos GLE e Forbush	23
2.4.2	Eventos MSB	23
	Tabela 1: Eventos de Curto Prazo de Raios Cósmicos	25
	Tabela 2: Eventos MSB – Pelotas	27
	Capa de Apresentação de Resultados das Análises Estatísticas	29
	Capítulo 3. A Análise Espectral	30
3.1	A Série de Ciclos Solares Magnéticos	31
3.2	As Séries de Chuvas	33
	Capítulo 4. Fases de Correlação	40
4.1	Fases de Correlação com Ciclos Solares Magnéticos	41
4.2	Fases de Correlação com o Mecanismo Oceano-Atmosfera	50
	Capítulo 5. Eventos MSB, GLE e Forbush	54
5.1	Eventos MSB e Variações Pluviométricas	55
5.2	Eventos de Raios Cósmicos	59

5.2.1 Eventos GLE e Variações Pluviométricas	59
5.2.2 Eventos Forbush e Variações Pluviométricas	63
Capítulo 6. Conclusões	67
Sugestões para Novos Estudos	69
Referências Bibliográficas	71
Endereços Eletrônicos Consultados	74
Apêndice	75

Lista de Figuras e Tabelas

Índice de Figuras

Capítulo 1. Introdução

1.1.1 Espiral de Parker (“saia de bailarina”) para o IMF.	03
1.1.2 Grupos de manchas solares.	04
1.1.4 A emissão de um <i>flare</i> solar.	06
1.2.1 Os setores magnéticos solares.	08
1.2.2 A magnetosfera terrestre e os cinturões de radiação.	10

Capítulo 3. A Análise Espectral

3.1.1 Os ciclos solares magnéticos.	31
3.1.2 Espectro de Burg para a série anual de ciclos solares magnéticos.	33
3.2.1 A série anual original e alisada (11) de chuvas em Fortaleza (1849-1999).	34
3.2.2 Espectro de Burg para a série anual de chuvas de Fortaleza: original e alisada por um filtro de médias móveis de 11 anos.	35
3.2.3 A série anual original e alisada (11) de chuvas em Campinas (1890-1999).	36
3.2.4 Espectro de Burg para a série anual de chuvas de Campinas: original e alisada por um filtro de médias móveis de 11 anos.	37
3.2.5 A série anual original e alisada (11) de chuvas em Pelotas (1893-1999).	38
3.2.6 Espectro de Burg para a série anual de chuvas de Pelotas: original e alisada por um filtro de médias móveis de 11 anos.	39

Capítulo 4. Fases de Correlação

4.1.1 Fases de (anti)correlação entre as séries anuais de chuvas em Fortaleza e de ciclos	
---	--

solares magnéticos (1854-1994).	41
4.1.2 Variação do coeficiente de correlação para dois pares de subséries de manchas solares e índices de chuvas em Fortaleza com fases de correlação opostas de 1939 a 1952.	42
4.1.3 Fases de (anti)correlação entre as séries anuais de chuvas em Pelotas e de ciclos solares magnéticos (1898-1994).	44
4.1.4 Variação do coeficiente de correlação para dois pares de subséries de manchas solares e índices de chuvas em Pelotas com fases de correlação opostas de 1918 a 1932.	45
4.1.5 Fases de (anti)correlação entre as séries anuais de chuvas em Campinas e de ciclos solares magnéticos (1895-1994).	47
4.1.6 Regressão Linear para os índices de chuvas em Campinas entre 1950 e 1994.	48
4.1.7 Fases de (anti)correlação entre as séries anuais de chuvas do litoral paulista e a série de ciclos solares magnéticos.	49
4.1.8 Fases de (anti)correlação entre as séries anuais de chuvas do interior paulista e a e a série de ciclos solares magnéticos.	50
4.2.1 A série anual de chuvas de Fortaleza e uma curva senoidal normalizada com período de 24 anos, representativa do mecanismo de interação oceano-atmosfera.	51
4.2.2 A série anual de chuvas de Pelotas e uma curva senoidal normalizada com período de 24 anos, representativa do mecanismo de interação oceano-atmosfera.	52

Capítulo 5. Eventos MSB, GLE e Forbush

5.1.1 Índice relativo médio, I , para 10 dias antes e 10 dias depois do dia “zero” de evento MSB (+, -) que ocorreu em época de chuvas de Fortaleza.	56
5.1.2 Índice relativo médio, I , para 10 dias antes e 10 dias depois do dia “zero” de evento MSB (-, +) que ocorreu em época de chuvas de Fortaleza.	57
5.1.3 Índice relativo médio, I , para 10 dias antes e 10 dias depois do dia “zero” de evento MSB (+, -) que ocorreu em época de chuvas de Pelotas.	57
5.1.4 Índice relativo médio, I , para 10 dias antes e 10 dias depois do dia “zero” de evento MSB (-, +) que ocorreu em época de chuvas de Pelotas.	58
5.2.1 Variação relativa média dos índices de chuvas, D (%), para 15 dias antes e 15 dias depois do dia “zero” de 14 eventos GLE durante a estação de chuvas de Fortaleza.	60

5.2.2 Fortaleza: razão $D(\%)$ pelo seu desvio padrão para eventos GLE.	61
5.2.3 Variação relativa média dos índices de chuvas, $D(\%)$, para 15 dias antes e 15 dias depois do dia “zero” de 17 eventos GLE durante a estação de chuvas de Pelotas.	62
5.2.4 Pelotas : razão $D(\%)$ pelo seu desvio padrão para eventos GLE.	62
5.2.5 Variação relativa média dos índices de chuvas, $D(\%)$, para 15 dias antes e 15 dias depois do dia “zero” de 15 eventos Forbush durante a estação de chuvas de Fortaleza.	63
5.2.6 Fortaleza: razão $D(\%)$ pelo seu desvio padrão para eventos Forbush.	64
5.2.7 Variação relativa média dos índices de chuvas, $D(\%)$, para 15 dias antes e 15 dias depois do dia “zero” de 15 eventos Forbush durante a estação de chuvas de Pelotas.	64
5.2.8 Pelotas: razão $D(\%)$ pelo seu desvio padrão para eventos Forbush.	65

Índice de Tabelas

Tabela 1: Eventos de Curto Prazo de Raios Cósmicos	25
Tabela 2: Eventos MSB – Pelotas	27

Lista de Siglas

A.U.: *Astronomic Unit*

BMAr: *Brazilian Magnetic Anomaly Region*

CE: Estado do Ceará

CEPAGRI: Centro de Ensino e Pesquisa em Agricultura

CME: *Coronal Mass Ejections*

FUNCEME: Fundação Cearense de Meteorologia

GCR: *Galactic Cosmic Rays*

GLE: *Ground Level Enhancements*

HCS: *Heliospheric Current Sheet*

IAC: Instituto Agrônômico de Campinas

IMECC: Instituto de Matemática, Estatística e Ciência da Computação (UNICAMP)

IMF: *Interplanetary Magnetic Field*

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (São José dos Campos – SP)

MEM: *Maximum Entropy Method*

MESA: *Maximum Entropy Spectral Analysis*

MRA: *Multiple Regression Analysis*

MSB: *Magnetic Sector Boundary*

NE: nordeste brasileiro

PCA: *Polar Cap Absorption*

QBO: *Quasi-Biennial Oscillation*

QTO: *Quasi-Triennial Oscillation*

RS: Estado do Rio Grande do Sul

SCR: *Solar Cosmic Rays*

SIDC: *Sunspot Index Data Center*

SP: Estado de São Paulo

UFPel: Universidade Federal de Pelotas

UV: *Ultraviolet*

Abstract

The correlations of solar activity with climate were investigated at low latitudes in the South American region. In some regions of the Earth, the 11 and 22-years cycles (anti-)correlate, for example, with the variation of rainfall level. A mechanism causing this correlation is still not known. We studied actualized data of rainfall variations in three meteorological stations that cover practically whole latitude range of Brazil (Fortaleza, CE: 3° 45' S, 38° 31' W; Campinas, SP: 22° 53' S, 47° 04' W; Pelotas, RS: 31° 45' S, 52° 21' W), from 1849 up to 1999.

Periodic analysis of the annual rainfall level in Pelotas and in Fortaleza shows a pronounced bidecadal periodicity that extended for about 100-150 years with great variation of amplitude. Statistical analysis shows the rainfall (anti)correlate with the 22-year solar magnetic cycle: $-77,2\% \pm 4,4\%$ (1854–1940) and $80\% \pm 5,4\%$ (1950-1994), in Fortaleza; $60\% \pm 13\%$ (1898-1928) and $-84\% \pm 4\%$ (1929-1994), in Pelotas. Correlation of variation of annual rainfall level with the 24-year periodicity characteristic for ocean-atmospheric coupling model is $-50,62\% \pm 7,5\%$ in Fortaleza (1854-1994) and $47,69\% \pm 7,84\%$ in Pelotas (1898-1994).

A short term (daily) correlation of rainfall level with the particle fluxes of GLE and Forbush events and with the magnetic sector boundary of interplanetary magnetic field crossing by Earth during ~ 50 years of observations were searched minding that charged particles could change transparency of the atmosphere. This study is important both as scientific instrument for solution of Sun-Earth connection problem and for long term forecasting of the weather in South American region.

Resumo

As correlações da atividade solar com o clima foram investigadas em regiões de baixas latitudes da América do Sul. Em algumas regiões da Terra, os ciclos de 11 e 22 anos (anti)correlacionam, por exemplo, com a variação dos níveis de chuvas. O mecanismo responsável por esta correlação ainda não é conhecido. Nós estudamos dados atualizados das variações dos níveis de chuvas de três estações meteorológicas ao longo do território brasileiro (Fortaleza, CE : 3° 45' S, 38° 31' W; Campinas, SP: 22° 53' S, 47° 04' W; Pelotas, RS: 31° 45' S, 52° 21' W), de 1849 até 1999.

Análises periódicas do nível anual de chuvas em Pelotas e em Fortaleza mostram uma periodicidade pronunciada a cada duas décadas que se estendeu por aproximadamente 100-150 anos com grande variação de amplitude. Análises estatísticas mostram que as chuvas (anti)correlacionam com o ciclo solar magnético de 22 anos: $-77,2\% \pm 4,4\%$ (1854–1940) e $80\% \pm 5,4\%$ (1950-1994), em Fortaleza; $60\% \pm 13\%$ (1898-1928) e $-84\% \pm 4\%$ (1929-1994), em Pelotas. A correlação da variação do nível anual de chuvas com a periodicidade de 24 anos característica do modelo de acoplamento oceano-atmosfera é de $-50,62\% \pm 7,5\%$ em Fortaleza (1854-1994) e de $47,69\% \pm 7,84\%$ em Pelotas (1898-1994).

Uma correlação de curto prazo (diária) dos níveis de chuvas com o fluxo de partículas de eventos GLE e Forbush e com fronteiras de setores magnéticos do campo magnético interplanetário atravessando a Terra durante aproximadamente 50 anos de observações foram pesquisadas considerando que partículas carregadas possam alterar a transparência da atmosfera. Este estudo é importante como instrumento científico para a solução do problema da conexão Sol-Terra e para a previsão do tempo a longo prazo na região da América do Sul.

Capítulo 1

Introdução

A estrela Sol é a principal fonte de energia para a vida na Terra. Emite radiações eletromagnéticas e corpusculares, cuja quantidade e variabilidade caracterizam o seu grau de atividade em *estável* ou *ativo*. Quase a totalidade da energia do Sol é emitida na forma de radiação eletromagnética. Outra forma de radiação é a corpuscular, na forma de partículas do vento solar, com energia cinética da ordem de 1 KeV, e de raios cósmicos solares, com energias da ordem de 1 GeV. Embora o Sol sob condições aproximadamente *estáveis* seja de grande interesse astronômico, todos os seus efeitos geofísicos (exceto pela irradiação solar) resultam da atividade solar. Neste capítulo serão discutidos apenas os aspectos da variabilidade solar e suas possíveis implicações no clima da Terra.

Discutiremos a seguir alguns fenômenos relacionados ao campo magnético solar, pois, provavelmente, é a variabilidade do fluxo magnético que o Sol produz que determina a ocorrência de fenômenos transientes da atividade solar possivelmente relacionados a alguns efeitos climáticos observados na Terra.

1.1 Aspectos da Variabilidade Solar

1.1.1 O Campo Magnético Solar

O Sol tem um campo magnético aproximadamente dipolar, alinhado com seu eixo de rotação. A origem deste campo ainda não é totalmente conhecida. Este campo geral inclui os campos magnéticos de grupos de manchas solares e de regiões ativas do Sol, a serem discutidos na próxima seção. Por causa do forte campo magnético associado a estas regiões, o campo geral é distinguido somente em latitudes superiores a 60° , onde mede cerca de 1 Gauss na superfície solar. Este campo magnético muda de polaridade a cada novo máximo do ciclo solar de 11 anos, caracterizando portanto um ciclo solar magnético de 22 anos. As linhas do campo magnético solar apontam de um hemisfério para outro do Sol dependendo da polaridade de cada hemisfério durante um período de 11 anos. A cada novo máximo de um ciclo de 11 anos, esta configuração é invertida.

Regiões ativas e grupos de manchas solares possuem um grande campo magnético, mas a escala espacial destas regiões é menor que a escala espacial do campo magnético geral. A grandes distâncias do Sol (entre 0,1 e 1 A.U.), o campo magnético geral é maior que o campo associado a grupos de manchas solares ou a regiões ativas. Na órbita da Terra, o campo magnético das manchas solares é desprezível comparado com o campo magnético geral.

O campo magnético interplanetário (IMF) é a extensão do campo magnético solar no espaço interplanetário. A superfície que divide as direções opostas do campo magnético em ambos os hemisférios não é exatamente o equador solar. Este fato, associado ao movimento de rotação do Sol, é responsável pela ondulação da espiral de linhas de campo magnético (espiral de Parker ou “saia de bailarina”). Veja a figura 1.1.1.

Na órbita da Terra, o IMF pode ser imaginado como uma projeção do campo magnético geral do Sol nesta região. Na Terra, este campo é detectado com uma magnitude absoluta de aproximadamente 4 nT no período de mínima atividade solar e de 10 nT no período de máxima atividade solar.

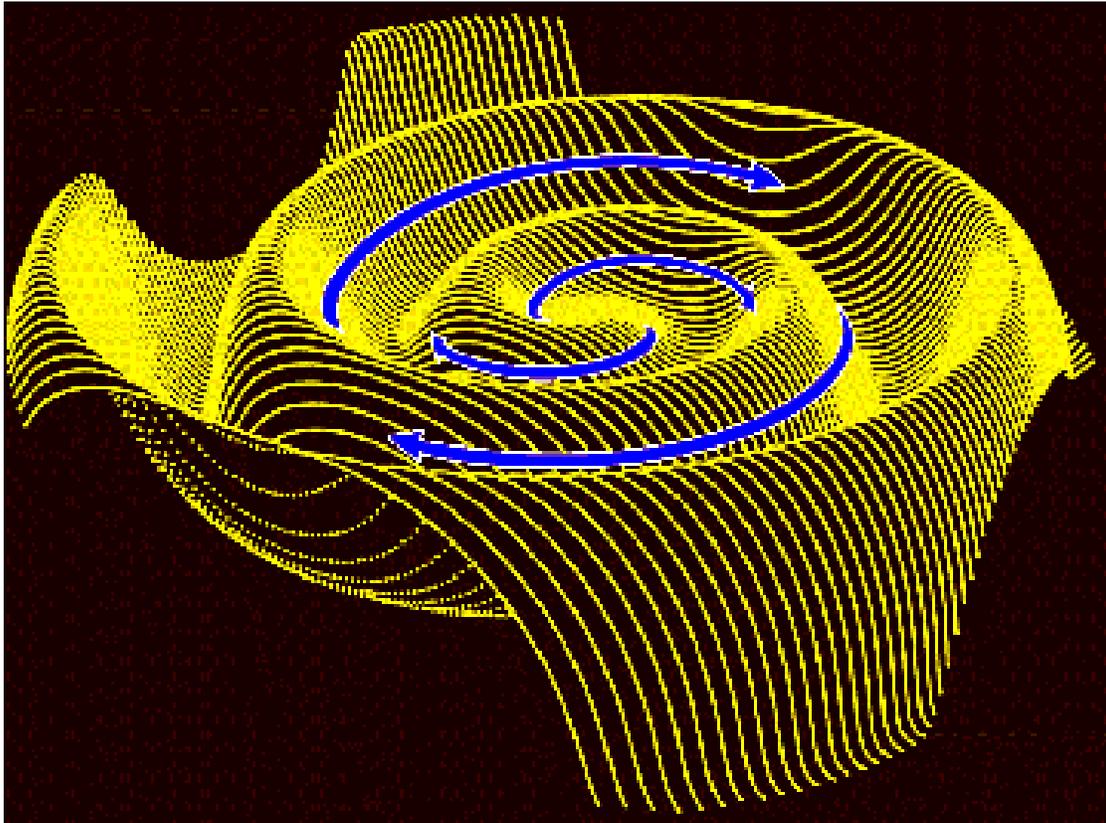


Figura 1.1.1 Espiral de Parker (“saia de bailarina”) para o IMF.

1.1.2 As Manchas Solares

A manifestação mais óbvia da atividade solar, controlada pelo campo magnético solar, é o ciclo de 11 anos de manchas solares. As manchas solares encontram-se em regiões da fotosfera (a superfície visível do Sol). O campo magnético das manchas é intenso, às vezes superior a 3000 Gauss. O aprisionamento do plasma solar por este intenso campo magnético proporciona à mancha uma energia muito elevada e o resfriamento do gás interno devido à falta de interação com o que está a seu redor permite distinguí-las no

disco solar (veja as áreas escuras da figura 1.1.2; a temperatura da superfície da mancha é de ~ 3000 K, enquanto a temperatura externa chega a 6000 K).

Em geral, as manchas solares aparecem em grupos de duas ou mais e são lideradas por uma mancha-líder. A polaridade do campo magnético destas manchas também é invertida a cada 11 anos, caracterizando portanto um ciclo magnético de 22 anos (ou ciclo de Hale). Embora a polaridade do campo dipolar seja revertida no período de máxima atividade solar, a polaridade das manchas é revertida no início de cada novo ciclo de 11 anos. As primeiras manchas de um novo ciclo aparecem em latitudes de 20°-25° em ambos os hemisférios solares. À medida que o ciclo progride, surgem novas manchas em latitudes cada vez mais próximas do equador solar.

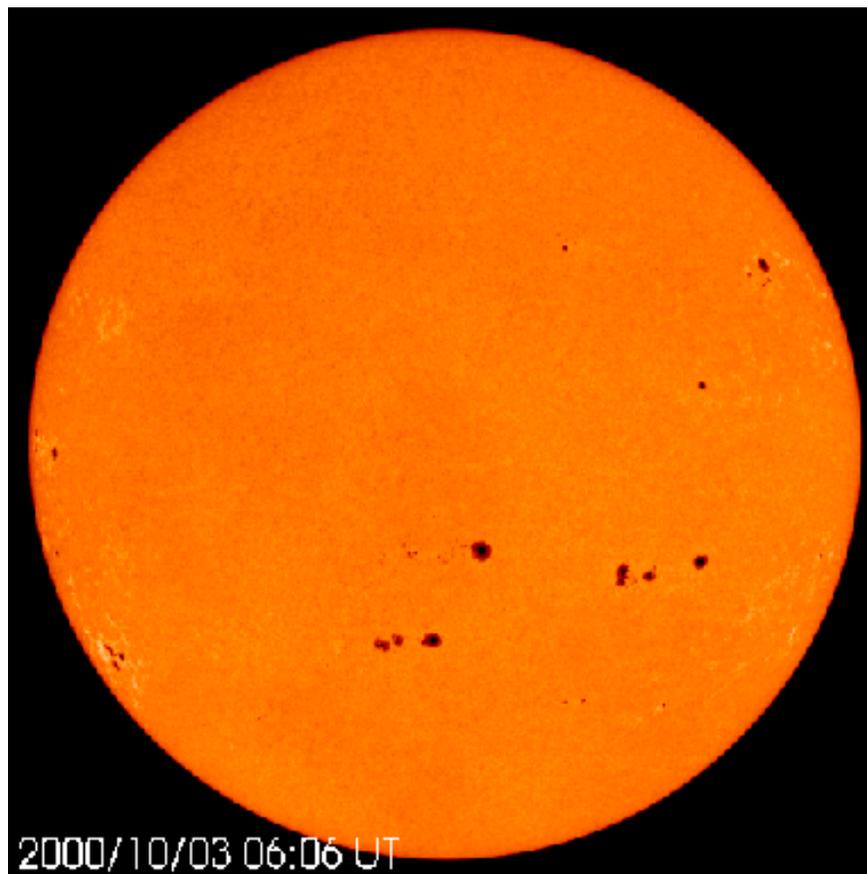


Figura 1.1.2 Grupos de manchas solares.

O número relativo de manchas solares R_z (Wolf, 1848) é o índice mais simples para expressar o nível de intensidade e a polaridade do campo magnético solar ao longo do tempo. No período de máxima atividade, observa-se um grande fluxo magnético em direção à superfície e o número de manchas solares é máximo. O valor deste parâmetro é calculado como $R_z = k(10g+n)$, onde n é o número total de manchas, g o número de grupos e k uma constante de normalização própria de cada observatório.

1.1.3 Os Ciclos Solares

O ciclo solar de 11 anos contabiliza o número de manchas solares observadas da Terra. O maior e o menor número de manchas solares ocorrem respectivamente durante o período de máxima e mínima atividade solar. A duração média de um ciclo solar é de 11,1 anos, com uma fase ascendente variando entre 4 e 5,5 anos, e uma descendente, mais longa, entre 5 e 6,5 anos. O espectro fino de um ciclo solar apresenta um pico proeminente em torno de 11,1 anos, em geral evidenciado pela existência de um tripleto de picos adjacentes, em torno de 9,8; 10,7 e 12,5 anos, além dos ciclos solares de ~77 anos (ciclo de Gleissberg) e de ~100 anos (ciclo secular). Enquanto procuramos por estas periodicidades em parâmetros climáticos, deve ser lembrado que o número de manchas não é a causa direta da interação Sol-Terra, mas é um parâmetro indicativo do nível de radiação e de partículas emitidas naquele intervalo de tempo. Por exemplo, a “tendência recorrente” de 27 dias (período médio de rotação solar), também observada em alguns fenômenos atmosféricos, é sempre marcada pelo aparecimento de grande quantidade de grupos de manchas.

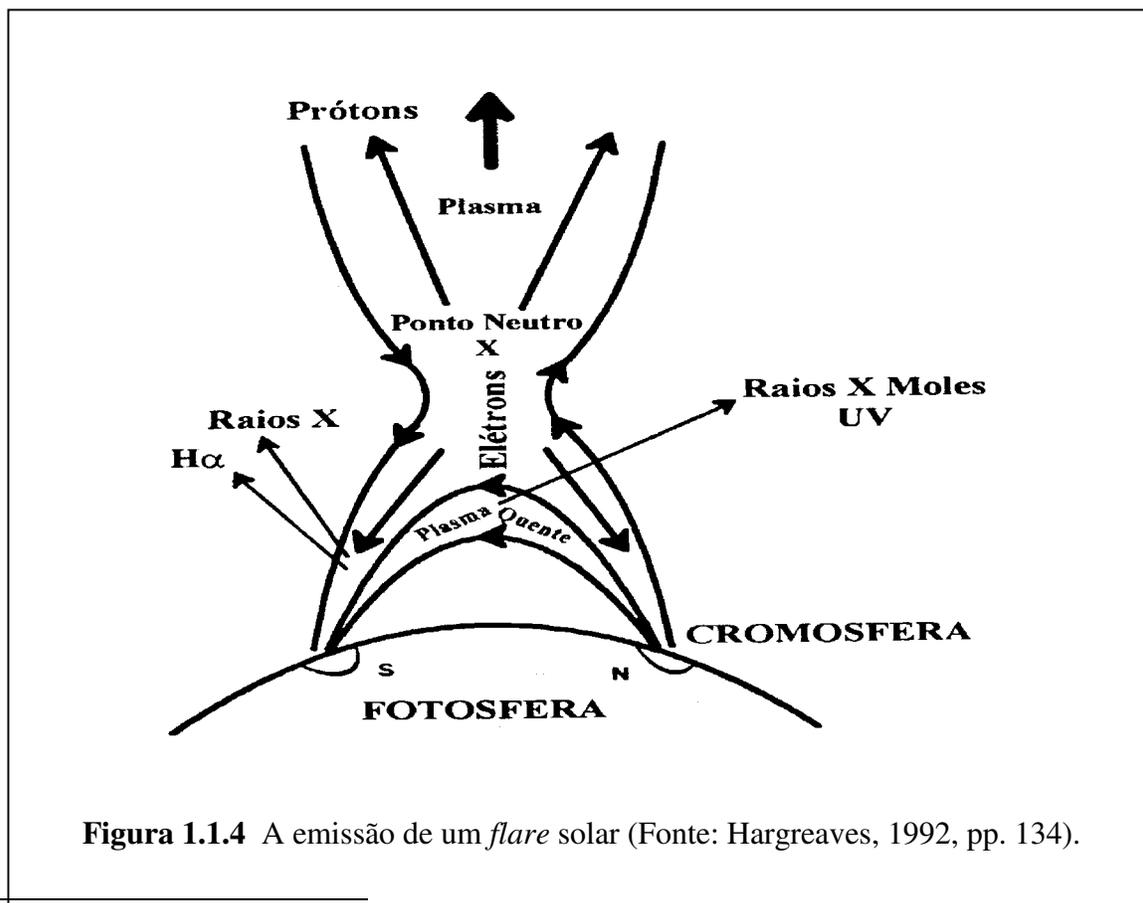
1.1.4 A Emissão Corpuscular do Sol

As erupções solares, ou *flares*, ocorrem no colapso das manchas solares, devido à aniquilação do campo magnético que as aprisiona. Estas erupções solares são de curta duração, de alguns minutos a algumas horas. Durante um *flare*, é liberada uma grande quantidade de radiação abrangendo uma extensa faixa do espectro eletromagnético, além da ejeção de partículas com grande quantidade de energia, principalmente prótons e elétrons.

Elétrons e prótons relativísticos (10-200 MeV) são freqüentemente emitidos por grupos maiores de manchas solares e chegam próximo à Terra de uma a duas horas depois da ocorrência de um *flare*. Estas partículas são canalizadas ao longo da espiral das estruturas do campo magnético interplanetário (IMF).

Estes fluxos de raios cósmicos solares (SCR) também podem ser ejetados de regiões específicas da corona solar¹ (denominadas regiões-M), com uma tendência de recorrência a cada 27 dias. O evento CME, “coronal mass ejections”, é caracterizado pela ejeção de grande quantidade de plasma e campos magnéticos. As partículas e radiações de *flares* originários de CME e que chegam à Terra provocam alterações na atmosfera. A figura 1.1.4 é uma esquematização de uma *flare* solar.

Atualmente, o estudo da freqüência de ocorrência e da intensidade de CME e *flares* na heliosfera tem sido considerado um parâmetro muito importante para o estudo da interação Sol-Terra.



¹ A corona, ou coroa solar, é a camada externa da atmosfera solar.

1.2 O Meio Interplanetário

1.2.1 O Vento Solar

Além da radiação eletromagnética e de *flares* de prótons solares, o Sol emite continuamente um fluxo de partículas na forma de vento solar. As variações de velocidade e densidade do vento solar são responsáveis por distorções permanentes nas linhas do campo geomagnético².

Apenas cerca de 1% da energia do vento solar é dissipada para dentro da magnetosfera, mas a transferência é muito mais efetiva quando o IMF³ tem uma componente de magnitude substancialmente grande e oposta ao campo geomagnético e que está na direção z do sistema de coordenadas geralmente utilizado para o meio interplanetário.

Quando o número de manchas solares é máximo, os *flares* emitem ondas de choque. Nestas condições, os fluxos de plasma quente magnetosféricos são aumentados, resultando em tempestades magnéticas na aurora polar e no aparecimento de uma corrente elétrica em torno da região equatorial da Terra (“ring current”, medida pelo índice geomagnético *Dst*).

1.2.2 Os Setores Magnéticos Solares

A Terra, em seu movimento de rotação ao redor do Sol, às vezes está acima ou abaixo da superfície que divide as linhas de campo magnético opostas do IMF. Em geral, de duas a quatro vezes por período de rotação solar (~27 dias), a Terra passa por fronteiras de regiões do espaço interplanetário com diferentes polaridades do campo magnético

² Estas distorções das linhas do campo geomagnético são expressas por vários índices geomagnéticos, tais como Kp, Ap, etc.

³ O IMF tem três componentes: B_x ao longo da linha Sol-Terra, B_y em uma direção perpendicular mas no plano equatorial heliomagnético, e B_z perpendicular a ambas.

interplanetário. A essas regiões em que o IMF tem uma mesma polaridade, dá-se o nome de setor magnético solar para a Terra e à superfície separando as regiões de diferentes polaridades do IMF dá-se o nome de corrente heliosférica (“Heliospheric Current Sheet”, HCS). A superfície é curva por causa da rotação solar. Durante a maior parte do ciclo solar, a HCS é basicamente a de um dipolo inclinado com grau variável de distorção quadrupolar. Próximo ao máximo do ciclo, as componentes dipolar e quadrupolar são balanceadas e a estrutura torna-se complexa (Internet, <http://quake.stanford.edu/~wso/SB/SB.html>), conforme ilustra a figura 1.2.1 durante a fase ascendente do ciclo solar (Svalgaard, 1973).

Dentro de cada um destes setores, o campo magnético interplanetário está apontando em direção ao Sol (-) ou em direção contrária ao Sol (+). Quando a Terra atravessa uma fronteira de setor magnético solar, temos um evento MSB (“Magnetic Sector Boundary”). Nestas datas, as velocidades e densidades do vento solar e campos magnéticos são maiores e tempestades geomagnéticas podem ocorrer. Se o IMF tem uma componente B_z grande, ocorrerá uma tempestade magnética.

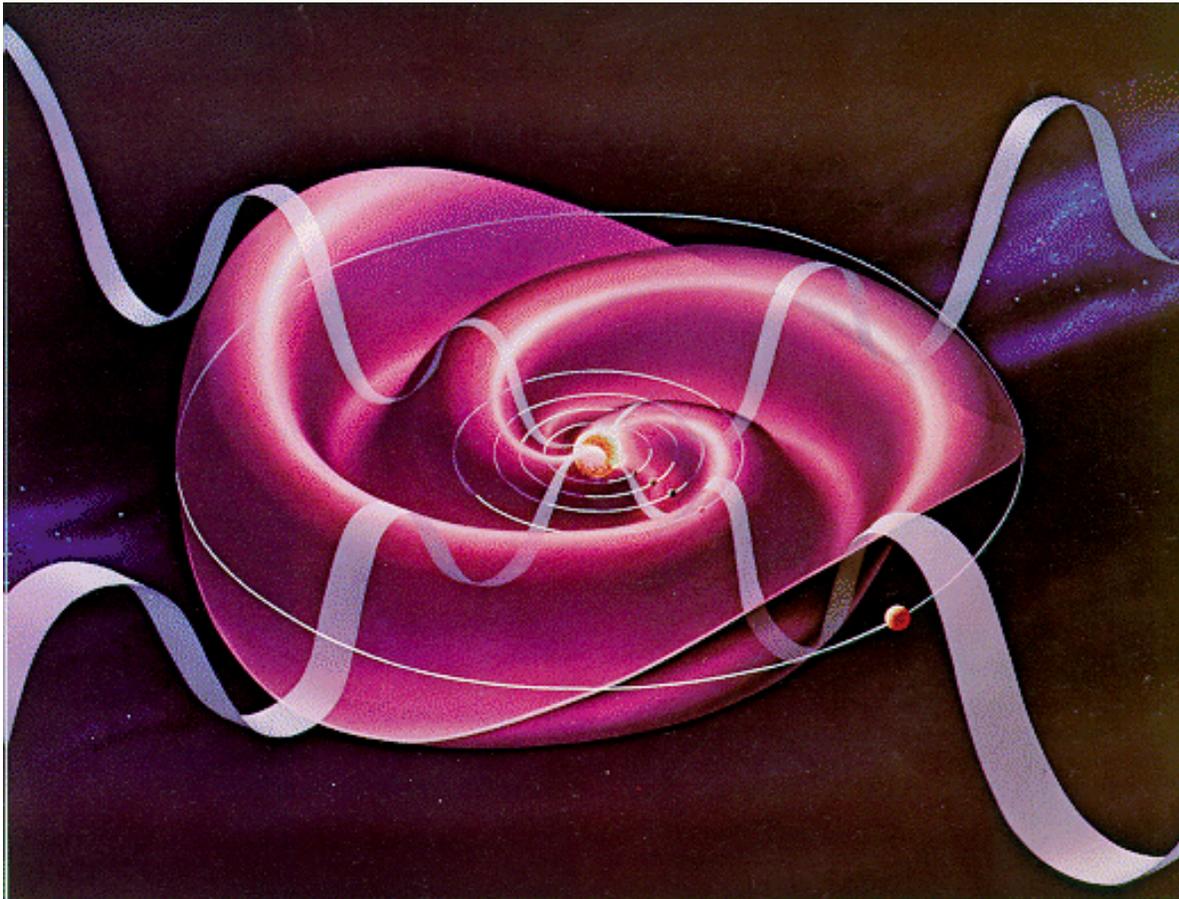


Figura 1.2.1 Os setores magnéticos solares.

1.2.3 Os Raios C3smicos Gal3cticos

Outro fen3meno competindo com os pr3tons solares e influenciado pelo IMF s3o os raios c3smicos gal3cticos (GCR). Seu acesso 3 Terra 3 parcialmente impedido pela estrutura eletromagn3tica do espaço interplanet3rio, que se estende por dezenas de unidades astron3micas, principalmente durante o per3odo de m3xima atividade solar, quando h3 aumento do n3mero de eventos de pr3tons solares de alta energia. O movimento destas part3culas gera ondas de choque que obstruem o movimento de GCR no meio interplanet3rio. Este fen3meno 3 conhecido como decr3scimos Forbush (Forbush, 1954). Portanto, os GCR chegam 3 Terra em n3mero m3ximo durante os anos de m3nima atividade solar. Durante o per3odo de atividade solar alta, a intensidade dos GCR na Terra reduz-se de 20 a 30% na regi3o polar. Portanto, dois efeitos opostos s3o vistos simultaneamente: um aumento de pr3tons solares e um decr3scimo de GCR, com poss3veis e complicados efeitos atmosf3ricos.

1.2.4 A Magnetosfera Terrestre e os Cintur3es de Radiaço

O campo geomagn3tico 3 aproximadamente dipolar. Sobre o sul do territ3rio brasileiro, encontra-se a regi3o da anomalia magn3tica brasileira (BMAr), regi3o mais afastada do dipolo imagin3rio pr3ximo do centro da Terra e, portanto, de menor campo magn3tico.

As part3culas presas ao campo geomagn3tico formam cintur3es de radiaço em torno da Terra. Os cintur3es de Van Allen (1958) s3o compostos principalmente por pr3tons e el3trons. Os 3ons de h3lio, carbono, oxig3nio e nitrog3nio tamb3m s3o encontrados nestes cintur3es. As energias destas part3culas podem variar de 200 KeV at3 dezenas e centenas de MeV (como os pr3tons de alta energia).

As principais fontes de part3culas para estes cintur3es s3o: o Sol (atrav3s do vento solar, de CME e de part3culas armazenadas na “cauda” da magnetosfera); as part3culas

presentes na ionosfera terrestre, principalmente nos pólos; os raios cósmicos galácticos de baixa energia (da ordem de centenas de KeV); e a injeção direta de partículas por “tempestades magnéticas”. Prótons e elétrons também podem ser gerados através do decaimento de nêutrons na atmosfera (albedo planetário)

A figura 1.2.2 é uma ilustração das regiões da magnetosfera terrestre e dos cinturões de radiação de Van Allen.

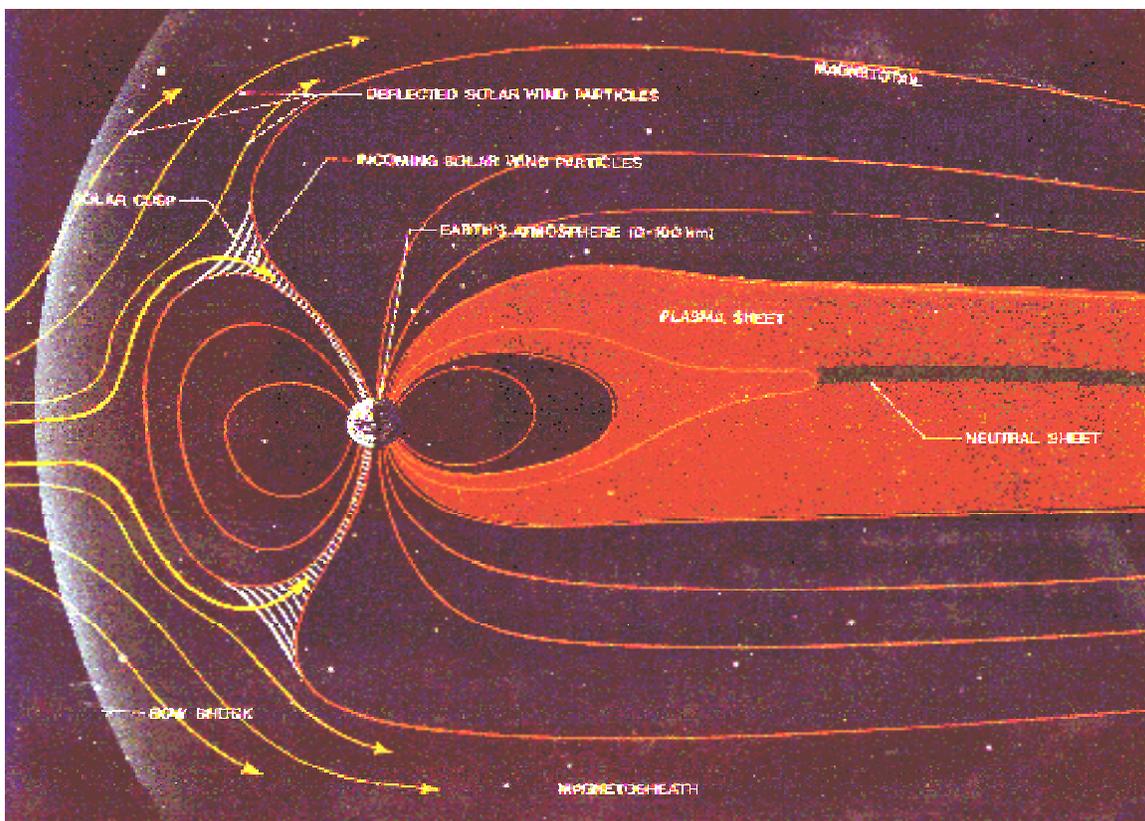


Figura 1.2.2 A magnetosfera terrestre e os cinturões de radiação.

1.2.5 A Penetração de Partículas na Atmosfera

O transporte de partículas através da magnetosfera dá-se por difusão (radial e angular). Em geral, os prótons solares penetram na atmosfera pela região da calota polar de absorção (PCA). Os eventos PCA estão associados com tempestades geomagnéticas. Estes eventos podem durar de 1 a 6 dias e podem penetrar a atmosfera até altitudes de 30 km ou

menos, produzindo considerável aumento da ionização. Em eventos extensos, o efeito pode mesmo se estender em direção ao equador.

O fator que interfere na penetração dos GCR na atmosfera é a rigidez geomagnética de corte⁴. Este valor varia em função da latitude geomagnética, da altitude (ou seja, da densidade atmosférica) e da direção de incidência das partículas. O valor da rigidez de corte é máximo na região do equador geomagnético e mínimo nas regiões polares.

Como os *flares* solares são mais frequentes no período de máximo de manchas solares, os eventos PCA também são mais comuns nesta fase, introduzindo portanto uma frequência de ocorrência de 11 anos em seu ciclo. Durante os *flares*, ocorre um aumento da incidência de radiações e partículas e isto causa distúrbios na ionosfera.

Já os eventos de prótons solares são mais frequentes durante os anos de mínima atividade solar, provavelmente porque as estruturas da espiral do IMF são mais favoráveis quando o Sol está menos ativo. Para os elétrons, a situação é mais complexa porque aparecem efeitos magnetosféricos restritos a altitudes acima de 80 km. Entretanto, raios-x secundários de “bremsstrahlung” (radiação de freamento) produzidos por estes elétrons relativísticos podem alcançar a baixa atmosfera.

1.3 A Ação da Atividade Solar na Baixa Atmosfera

Desde o século passado estuda-se a ação da atividade solar e de distúrbios do meio interplanetário nas diversas camadas da atmosfera terrestre. As discussões atuais são sobre a ação de fenômenos solares e interplanetários nas condições climáticas da baixa atmosfera. A região da baixa atmosfera, aproximadamente entre 10 e 20 Km, também é conhecida como “área meteorológica”. Muitos trabalhos científicos indicaram a existência de ciclos de 11, 22, 45, 60 e de 75 anos em muitos parâmetros meteorológicos, tais como o nível de chuvas, as variações de temperatura na superfície, a pressão atmosférica, a frequência de secas, etc. Apesar de haver consenso quanto à existência de um mecanismo físico de

⁴ A rigidez geomagnética de corte é a energia mínima que uma partícula carregada deve possuir para vencer o campo magnético local e ser detectada na superfície terrestre.

modulação a atuar continuamente a longo prazo, algumas contradições físicas e estatísticas têm sido apontadas na direção de não existir uma influência significativa e direta da variabilidade solar sobre o clima terrestre a curto prazo, ou seja, em escalas temporais de algumas horas. A citar:

- (a) Para que os efeitos da atividade solar em várias manifestações meteorológicas sejam física e estatisticamente comprovados, é necessário o acúmulo de grande quantidade de dados experimentais e de métodos matemáticos especiais; Alguns dos resultados publicados ignoraram estas condições.
- (b) Os possíveis efeitos atmosféricos de *flares* solares e de distúrbios geomagnéticos dependem significativamente das coordenadas do local de observação, da estação do ano, da fase do ciclo solar e do estado da atmosfera. Além de não conhecermos todas estas condições iniciais para os dados que dispomos, tais resultados experimentais são difíceis de serem reproduzidos!
- (c) A questão energética: Os processos atmosféricos estudados envolvem um fluxo energético da ordem de 10^{19} - 10^{20} J/dia. No entanto, simultaneamente, a taxa de energia do vento solar injetada na magnetosfera durante distúrbios geomagnéticos, é de aproximadamente 10^{16} J/dia, ou seja, uma magnitude 3 a 4 vezes menor.

Muitas investigações atuais (Pudovkin & Raspopov, 1992; A Review: “*The Mechanism of Action of Solar Activity on the State of the Lower Atmosphere and Meteorological Parameters*”) têm procurado esclarecer como ocorrem variações nas características ópticas da atmosfera devido a processos físico-químicos na baixa e média atmosfera provocados pela injeção modulada de fluxos de raios cósmicos de origem galáctica e solar com energias de 10^8 a 10^9 MeV. Como o mecanismo físico de interação entre o Sol e a Terra ainda está sendo estudado, farei a seguir uma breve descrição do mecanismo proposto no trabalho de Pudovkin e Raspopov.

A atividade solar causa alterações na intensidade dos fluxos de plasma que formam o vento solar e também dos campos que os envolvem. Variações do vento solar

modulam os fluxos de raios cósmicos que penetram a baixa e média atmosfera terrestre. São precisamente os raios cósmicos que atuam efetivamente nas interações físico-químicas na atmosfera a altitudes entre 10 e 20 km. Ao mesmo tempo, os GCR experimentam fortes variações coincidindo com o ciclo de atividade solar (mas fora de fase), bem como durante o desenvolvimento de *flares* solares.

Segundo o estudo de Pudovkin e Raspopov, ocorrem variações nas propriedades ópticas da atmosfera devido à ação de fluxos de raios cósmicos. A transparência da atmosfera aumenta nos períodos de máxima atividade solar, quando há decréscimo de raios cósmicos galácticos e diminui nos períodos de mínima atividade solar.

Os raios cósmicos também podem exercer ação efetiva na estrutura e na intensidade da cobertura do céu por nuvens (Svensmark, H. e Friis-Christensen, E., 1997). Experimentalmente observou-se que após *flares* solares, ocorreu um aumento de raios-x e de radiação UV acompanhado também por um aumento da área do céu coberta por nuvens.

No entanto, não só o nível geral médio de atividade solar (que caracterizamos com o número de manchas solares), mas também as peculiaridades do desenvolvimento de *flares* e CME influenciam a estrutura dos fluxos de raios cósmicos que penetram na Terra. Além disso, verificou-se que a ação da atividade solar no clima terrestre é diferente durante ciclos pares e ímpares e, em vista desta ação assimétrica, deve ser exibida uma componente de 22 anos na variabilidade climática.

De acordo com este mecanismo proposto por Pudovkin e Raspopov, um grande número de conseqüências tem sido formuladas, as quais necessitam de verificação experimental e de uma estimativa numérica para a energia dos processos investigados. Experimentalmente, este mecanismo é correto do ponto de vista energético. A energia adicional que entra na atmosfera durante um distúrbio geomagnético, com conseqüente variação da transparência, tem aproximadamente o mesmo valor da energia de processos físicos excitados na atmosfera.

1.4 A Variabilidade Climática

Alguns fenômenos de origem terrestre não estão diretamente relacionados à variabilidade solar, mas frequentemente atuam em conjunto com fenômenos solares (tempestades geomagnéticas, *flares*, CME, etc.) e/ou sofrem efeitos da modulação pelas fases do ciclo solar (máximos e mínimos da curva de manchas solares).

Alguns exemplos de parâmetros meteorológicos que foram influenciados de alguma forma pela variabilidade da atividade solar: o vento estratosférico em latitudes médias com modulação bienal (QBO, “Quasi-Biennial Oscillation”), com implicações diretas nas temperaturas da estratosfera do hemisfério norte (Labitzke e Van Loon, 1988) e o fenômeno El Niño associado com a Oscilação Meridional (ENSO), com períodos entre 2 e 7 anos (Kane e Trivedi, 1986).

A longo prazo, alguns fenômenos climáticos apresentam em algumas latitudes periodicidades de 11 e/ou 22 anos: pressão atmosférica, temperatura da superfície do mar, temperaturas na troposfera, níveis de precipitação, área do céu coberta por nuvens, frequência de ciclones, índices de relâmpagos, etc. O aumento da concentração de alguns gases (como o CO₂) também podem afetar a tendência temporal de parâmetros atmosféricos e assim obscurecer efeitos solares.

A presença de ciclos solares de 11 e 22 anos em parâmetros climáticos vêm sendo estudada há muitas décadas. Há cerca de 30 anos foi mostrada a existência de correlações entre o ciclo solar de 11 anos e o ciclo magnético solar de 22 anos com o índice anual de chuvas. Estas correlações foram observadas na Austrália, na África do Sul, no Brasil e no oeste dos EUA. King (1975) mostrou que, de 1865 a 1925, o índice anual de chuvas em Fortaleza apresentava uma correlação alta com o ciclo de 22 anos e que esta correlação mudava de fase após alguns anos. Algumas vezes, as variações de amplitudes foram superiores a 100%.

Um estudo desses efeitos certamente seria útil para prever secas e inundações para a prática da agricultura. Mas a alteração de fase de correlação dificulta a previsão de parâmetros meteorológicos. Além disso há uma dependência da fase de correlação com a latitude. Kane e Trivedi (1986) aplicaram o método de máxima entropia para algumas séries pluviométricas de várias partes do planeta e encontraram uma periodicidade de 11 anos proeminente em muitas destas regiões.

Os resultados obtidos recentemente por pesquisadores que estudam o mecanismo de interação Sol-Terra estão respondendo a algumas contradições da teoria meteorológica clássica, que considera os processos atmosféricos atuando de forma independente das condições do meio interplanetário. Com os dados mais recentes das séries pluviométricas, é possível aumentar o nível de confiança da análise estatística.

O estudo da interação Sol-Terra tem sido tema de centenas de artigos nos mais importantes veículos de divulgação de trabalhos científicos da área. A citar, os trabalhos de Tinsley (1991, 1993, 1996), Pudovkin (1992, 1996), Svensmark (1997) e Friis-Christensen (1995, 1997). A pesquisa em torno deste tópico visa estudar as condições do Sol (fases dos ciclos, amplitude e polaridade do campo magnético solar, eventos de emissões de fluxos de raios cósmicos e de radiações eletromagnéticas) e do meio interplanetário (sobretudo a amplitude e polaridade do campo magnético interplanetário) e suas possíveis implicações na magnetosfera e na atmosfera terrestre. A previsão de tais parâmetros interplanetários é conhecida atualmente como previsão de “tempo espacial” (*Space Weather*). Os cientistas estão desenvolvendo modelos físicos e matemáticos para previsões meteorológicas na Terra aproveitando-se de medidas de parâmetros geofísicos diversos, como o campo magnético e elétrico interplanetário, a densidade do vento solar, o fluxo de GCR e SCR, etc. Estas linhas de pesquisa estão ajudando a descrever os mecanismos de interação Sol-Terra (Brückner, 2000).

Capítulo 2

Dados Experimentais e Métodos Estatísticos

2.1 As Séries de Manchas Solares e de Chuvas

2.1.1 A Série de Manchas Solares

A série de manchas solares que estudamos é a série de valores médios anuais de 1849 a 1999. Estes dados foram obtidos no endereço eletrônico do Centro de Dados de

Índices de Manchas Solares (SIDC, Bélgica: <http://sidc.oma.be/index.php3>), o mais completo banco de dados sobre manchas solares do mundo.

2.1.2 As Séries de Chuvas

Estudamos as séries anuais de índices de chuvas de três estações meteorológicas: Pelotas, RS (31° 45' S, 52° 21' W), de 1893 a 1999; Campinas, SP (22° 53' S, 47° 04' W), de 1890 a 1999; e Fortaleza, CE (3° 45' S, 38° 31' W), de 1849 a 1999. Estas estações estão localizadas em regiões de latitudes subtropicais, tropicais e equatoriais do território brasileiro. As instituições que nos forneceram estes dados foram: a Fundação Cearense de Meteorologia (FUNCEME), o Departamento de Meteorologia da Universidade Federal de Pelotas (UFPEL) e o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC). Não há registro de dados de chuvas por parte destas instituições e de outras no Brasil para períodos anteriores aos citados acima.

Campinas está localizada no interior do território brasileiro, ao contrário de Pelotas e Fortaleza, cidades litorâneas. Por esta razão, além destas três estações, também estudamos as séries de chuvas de algumas estações meteorológicas do Estado de São Paulo com o intuito de comparar séries de regiões do interior e do litoral e verificar se há diferenças significativas entre os regimes de chuvas das duas regiões, tais como a presença bem definida de ciclos e/ou de grandes variações relativas dos índices de chuvas. Para o litoral paulista, foram estudadas as estações de Caraguatatuba (23° 38' S, 45° 26' W), de 1944 a 1997, e Ubatuba (23° 25' S, 45° 05' W), de 1946 a 1995. E para o interior paulista, além de Campinas, foram estudadas as estações de Araçatuba (21° 12' S, 50° 27' W), de 1944 a 1997, e Bauru (22° 19' S, 49° 2' W), de 1940 a 1997. Todas estas séries foram obtidas junto ao Centro de Ensino e Pesquisa em Agricultura (CEPAGRI) da UNICAMP. Infelizmente, não foi possível o acesso aos dados mais recentes, a partir de 1997, e não há registro de dados confiáveis para anos anteriores aos anos iniciais citados acima.

A série de chuvas de Fortaleza é a mais longa do nordeste brasileiro e por esta razão foi uma das primeiras séries a ser estudada pelos geofísicos e meteorologistas de todo o mundo. As chuvas do NE não estão distribuídas uniformemente por todos os meses e cada região tem um regime de chuvas diferente. O norte do NE brasileiro tem o máximo de chuvas durante o outono (março, abril e maio). A série de chuvas de Pelotas é uma das

maiores séries de regiões de latitudes subtropicais da América do Sul que dispomos. A estação de chuvas é de agosto a dezembro, ou seja, durante o segundo semestre do ano (Kane, 2000). A série de chuvas de Campinas também é uma das maiores séries que temos do território brasileiro. A principal estação de chuvas é o verão local (dezembro, janeiro, fevereiro).

2.2 A Análise Espectral das Séries

O estudo das periodicidades de parâmetros geofísicos é de fundamental importância para o entendimento das causas de suas variações. Portanto, faremos uma análise espectral das séries temporais de manchas solares e de chuvas com o objetivo de obter uma estimativa quantitativa da variabilidade de suas amplitudes.

2.2.1 O Método de Entropia Máxima

O método que utilizamos para a análise espectral das séries temporais é conhecido como método de entropia máxima, ou MEM. Um estudo completo deste método envolve conceitos estatísticos complexos e diversos (como a teoria linear de predição de Wiener), muito além de nossos objetivos principais. A origem do termo “entropia máxima” está na teoria de processos estocásticos, onde é desenvolvida uma expressão que relaciona a entropia à potência espectral. Para maiores detalhes deste método, há algumas referências citadas na bibliografia deste trabalho que nos serviram de apoio (por exemplo: Kane, 1977 e 1979; Kantor e Trivedi, 1980).

Desenvolvido inicialmente em 1967 por John Burg e aperfeiçoado em 1975 por Ulrych e Bishop, este método detecta periodicidades com uma resolução muito superior aos métodos convencionais, sobretudo para séries curtas em que o período procurado é próximo do intervalo total de tempo dos dados. Ideal, portanto, para as séries curtas de parâmetros geofísicos obtidas por satélites somente desde a década de 60 (Burg, 1967; Ulrych e Bishop, 1975).

Apesar da excelência na detecção dos períodos, as estimativas para as amplitudes (potência espectral) não são, em geral, obtidas corretamente pelo MEM (Kane, 1977). Este método produz um espectro verdadeiro somente se o espectro varia suficientemente pouco com a frequência, o que nem sempre ocorre. Para analisar a importância relativa de cada pico, usaremos o MEM somente para detectar os picos T_k ($k=1$ até n) e substituiremo-los em:

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^n \left[a_k \sin\left(\frac{2\pi t}{T_k}\right) + b_k \cos\left(\frac{2\pi t}{T_k}\right) \right] + E$$

$$= A_0 + \sum_{k=1}^n r_k \sin\left(\frac{2\pi t}{T_k} + \phi_k\right) + E$$

onde $f(t)$ é a série observada e E o erro incluso na aproximação. Uma regressão múltipla por mínimos quadrados (MRA) fornece a solução para os coeficientes A_0 , a_k , b_k e seus respectivos erros padrões (Bevington, 1969). Com as melhores estimativas para os $2n + 1$ coeficientes, é possível reconstruir a série original $f(t)$, assumindo que todos os coeficientes tenham permanecido constantes no intervalo de tempo considerado. Então, através de uma transformação trigonométrica simples, também podemos estimar as amplitudes r_k e seus respectivos desvios padrões σ_r e as fases ϕ_k . Amplitudes r_k excedendo $2\sigma_r$ são significativas a um nível de confiança de 95% (Kane, 1977).

2.2.2 A Descrição do Software de Trabalho

O software que utilizamos para a análise espectral é conhecido como MESA (Maximum Entropy Spectral Analysis) e foi obtido junto ao Prof. Dr. R. Kane do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). O pacote estatístico, baseado na associação

MEM-MRA, permite calcular estimativas para os períodos e para as amplitudes e respectivos erros. Também calcula a correlação entre a curva original e a reconstruída, a variância e valor médio da série. Mas tem um número limite de dados de entrada: 180 pontos. O MESA é capaz de dar as estimativas de amplitudes para qualquer frequência escolhida e o “passo” entre uma frequência e outra pode ser escolhido tão pequeno quanto se queira. Algumas das referências bibliográficas desta tese tratam especificamente do método de máxima entropia usado em análises espectrais de séries de parâmetros geofísicos.

2.3 Métodos Estatísticos para Séries Temporais

2.3.1 Os Filtros de Médias Móveis

Nem sempre uma série temporal permite revelar com clareza características como a variabilidade de amplitudes, tendências das curvas (ascendente, descendente, exponencial etc.) ou o seu padrão sazonal e/ou cíclico de uma série. Em geral, as séries são alisadas por filtros de médias móveis (ou corridas) simples (Diggle, “*Time Series: A Biostatistical Introduction*”, 1990). A ordem destes filtros depende do caso considerado. Devem ser feitos testes com filtros de ordens consecutivas até que a nova série alisada apresente períodos próximos dos períodos em que estamos interessados.

A situação torna-se mais complicada quando é necessário uma comparação com outra série, como entre as séries de chuvas e a série de ciclos solares magnéticos. Pode-se verificar se há coincidência de espectros após as séries serem alisadas e, se há, qual o coeficiente de correlação entre elas. Para uma interpretação mais simples, é recomendável a aplicação de um filtro com a mesma ordem em ambas as séries. Se os filtros forem de ordens diferentes, evidentemente haverá um deslocamento de tempo entre as séries alisadas e as possíveis interpretações devem levar este fato em consideração.

As amplitudes de duas séries temporais também podem ser normalizadas quando o que mais nos interessa é a correlação entre as *periodicidades* das séries, como é o caso da

influência da variabilidade do ciclo solar de 22 anos sobre parâmetros climáticos (King, 1975). A normalização que usaremos é do tipo: $(N_Y - N_N) / (N_X - N_N)$, onde N_Y é a média anual de manchas solares para o ano em questão e N_X e N_N são, respectivamente, a média anual de manchas para os anos de máxima e mínima atividade solar entre os quais N_Y está localizado. Com a normalização, as amplitudes variam somente entre 0 e 1. Procedimento análogo pode ser feito com os índices de chuvas.

2.3.2 Cálculo do Coeficiente de Correlação

Define-se o coeficiente de correlação de ordem k ($k \geq 0$, inteiro) entre as séries temporais de chuvas e de manchas solares $\{(x_t, y_t): t = 1, \dots, n\}$ como:

$$C_{xy}(k) = \frac{\sum_{t=k+1}^n (x_t - \bar{x})(y_{t-k} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2 \sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2}}$$

A barra é o símbolo para os valores médios das séries de chuvas $\{x_t\}$ e de manchas solares $\{y_t\}$.

O valor do coeficiente de correlação pode variar de (-1) a $(+1)$, ou de -100% a 100% se o valor for multiplicador por 100% . Faremos o cálculo do coeficiente de correlação apenas para $k = 0$, ou seja, quando não há um deslocamento temporal entre as séries.

No apêndice desta tese, está disponível o programa que escrevi em linguagem MATLAB para o cálculo do coeficiente de correlação entre as séries de chuvas e manchas solares.

2.3.3. Desvio Padrão e Nível de Confiabilidade do Coeficiente de Correlação

O desvio padrão do coeficiente de correlação C é calculado como:

$$\sigma_C = \frac{1 - C^2}{\sqrt{n}}$$

onde n é o número de pontos de ambas as séries . Para que um nível de confiança Q exigido para o coeficiente de correlação seja respeitado, é necessário que

$$|C| > z_\alpha \cdot \sigma_C$$

onde

$$2\phi_0(z_\alpha) = 1 - \alpha = Q$$

onde $\phi_0(z_\alpha)$ é a função erro de Gauss (Bronshtein e Semendiaev, 1979). Por exemplo, para $Q = 95\%$ (0.95), teremos $\alpha = 0.05$ e $\phi_0(z_\alpha) = 0.475$. Usando a tabela da função erro, podemos descobrir o valor de z_α e multiplicar pelo desvio padrão do coeficiente de correlação . Se o módulo do coeficiente for maior que este produto, teremos um nível de confiança de 95% satisfeito.

2.4 Os Eventos de Curto Prazo

Um mecanismo possível de relação entre a atividade solar e o clima na Terra poderia ser revelado através do estudo da variabilidade dos índices de chuvas durante eventos solares e magnetosféricos isolados, como *flares* solares, decréscimos Forbush de GCR e eventos MSB.

2.4.1 Eventos GLE e Forbush

As energias de prótons de *flares* solares são, em geral, da ordem de 1-100 MeV e seu espectro é quase exponencial com a energia característica em torno de 30 MeV. Mas uma pequena parte dos grandes *flares* solares (a citar o de 23 de fevereiro de 1956, o de 4 de agosto de 1972, o de 16 de fevereiro de 1984 e o de 19-24 de outubro de 1989), tiveram espectros com fluxos significativos de prótons com energias acima de 10 GeV. Estes fluxos de prótons de alta energia que poderiam chegar à superfície de regiões de latitudes baixas (onde a rigidez magnética de corte é alta) foram obtidos em um banco de dados de eventos GLE (Ground Level Enhancements - Gentile, *private communication*, 2000). São 56 eventos GLE registrados por monitores de nêutrons localizados em regiões de latitudes com rigidez de corte entre 2-5 GeV.

Selecionamos também 57 grandes decréscimos Forbush do monitor de nêutrons Washington ($R = 1,24$ GeV) de 1956-1996 com variações de amplitude superiores a 7%. As amplitudes dos eventos Forbush nos mesmos dias em regiões de baixas latitudes, registradas pelo monitor de nêutrons de Huancayo, Peru ($R = 12,92$ GeV), foram maiores que 3%.

Ao final deste capítulo encontra-se a tabela de eventos de raios cósmicos de curto prazo que será usada no capítulo 5. Os eventos selecionados com um, dois e três asteriscos ocorreram, respectivamente, durante a época de chuvas de Fortaleza, Campinas e Pelotas.

2.4.2 Eventos MSB

Alguns fenômenos meteorológicos podem estar relacionados à estrutura dos setores magnéticos solares. Em geral, tem-se 2 ou 4 setores por período de rotação solar (em média, 27 dias), dentro dos quais o campo magnético interplanetário está apontando em direção ao Sol (-) ou em direção contrária ao Sol (+). Na data em que a Terra atravessa uma “fronteira de setor” temos um evento MSB.

Uma lista de eventos MSB pode ser obtida na Internet no banco de dados da Universidade de Stanford (EUA): <http://quake.stanford.edu/~wso/SB/SB.html>. Estão disponíveis eventos MSB “bem definidos” de 1947 a 1993. Por “bem definido”, entende-se que são dados confiáveis e revisados, quando a mudança de polaridade foi clara e os intervalos de tempo, antes e depois da data do evento, foram de, no mínimo, 4 dias com um mesmo sinal de polaridade do IMF (Svalgaard, 1973) :

... + + + + : - - - - ... ou ... - - - - : + + + + ...

Como exemplo, ao final deste capítulo encontra-se a lista de eventos MSB que ocorreram durante a época de chuvas de Pelotas (agosto, setembro e outubro). Seleccionamos apenas os eventos que tiveram um intervalo de 10 ou mais dias com um mesmo sinal antes e depois da mudança de polaridade. Isto porque quatro ou cinco dias não é um intervalo de tempo suficiente para uma boa análise da variabilidade dos índices de chuvas. São necessários mais dias para que a tendência de chuvas no período fique evidente. Mesmo assim, foi possível seleccionar 95 eventos para Fortaleza e 79 eventos para Pelotas.

TABELA 1 : EVENTOS DE CURTO PRAZO DE RAIOS CÓSMICOS

EVENTO	EVENTO GLE	EVENTO FORBUSH
1	28 / 02 / 1942 ^{**}	08 / 01 / 1956 ^{**}
2	07 / 03 / 1942 [*]	08 / 11 / 1956
3	25 / 07 / 1946	21 / 01 / 1957 ^{**}
4	19 / 11 / 1949	10 / 03 / 1957 [*]
5	23 / 02 / 1956 ^{**}	15 / 04 / 1957 [*]
6	31 / 08 / 1956 ^{***}	05 / 08 / 1957 ^{***}
7	17 / 07 / 1959	29 / 08 / 1957 ^{***}
8	04 / 05 / 1960 [*]	23 / 10 / 1957 ^{***}
9	03 / 09 / 1960 ^{***}	23 / 11 / 1957
10	03 / 09 / 1960 ^{***}	26 / 03 / 1958 [*]
11	15 / 11 / 1960	13 / 02 / 1959 ^{**}
12	20 / 11 / 1960	12 / 05 / 1959 [*]
13	18 / 07 / 1961	11 / 07 / 1959
14	20 / 07 / 1961	15 / 07 / 1959
15	07 / 07 / 1966	17 / 07 / 1959
16	28 / 01 / 1967 ^{**}	30 / 03 / 1960 [*]
17	29 / 09 / 1968 ^{***}	30 / 04 / 1960 [*]
18	18 / 11 / 1968	16 / 11 / 1960
19	25 / 02 / 1969 ^{**}	12 / 07 / 1961
20	30 / 03 / 1969 [*]	22 / 09 / 1963 ^{***}
21	24 / 01 / 1971 ^{**}	30 / 08 / 1966 ^{***}
22	01 / 09 / 1971 ^{***}	26 / 05 / 1967 [*]
23	04 / 08 / 1972 ^{***}	28 / 10 / 1968 ^{***}
24	07 / 08 / 1972 ^{***}	04 / 08 / 1972 ^{***}
25	29 / 04 / 1973 [*]	31 / 10 / 1972 ^{***}
26	30 / 04 / 1976 [*]	30 / 03 / 1976 [*]
27	19 / 09 / 1977 ^{***}	14 / 02 / 1978 ^{**}
28	24 / 09 / 1977 ^{***}	06 / 03 / 1978 [*]
29	22 / 11 / 1977	30 / 04 / 1978 [*]
30	07 / 05 / 1978 [*]	29 / 05 / 1978 [*]
31	23 / 09 / 1978 ^{***}	13 / 07 / 1978
32	21 / 08 / 1979 ^{***}	26 / 08 / 1978 ^{***}
33	10 / 04 / 1981 [*]	07 / 07 / 1979
34	10 / 05 / 1981 [*]	18 / 08 / 1979 ^{***}
35	12 / 10 / 1981 ^{***}	06 / 06 / 1980
36	26 / 11 / 1982	30 / 11 / 1980

EVENTO	EVENTO GLE	EVENTO FORBUSH
37	07 / 12 / 1982 **	24 / 02 / 1981 **
38	16 / 02 / 1984 **	23 / 07 / 1981
39	25 / 07 / 1989	30 / 01 / 1982 **
40	16 / 08 / 1989 ***	06 / 06 / 1982
41	29 / 09 / 1989 ***	10 / 07 / 1982
42	19 / 10 / 1989 ***	05 / 09 / 1982 ***
43	22 / 10 / 1989 ***	18 / 09 / 1982 ***
44	24 / 10 / 1989 ***	24 / 11 / 1982
45	15 / 11 / 1989	04 / 02 / 1983 **
46	21 / 05 / 1990 *	06 / 02 / 1986 **
47	24 / 05 / 1990 *	12 / 03 / 1989 *
48	26 / 05 / 1990 *	04 / 09 / 1989 ***
49	28 / 05 / 1990 *	20 / 10 / 1989 ***
50	11 / 06 / 1991	28 / 11 / 1989
51	15 / 06 / 1991	07 / 04 / 1990 *
52	25 / 06 / 1992	24 / 03 / 1991 *
53	02 / 11 / 1992	28 / 05 / 1991 *
54	06 / 11 / 1997	11 / 06 / 1991
55	02 / 05 / 1998 *	30 / 06 / 1991
56	06 / 05 / 1998 *	27 / 10 / 1991 ***
57	—	25 / 02 / 1992 **

TABELA 2: EVENTOS MSB - PELOTAS

EVENTO	DATA DE EVENTO MSB	“CROSSING”
1	01 / 08 / 1947	+ / -
2	13 / 08 / 1947	- / +
3	28 / 08 / 1947	+ / -
4	10 / 09 / 1947	- / +
5	22 / 09 / 1947	+ / -
6	08 / 10 / 1947	- / +
7	22 / 10 / 1947	+ / -
8	07 / 08 / 1948	+ / -
9	24 / 09 / 1948	- / +
10	05 / 10 / 1948	+ / -
11	23 / 10 / 1948	- / +
12	08 / 10 / 1949	+ / -
13	18 / 10 / 1949	- / +
14	11 / 08 / 1951	+ / -
15	29 / 08 / 1951	- / +
16	09 / 09 / 1951	- / +
17	26 / 09 / 1951	+ / -
18	07 / 10 / 1951	- / +
19	11 / 09 / 1952	+ / -
20	22 / 10 / 1953	- / +
21	06 / 08 / 1956	+ / -
22	22 / 08 / 1956	- / +
23	07 / 09 / 1956	+ / -
24	18 / 09 / 1956	- / +
25	04 / 10 / 1956	+ / -
26	18 / 10 / 1956	- / +
27	12 / 08 / 1958	+ / -
28	23 / 08 / 1958	- / +
29	07 / 09 / 1958	+ / -
30	23 / 09 / 1958	- / +
31	05 / 10 / 1958	+ / -
32	21 / 10 / 1958	- / +
33	31 / 10 / 1958	+ / -
34	11 / 08 / 1959	+ / -
35	23 / 09 / 1959	- / +
36	16 / 09 / 1960	+ / -
37	28 / 09 / 1960	- / +

38	13 / 08 / 1962	+ / -
39	28 / 08 / 1962	- / +
40	10 / 09 / 1962	+ / -
41	26 / 09 / 1962	- / +
42	08 / 10 / 1962	+ / -
43	21 / 10 / 1962	- / +
44	19 / 09 / 1968	+ / -
45	07 / 10 / 1968	- / +
46	17 / 09 / 1969	+ / -
47	30 / 09 / 1969	- / +
48	16 / 10 / 1969	+ / -
49	01 / 08 / 1970	+ / -
50	16 / 08 / 1970	- / +
51	02 / 09 / 1970	+ / -
52	28 / 09 / 1970	+ / -
53	11 / 10 / 1970	- / +
54	09 / 08 / 1971	- / +
55	23 / 08 / 1971	+ / -
56	13 / 10 / 1971	+ / -
57	20 / 09 / 1973	- / +
58	03 / 08 / 1974	+ / -
59	19 / 08 / 1974	- / +
60	29 / 08 / 1974	+ / -
61	23 / 10 / 1974	+ / -
62	15 / 10 / 1975	+ / -
63	29 / 10 / 1975	- / +
64	27 / 09 / 1977	+ / -
65	11 / 10 / 1977	- / +
66	25 / 10 / 1977	+ / -
67	15 / 08 / 1982	+ / -
68	04 / 10 / 1988	- / +
69	14 / 10 / 1988	+ / -
70	30 / 10 / 1988	- / +
71	19 / 09 / 1989	- / +
72	03 / 10 / 1989	+ / -
73	15 / 10 / 1989	- / +
74	29 / 10 / 1989	+ / -
75	10 / 09 / 1991	+ / -
76	24 / 09 / 1991	- / +
77	04 / 10 / 1991	+ / -
78	21 / 10 / 1991	- / +
79	25 / 08 / 1992	- / +

Apresentação dos Resultados

das Análises Estatísticas

Nos capítulos seguintes farei a apresentação dos resultados obtidos em minha tese de mestrado. No capítulo 3, são obtidos os espectros finos das séries de chuvas de Fortaleza, Campinas e Pelotas e também da série de manchas solares. No capítulo 4, verificamos se existem modulações de longo prazo entre as séries de chuvas e a série de ciclos solares magnéticos. Também é considerada a hipótese de haver correlações de longo prazo entre as séries de chuvas e o mecanismo de interação oceano-atmosfera em regiões de baixas latitudes do hemisfério sul. Por último, no capítulo 5, observamos se existem correlações de curto prazo (diárias) entre eventos de origem solar, galáctica e magnetosférica com os níveis de chuvas das três estações meteorológicas. Para tanto, são considerados os bancos de dados de eventos GLE, MSB e Forbush. No capítulo 6 são feitas as conclusões bem como sugestões para novas linhas de pesquisa. O estudo destes tópicos ajudou nosso grupo de pesquisa a entender melhor os mecanismos de interação Sol-Terra.

Capítulo 3

A Análise Espectral

Neste capítulo descrevemos os procedimentos utilizados na análise espectral das séries de chuvas e de manchas solares. Inicialmente faz-se a análise espectral das séries de dados originais e alisadas por um filtro de médias móveis simples de 11 anos. Para uma primeira análise, o filtro de 11 anos é a escolha natural, uma aproximação com o objetivo de diminuir as amplitudes dos vários picos que aparecem ao redor do período de 11 anos. A ordem do filtro certamente é arbitrária e outras variações podem ser examinadas. Para que não haja muitas dificuldades em interpretar coeficientes de correlação com deslocamentos de tempo entre duas séries, é conveniente aplicar um filtro de mesma ordem às série de chuvas e de ciclos solares magnéticos.

Utilizei o software MESA descrito no capítulo 2 para obter os espectros finos das séries. O software MESA utiliza o método da máxima entropia (MEM), para estimar as periodicidades, e de regressão múltipla (MRA), para estimar as respectivas amplitudes e desvios padrões associados.

3.1 A Série de Ciclos Solares Magnéticos

Para uma fácil visualização dos ciclos solares magnéticos (ciclos de Hale) na série de manchas solares, o procedimento convencional é multiplicar os valores de todos os ciclos ímpares por (-1). Se, ao contrário, multiplicamos os valores de todos os ciclos pares por (-1), a fase da correlação será obviamente invertida. Isto significa que a fase de correlação da série de Hale é *convencional*, mas a mudança de fase de correlação a cada ~22 anos é uma característica *absoluta*. Veja a figura 3.1.1.

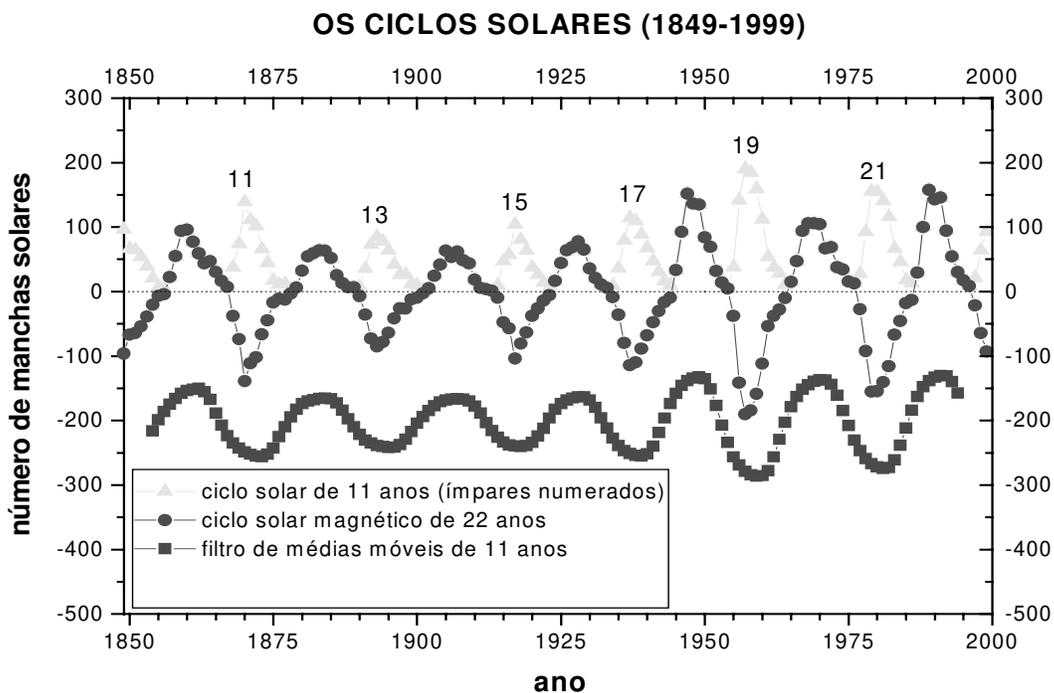


Figura 3.1.1 Os ciclos solares magnéticos.

O ano de máxima atividade solar do primeiro ciclo solar de 11 anos é 1755. O ano de 2001 é o ano de máxima atividade solar do ciclo 23. Na figura 3.1.1, estão numerados os ciclos ímpares de números 11, 13, 15, 17, 19 e 21. Estes ciclos tiveram seus valores multiplicados por (-1) para que se pudesse obter a série de ciclos solares magnéticos.

A série anual de manchas solares disposta em ciclos solares magnéticos (1849-1999) é a curva verde da figura 3.1.1. Quando submetida ao MESA, revelou 7 períodos significantes ao nível de confiança de 95% em ordem decrescente de potência espectral: 21,6 (pico de maior amplitude); 18,2; 7,2; 6,7; 30,1; 12,7 e 7,9 anos.

O pico de 21,6 anos, característico de ciclo solar magnético, aparece como o pico proeminente da série. O pico de 18,2 anos, o segundo mais forte, aparece com uma amplitude de apenas 0,32 em relação à amplitude do pico de 21,6 anos. Nosso espectro também mostra picos de menor amplitude, mas com nível de significância próximo de 95%. São os picos de 6,3 e 5,8 anos. Alguns dos picos detectados podem não ter significado algum ou podem ser harmônicos altos das periodicidades fundamentais de 11 e 22 anos.

A série de manchas é conhecida por não ser estacionária e assim a estrutura fina do espectro de 11 (ou 22) anos provavelmente sofre pequena alteração ao longo do tempo. A fim de corroborar os resultados acima citados, obtive o espectro para o subintervalo 1893-1999, que cobre nossas séries de chuvas de Campinas e Pelotas. Os deslocamentos de frequências obtidos para a série de ciclos solares magnéticos desta análise foram insignificantes.

Quando um filtro de médias móveis de 11 anos é aplicado à série, o MESA também não detecta qualquer alteração significativa de periodicidades (veja a curva em vermelho da figura 3.1.1). Os períodos de maior amplitude detectados são: 21,6; 18,2 e 30,1 anos. Os picos de 7,2 e 6,7 anos também aparecem, mas com pequena amplitude. O uso do filtro de 11 anos para a série do ciclo solar magnético não tem portanto qualquer efeito para as periodicidades da série, mas “alisa” as amplitudes vizinhas ao pico de 21,6 anos. Veja na figura 3.1.2 os resultados da análise espectral para a série de ciclos solares magnéticos.

A aplicação de um filtro de médias móveis de 11 anos permite “enxugar” o espectro, atenuando as amplitudes dos picos na faixa em torno de 11 anos (e que não são úteis para nós). O período detectado em torno de 22 anos é o maior pico e somente ele interessa a nós. Portanto, a aplicação do filtro é um artifício estatístico para atenuar as

amplitudes dos picos adjacentes. Isto pode ser facilmente visualizado na figura 3.1.2. Enquanto a série original apresenta o pico de 21,6 anos acompanhado de vários picos com amplitudes significativas, a série alisada apresenta um espectro mais bem definido, onde o pico de 21,6 anos aparece com uma amplitude maior em relação aos outros picos detectados. Argumentos análogos são válidos para as séries de chuvas.

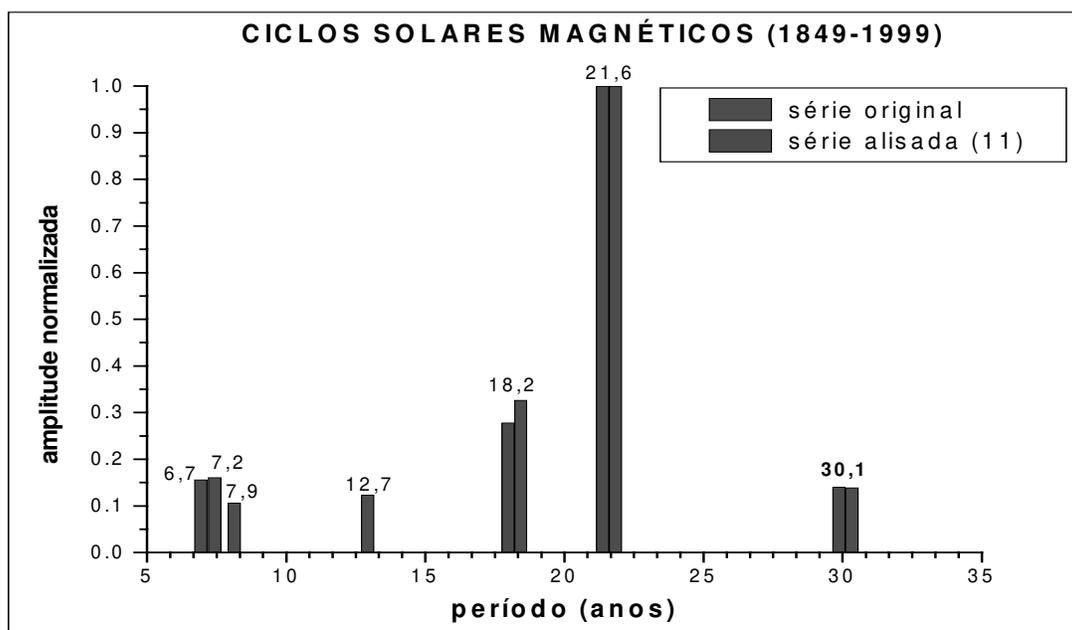


Figura 3.1.2 Espectro de Burg para a série anual de ciclos solares magnéticos. Somente frequências significativas a um nível de 95% foram consideradas neste gráfico. O desvio padrão encontrado para as amplitudes da série original e da série alisada foi de 0,02, em valores normalizados.

3.2 As Séries de Chuvas

Na figura 3.2.1, podemos comparar a série original e a alisada por um filtro de médias móveis simples de 11 anos das chuvas em Fortaleza de 1849 a 1999.

Para a série original, os períodos de maior amplitude detectados pelo MESA são (em ordem decrescente): 12,9 e 24,7 anos, significantes ao nível de 99,9%. Os picos $T = 10,2$ (que não pode ser o de 11 anos); 9,0; 5,7 e 3,6 anos são significantes ao nível de 95%. O pico mais alto detectado foi de $T = 62,9$ anos, significativo ao nível de 99,9%.

Para altas frequências (baixos T), são vistos muitos picos nas bandas 2,0-2,9 anos (QBO); 3,0-3,9 anos (QTO) e alguns nas bandas 4,0-4,9 anos e 5,0-5,9 anos (o pico 5,7 anos é o de maior amplitude). Pode ser uma coincidência, mas os picos $T = 10,2$ e 12,9 anos (o de maior amplitude) desta série são próximos dos picos $T = 9,8$ e 12,5 anos encontrados por muitos pesquisadores que estudaram o espectro do ciclo solar de 11 anos (veja por exemplo: Kane, 1985, que encontrou o tripleto 9,8; 10,7 e 12,5 anos). Verifique que a diferença entre os pares de períodos é até a mesma !

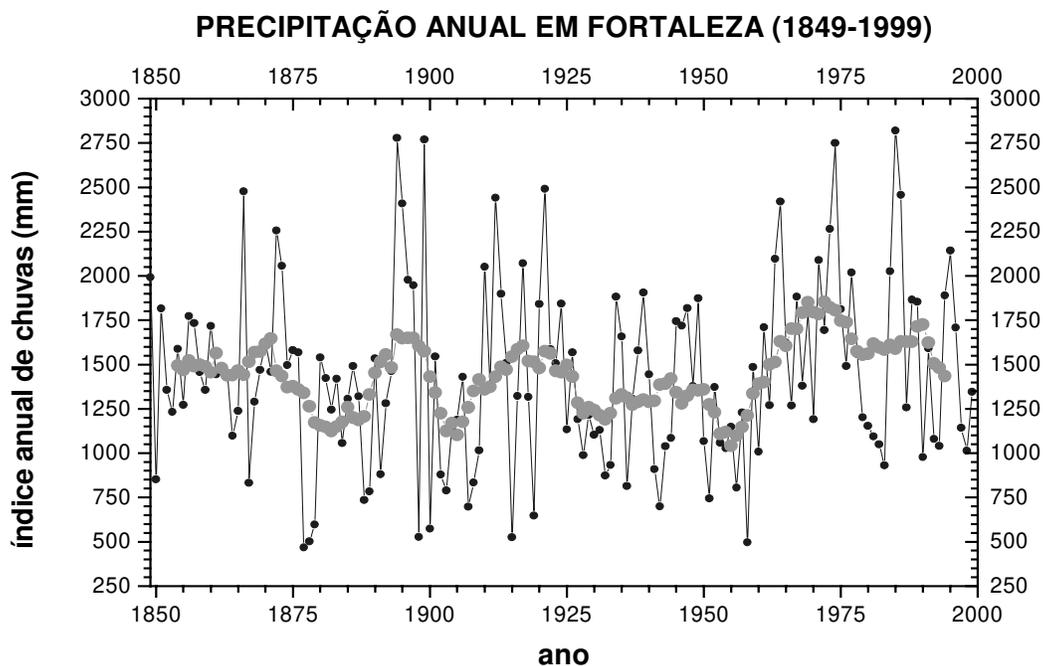


Figura 3.2.1 A série anual original e alisada (11) de chuvas em Fortaleza (1849-1999)

Para a série alisada por um filtro de médias móveis de 11 anos, os picos com nível de significância de 95% são, em ordem decrescente: 24,7; 75,6 (estes dois significantes ao nível de 99,9%); 13; 47,4 e 17,4 anos. Os picos das bandas QBO e QTO aparecem agora

com amplitudes muito menores. Também não foi detectado nenhum pico em torno de 11 anos (o mais próximo foi 10,3 anos, de pequena amplitude). É interessante notar que o pico 24,7 anos permaneceu inalterado com o filtro. Embora o pico de 13 anos não tenha sido removido (era 12,9 anos antes do filtro), já não é o período de maior amplitude da nova série. Assim, o filtro de 11 anos permitiu obter um espectro mais bem definido em torno do período de 24,7 anos, diminuindo a amplitude dos picos que apareceram antes da aplicação do filtro. A figura 3.2.2 mostra os resultados da análise espectral para ambas as séries de Fortaleza.

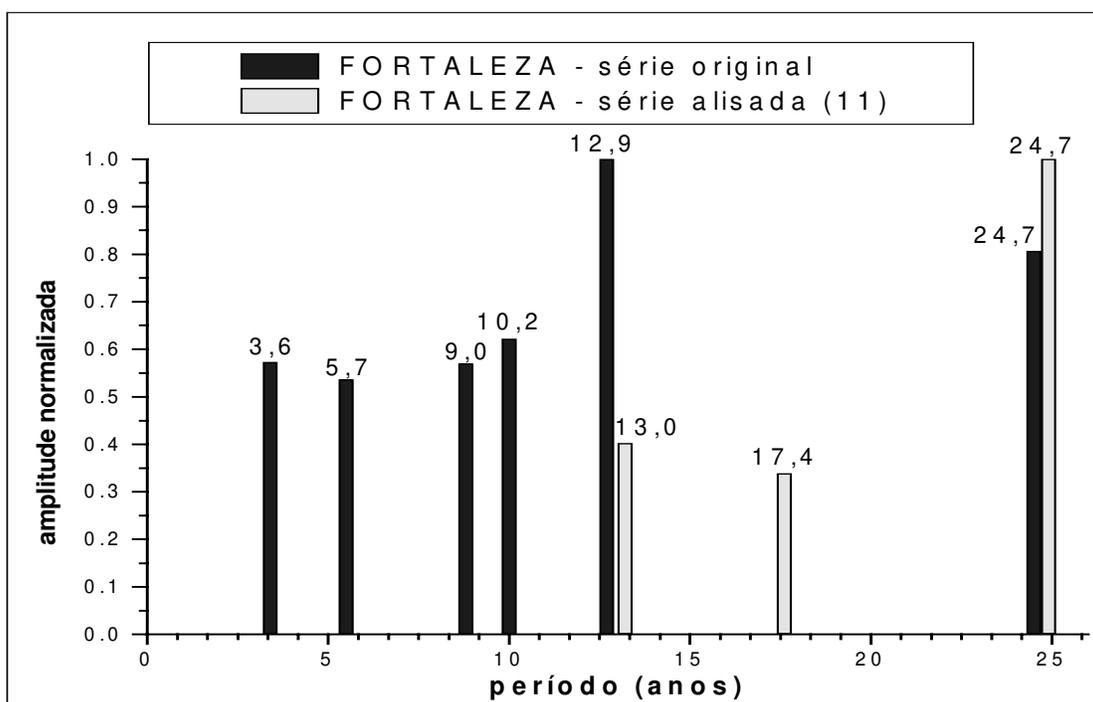


Figura 3.2.2 Espectro de Burg para a série anual chuvas de Fortaleza: original e alisada por um filtro de médias móveis de 11 anos. Somente as frequências significantes ao nível de 99% estão representadas. O desvio padrão associado a cada amplitude normalizada para a série original é de 0,14 e para a série alisada é de 0,12.

Na figura 3.2.3, podemos comparar a série original e a alisada por um filtro de médias móveis simples de 11 anos das chuvas em Campinas de 1890 a 1999. Para a série original, o pico $T = 5,0$ anos é o de maior amplitude, significativa ao nível de 99,9%. Mas

vários picos na região QBO ($T = 2,1$ anos) e na região QTO ($T = 3,1$ e $3,6$ anos) estão presentes. Embora de grande importância para estudos meteorológicos, os picos das regiões QBO e QTO não fazem parte de nosso estudo. Foi detectado um pico na banda de 11 anos, mas com uma amplitude muito pequena em relação aos demais. Também não foi detectado nenhum pico na banda em torno de 22 anos.

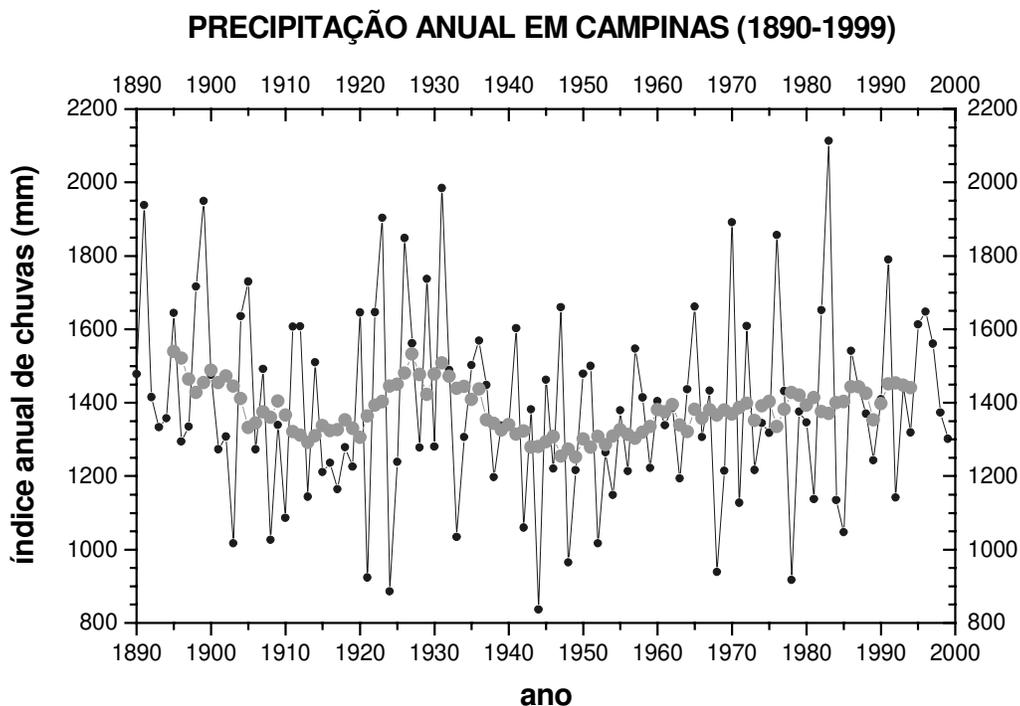


Figura 3.2.3 A série anual original e alisada (11) de chuvas em Campinas (1890-1999)

Após passar o filtro de médias móveis de 11 anos, a nova série não exibe mais um pico de 5 anos. Os novos períodos registrados são: 30,5 e 42,3 anos, significantes ao nível de 95%. Os picos da região QBO e QTO também aparecem com amplitudes diminuídas. Foi detectado um pico de amplitude 11,6 anos, mas de amplitude muito pequena para comprovar sua autenticidade. Também não foi detectado nenhum pico entre 18 e 30 anos. A figura 3.2.4 mostra os resultados da análise espectral para ambas as séries inteiras de Campinas.

Ao dividirmos a série alisada de Campinas em duas, uma de 1895 a 1949 e outra de 1950 a 1994, encontramos espectros bem distintos. Para a primeira metade do século XX, o

MESA detectou ciclos bem definidos com períodos de 31,9 anos significantes ao nível de 99,9%. Mas a partir de aproximadamente 1950, a série de chuvas de Campinas deixa de exibir ciclos e torna-se, com boa aproximação, uma reta ascendente. No intervalo de 1950 a 1994, o MESA detectou apenas um período significativo, $T = 6,3$ anos. Nenhum outro período foi detectado deste. Estudaremos com mais detalhes esta e outras séries do interior paulista no capítulo seguinte e veremos que todas as séries estudadas possuem comportamento semelhante após 1950.

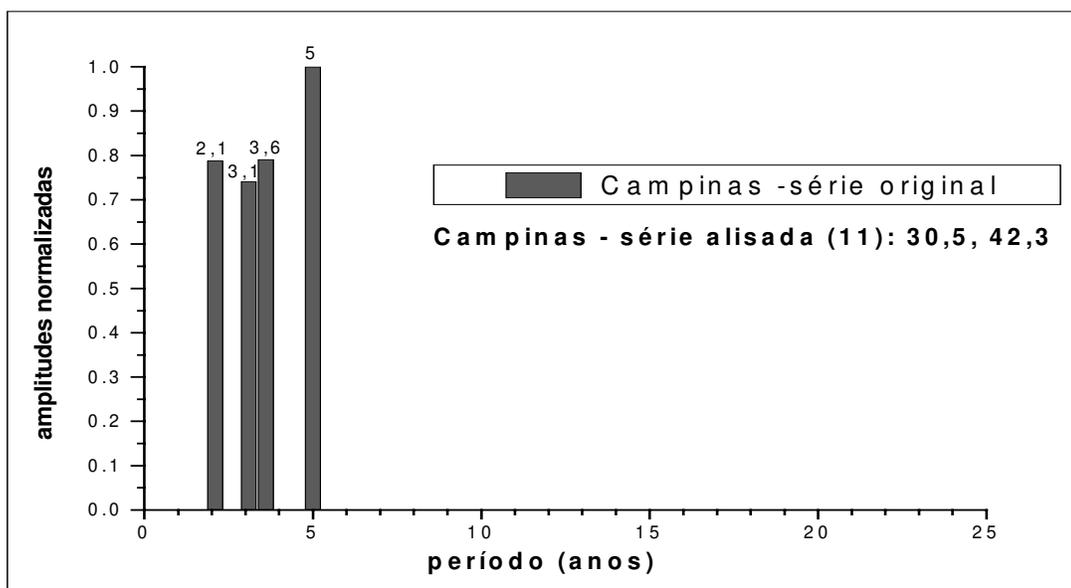


Figura 3.2.4 Espectro de Burg para a série anual de chuvas de Campinas: original e alisada por um filtro de médias móveis de 11 anos. Apenas as frequências significantes ao nível de 95% estão representadas. Para a série filtrada, somente os picos $T = 30,5$ e $42,3$ anos foram detectados pelo MESA e não estão representados nesta figura. O desvio padrão associado a cada amplitude normalizada para a série original é de 0,24 e para a série alisada é de 0,12.

Na figura 3.2.5, podemos comparar a série original e a alisada por um filtro de médias móveis simples de 11 anos das chuvas em Pelotas de 1893 a 1999. Para a série original, os picos detectados que são significantes ao nível de 95% são, em ordem decrescente: 3,5 (QTO); 23,4; 5,2; 2,2 e 2,0 (QBO); 12,0; 4,3; 9,0; 6,4; 2,9; 2,1; 2,3 e 2,4

(QBO) anos. Para nós, os picos mais importantes são os de 23,4; 12 e 9 anos, exatamente por serem próximos de períodos de ciclos solares.

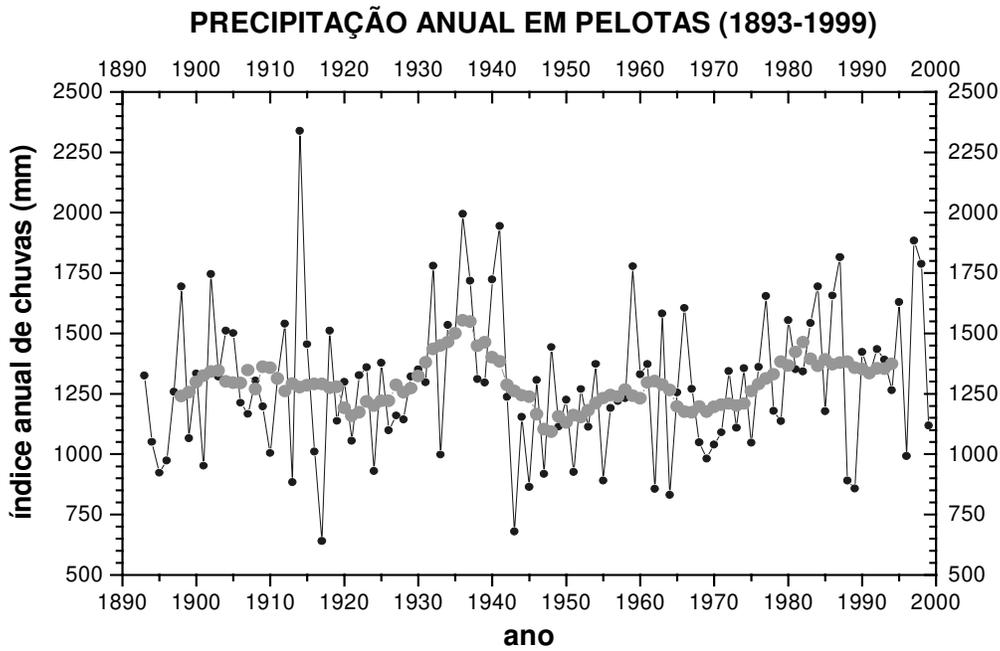


Figura 3.2.5 A série anual original e alisada (11) de chuvas em Pelotas (1893-1999)

Sob um filtro de médias móveis de 11 anos, os maiores picos em ordem decrescente foram: 23,6 e 43,3 anos (ambos significantes ao nível de 99,9%). Novamente os picos da região QBO e QTO, antes os mais fortes, agora aparecem com amplitudes muito menores. A periodicidade de 23,6 anos está agora evidente. A figura 3.2.6 mostra os resultados da análise espectral para ambas as séries de Pelotas.

A semelhança entre os espectros finos da série de manchas solares disposta em ciclos solares magnéticos (em torno de 22 anos) e das séries de chuvas de Fortaleza e Pelotas, parece ser um indicativo da existência de uma forte relação entre a variabilidade solar e a frequência e intensidade de chuvas em regiões de baixas latitudes. Parece existir uma forte correlação entre as séries de manchas solares e de chuvas, pelo menos para algum intervalo de tempo.

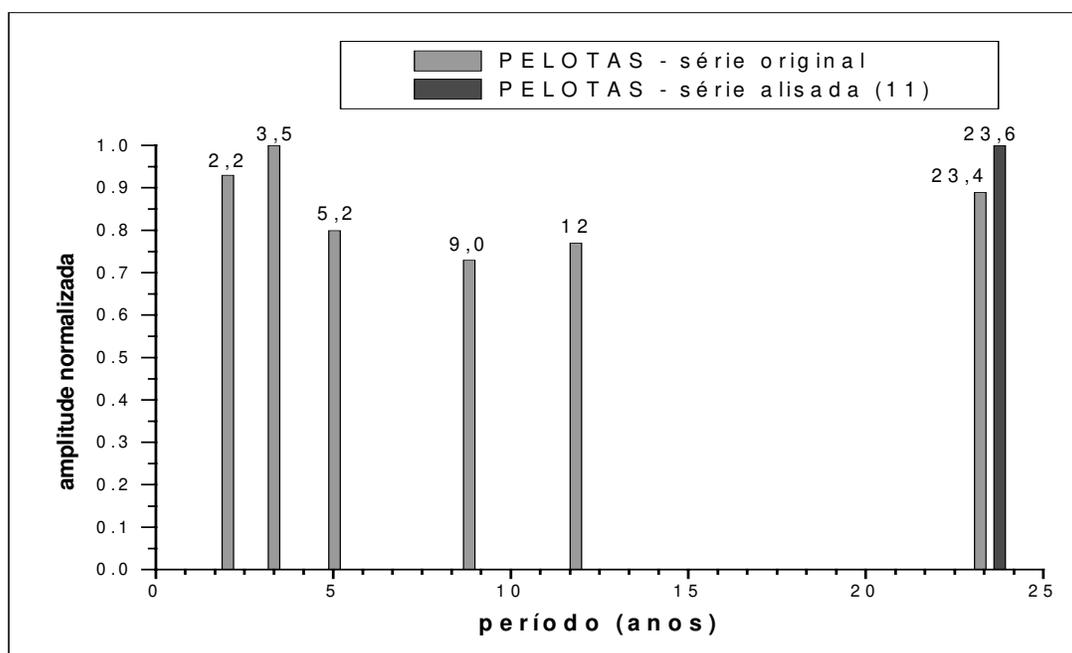


Figura 3.2.6 Espectro de Burg para a série anual de chuvas de Pelotas: original e alisada por um filtro de médias móveis de 11 anos. Apenas as frequências significantes ao nível de 99% estão representadas. Para a série alisada, o pico $T = 43,3$ anos não está representado nesta figura. O desvio padrão associado a cada amplitude normalizada para a série original é de 0,27 e para a série alisada é de 0,11.

Pelo fato da série de Campinas não exibir ciclos com períodos entre 20 e 25 anos, uma outra possibilidade a ser examinada é a de que os espectros das séries de chuvas sejam resultado da ação de um mecanismo de interação entre oceanos e atmosfera no hemisfério sul (Hurrell, 1995). Este mecanismo ainda vem sendo estudado e talvez seja um dos responsáveis pelas periodicidades em torno de 24 anos encontradas em parâmetros meteorológicos do hemisfério norte (tais como pressão atmosférica e temperatura). Não há estudos conclusivos sobre este tema. Acredita-se que os mecanismos Sol-Terra e oceano-atmosfera podem atuar de forma independente ou conjuntamente. No capítulo seguinte faremos um estudo mais detalhado destas duas interpretações.

Capítulo 4

Fases de Correlação

Tendo em vista que as séries de chuvas de Fortaleza e Pelotas exibem ciclos com periodicidades entre 20 e 25 anos, façamos uma inspeção de correlação entre cada uma das curvas pluviométricas com a curva de ciclos solares magnéticos. O objetivo é verificar se há alguma fase de (anti)correlação bem definida em algum intervalo de tempo e, se há, quais características do ciclo solar, ou do meio ambiente terrestre, estariam relacionadas à variabilidade dos índices de chuvas.

O cálculo do coeficiente de correlação entre duas curvas foi descrito no capítulo 2 (ver programa *cross-correlation* no apêndice da tese) e será usado para todas as séries que estudaremos.

4.1 Fases de Correlação com Ciclos Solares Magnéticos

A análise espectral do capítulo anterior revelou que a série anual de chuvas de Fortaleza, alisada por um filtro de médias móveis de 11 anos, exibe uma periodicidade a cada aproximadamente duas décadas. Esta periodicidade é observada durante um período em que ocorreram 7 ciclos solares magnéticos (1854-1994). A série de Fortaleza apresenta grande variabilidade de amplitudes entre os máximos e mínimos de um ciclo, e entre os máximos dos ciclos também. Veja a figura 4.1.1. Por exemplo, de 1955 a 1972 (respectivamente o mínimo e o máximo de um ciclo), a amplitude variou $\sim 72\%$.

O coeficiente de correlação entre os 151 anos da série de chuvas de Fortaleza com a série de ciclos solares magnéticos é de apenas $-15,32\% \pm 8\%$ em amplitude normalizadas, com um nível de confiança de 95%. Portanto, ambas as séries não exibem um bom coeficiente de correlação para todo o intervalo de dados que dispomos, mas é possível distinguir períodos, ou fases, deste intervalo, em que a (anti)correlação entre ambas as séries é muito superior.

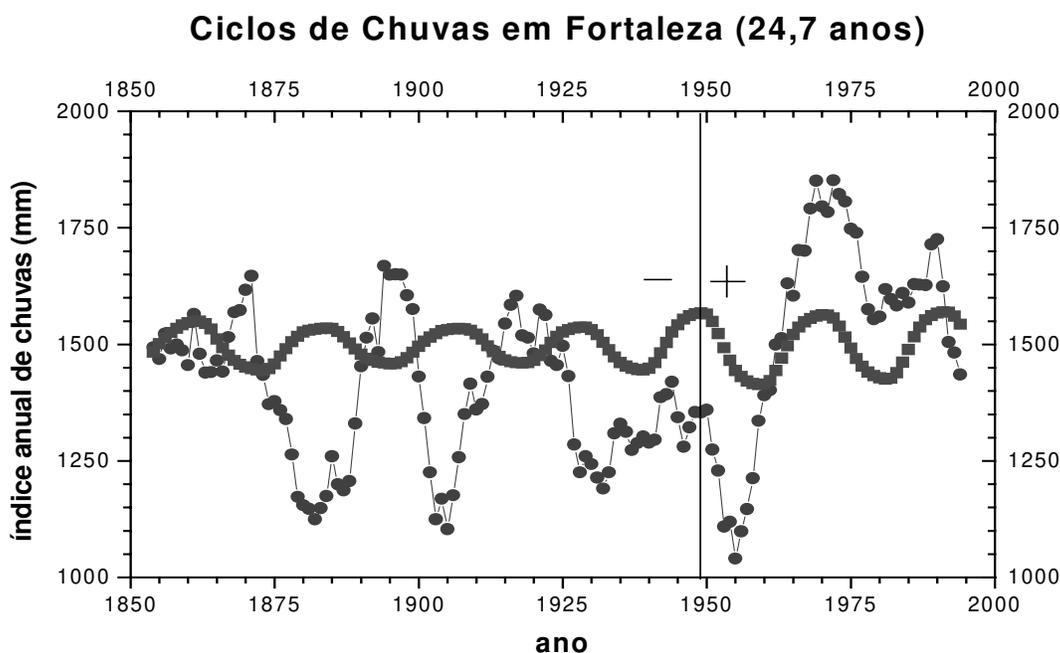


Figura 4.1.1 Fases de (anti)correlação entre as séries anuais de chuvas em Fortaleza e de ciclos solares magnéticos (1854-1994).

Na figura 4.1.1, observa-se uma fase de anticorrelação de 1854 até ~1949 e uma de correlação de 1949 até 1994 entre estas duas séries. A linha vertical nesta figura atravessa o ano de 1949, ano de máxima atividade do ciclo solar 18 e próximo do período em que ocorreu mudança de fase de correlação. Também na figura, “-” e “+” são, respectivamente, os sinais das polaridades do campo magnético solar durante os 11 anos antes e os 11 anos depois de 1949. O coeficiente de correlação para o período de 1854-1949 (96 anos) é de $-60\% \pm 6,5\%$ e para o período de 1950-1994 (45 anos) é de $80\% \pm 5,4\%$ para as amplitudes normalizadas dos ciclos. O valor destes coeficientes é considerado muito elevado para dados de parâmetros meteorológicos e geofísicos. Obtivemos um nível de confiança de 99,9% para estes coeficientes de correlação.

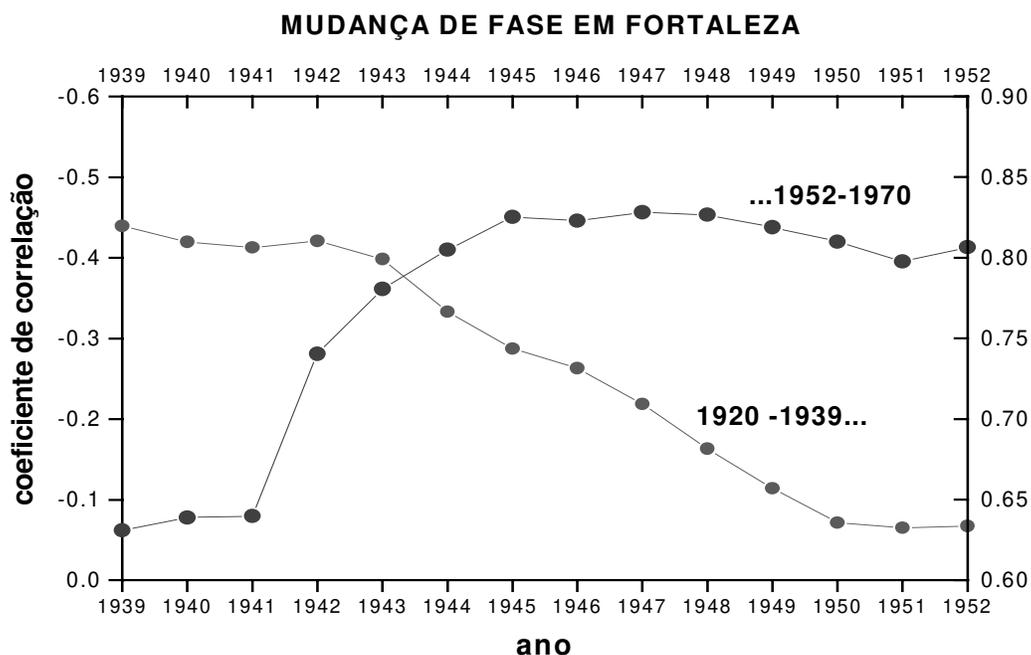


Figura 4.1.2 Variação do coeficiente de correlação para dois pares de subséries de manchas solares e de índices de chuvas em Fortaleza com fases de correlação opostas durante o período 1939-1952.

O período em que a fase de correlação é negativa (1854-1949) abrange 5 ciclos solares magnéticos. A mudança de fase pode ser revelada através do cálculo do coeficiente

de correlação entre as séries de chuvas e de manchas solares de 1854 até alguns anos antes de 1949: o coeficiente para o período de 1854-1940 é de $-77,2\% \pm 4,4\%$, ou seja, em apenas 9 anos (1940-1949), o coeficiente desceu de 77,2% para 60% em valores absolutos !

Para que tenhamos uma estimativa quantitativa mais precisa da variação do coeficiente de correlação durante o período de mudança de fase, selecionamos um par de subséries anuais de manchas solares e de chuvas com ano inicial arbitrariamente fixado em 1920 e ano final variando entre 1939 e 1952. O mesmo foi feito para um par de subséries com ano inicial arbitrariamente fixado em 1970 e ano final variando, retroativamente, entre 1952 e 1939. As séries de cada uma das fases de correlação, positiva e negativa, possuem aproximadamente o mesmo comprimento e incluem apenas os anos próximos ao período em que ocorreu a mudança de fase.

A figura 4.1.2 exhibe claramente que a mudança de fase de correlação em Fortaleza não foi abrupta, ou seja, não ocorreu exatamente em 1949. A maior variação do coeficiente de correlação ocorreu durante os anos entre os máximos dos ciclos solares 17 e 18 (1939-1949), ou seja, durante a fase ascendente de um ciclo solar magnético, quando a polaridade do campo magnético solar foi negativa. Uma mudança de fase ocorreu durante os anos de 1942-1943-1944. A partir de 1949, durante a fase descendente do ciclo solar magnético, a polaridade do campo tornou-se positiva.

A série anual de chuvas em Pelotas, alisada por um filtro de médias móveis de 11 anos, também exhibe uma periodicidade a cada aproximadamente duas décadas. Esta periodicidade é observada durante todo o intervalo de 1898-1994 (veja a figura 3.2.6), quando ocorreram 5 ciclos solares magnéticos. Assim como em Fortaleza, observa-se uma grande variação de amplitude do nível de chuvas: o nível de chuvas no ano de 1936 foi 42% maior que no ano de 1921 (1936 e 1921 são respectivamente os anos de máxima e mínima amplitude de um dos ciclos de chuvas). Porém, novamente como em Fortaleza, é interessante notar que os níveis mínimos de chuvas observados ao longo do século 20 praticamente não sofreram variação, somente entre 1100 e 1180 mm/ano, ou seja, uma variação em torno de 8% apenas.

A grande variabilidade de amplitudes e a presença de ciclos bem definidos são características marcantes das séries de Fortaleza e Pelotas e indicativas da existência de um mecanismo físico governante. Esperamos que estes resultados ajudem a melhorar os

modelos meteorológicos de previsão de chuvas existentes. A previsão de períodos de inundações e de secas pode evitar prejuízos para a economia e para a população destas regiões.

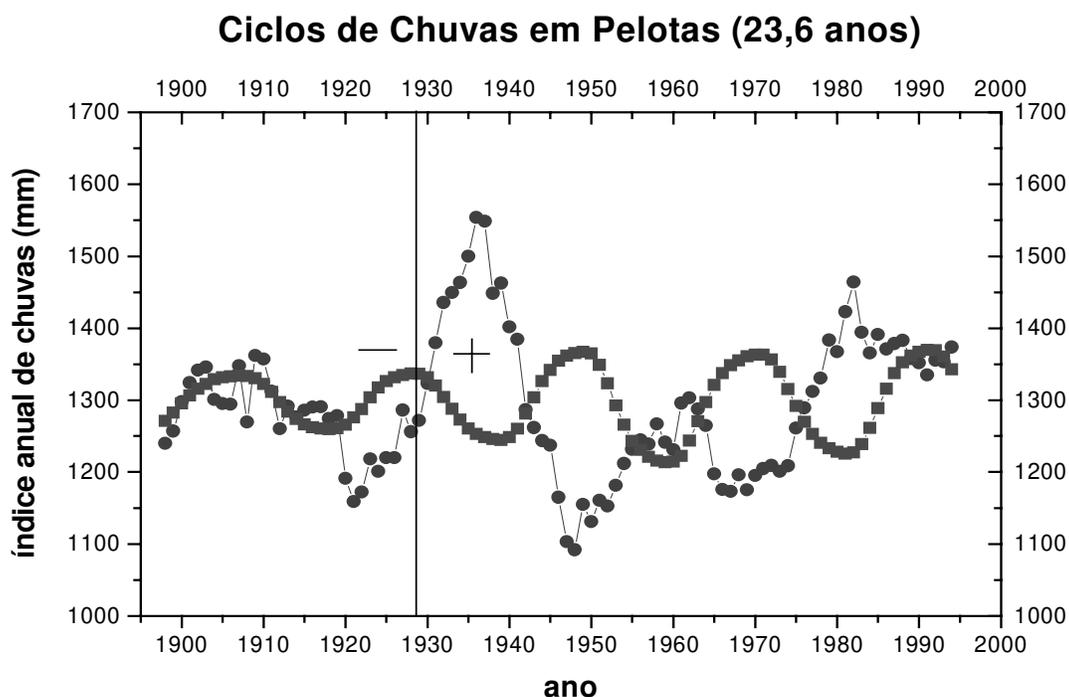


Figura 4.1.3 Fases de (anti)correlação entre as séries anuais de chuvas em Pelotas e de ciclos solares magnéticos (1898-1994).

Na figura 4.1.3, observa-se uma fase de anticorrelação de ~1929 até 1994 e uma de correlação de 1898 até ~1928 entre a série de chuvas de Pelotas e a série de ciclos solares magnéticos. Nesta figura, a linha vertical atravessa o ano de 1928, ano de máxima atividade do ciclo solar 16 e próximo do período em que ocorreu mudança de fase. Também, os sinais “-” e “+” são, respectivamente, os sinais das polaridades do campo magnético solar durante os 11 anos antes e os 11 anos depois de 1928. Assim como em Fortaleza, obtemos coeficientes de correlação muito elevados para parâmetros meteorológicos e geofísicos. O coeficiente de correlação para o período 1929-1994 (66 anos) é de $-84\% \pm 4,0\%$ e para o período 1898-1928 é de $60\% \pm 13\%$ para as

amplitudes normalizadas dos ciclos. Obtivemos um nível de confiança de 99,9 % para todos estes coeficientes.

Portanto, também em Pelotas, foi possível observar fases do intervalo total de 97 anos da série alisada, em que a correlação com a série de ciclos solares magnéticos é muito alta. O coeficiente para a série inteira é de $-50,62\% \pm 7,5\%$ em amplitudes normalizadas. É um valor muito superior ao encontrado para a série inteira de Fortaleza porque, com os dados que dispomos de Pelotas, conseguimos visualizar apenas 31 anos da fase de correlação positiva (1898-1928).

Em Pelotas, o período em que a fase de correlação é negativa (1929-1994) abrange 3 ciclos solares magnéticos. Como em Fortaleza, a mudança de fase em Pelotas pode ser revelada através do estudo da variação do coeficiente de correlação durante alguns anos próximos de 1928. Selecionamos um par de subséries anuais de manchas solares e de índices de chuvas com o ano inicial de 1898 e o ano final variando entre 1939 e 1952. O mesmo foi feito para o par de subséries com ano inicial arbitrariamente fixado em 1950 e o ano final variando, retroativamente, entre 1932 e 1918. As séries de cada uma das fases de correlação possuem aproximadamente o mesmo comprimento e incluem apenas os anos próximos ao período em que ocorreu a mudança de fase.

A figura 4.1.4 exhibe claramente que a mudança de fase de correlação em Pelotas também não foi abrupta, ou seja, não ocorreu exatamente em 1928. A maior variação do coeficiente de correlação ocorreu durante os anos entre os máximos dos ciclos solares 15 e 16 (1918-1928), ou seja, novamente, durante a fase ascendente de um ciclo solar magnético, quando a polaridade do campo magnético solar foi negativa. Uma mudança de fase ocorreu durante os anos de 1922-1923-1924. A partir de 1928, durante a fase descendente do ciclo solar magnético, a polaridade do campo magnético solar tornou-se positiva.

Uma análise similar para as séries anuais de manchas solares e de temperaturas de várias regiões tropicais e subtropicais da Terra também permitiu distinguir uma mudança de fase de correlação de negativa, entre 1813 e 1920, para positiva depois de 1920 (Troup, 1962). Estes e outros exemplos de fases de correlação incluindo parâmetros meteorológicos podem ser encontrados em muitas publicações (veja, por exemplo, um artigo *review* de King, 1975).

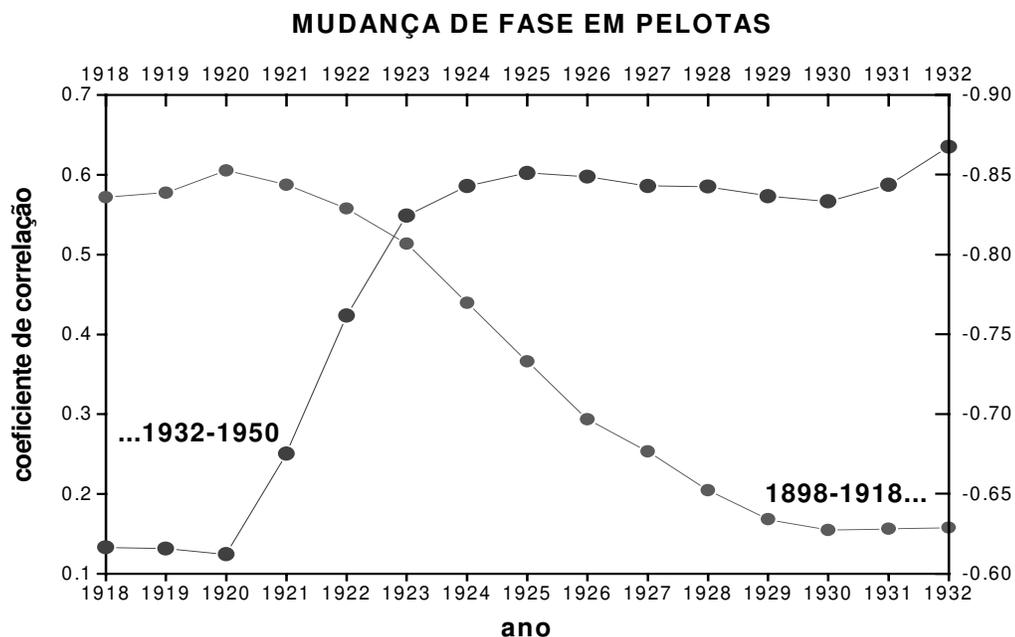


Figura 4.1.4 Variação do coeficiente de correlação para dois pares de subséries de manchas solares e de índices de chuvas em Pelotas com fases de correlação opostas durante o período 1918-1932.

É interessante notar que a mudança de fase em Fortaleza (latitude equatorial) ocorreu aproximadamente 22 anos (um ciclo solar magnético) após a mudança de fase em Pelotas (latitude subtropical). Uma mudança de fase de correlação similar também foi observada no hemisfério norte, a latitudes de 50°-60°, próxima ao ano de máxima atividade do ciclo solar 14 (1907), ou seja, 22 anos antes que em Pelotas! (King, 1975). *Será que a mudança de fase de correlação ocorre primeiro em regiões de latitudes altas ?*

A razão para a mudança da fase de correlação ainda é desconhecida. Acredita-se que os períodos em que ocorre mudança de fase estejam relacionados aos períodos de mínimos e máximos dos ciclos *seculares* da atividade solar. Observou-se, por exemplo, que a cada novo ciclo secular, um dos hemisférios do Sol torna-se mais ativo do que outro hemisfério. Quando o hemisfério norte do Sol é mais ativo, a correlação entre o ciclo de 11 anos e a temperatura do ar na superfície da Terra é positiva e, quando o mais ativo é o hemisfério sul, a correlação é negativa. Além disso, a (anti)correlação com a temperatura atinge o valor máximo no período de máximo do ciclo secular. Os mecanismo de interação

da atividade solar de cada hemisfério com o clima terrestre ainda são desconhecidos (veja, por exemplo, Georgieva e Kirov, 2000).

A aplicação de um filtro de médias móveis na faixa de 8-15 anos na série de chuvas de Campinas não produz uma série com uma periodicidade de aproximadamente duas décadas. A análise espectral do capítulo anterior, feita para uma série alisada por um filtro de 11 anos, não mostrou uma periodicidade pronunciada próxima a 20, 22 ou 24 anos. As variações de amplitudes da curva alisada também são pequenas quando comparadas com as outras séries de chuvas (apenas $\pm 10\%$) e esta pode ser a razão da não existência de um ciclo em torno de 22 anos. Outra possível razão é o fato de Campinas ser a única cidade das três que não está localizada no litoral. Veja a figura 4.1.5. Até ~1939 observa-se uma correlação de fase positiva entre a série de chuvas de Campinas e a série de ciclos solares magnéticos. Mas, o coeficiente de correlação é muito pequeno, apenas $27,3\% \pm 13,8\%$. A partir de 1939, o coeficiente torna-se ainda menor. Portanto, ao contrário de Fortaleza e Pelotas que exibiram fases de correlação bem definidas com a série de ciclos solares magnéticos, o mesmo não ocorre em Campinas.

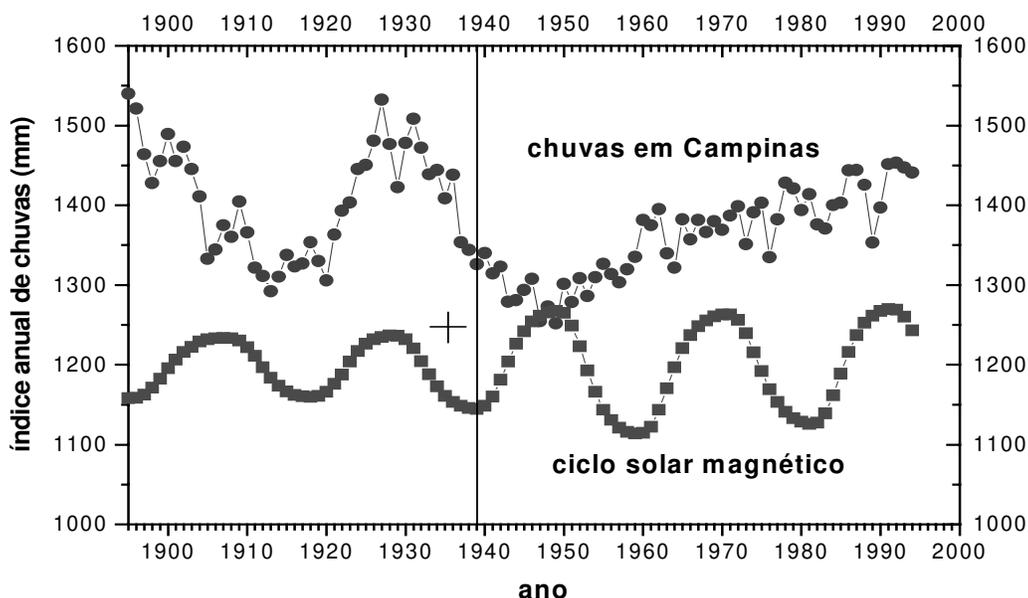


Figura 4.1.5 Fases de (anti)correlação entre as séries anuais de chuvas em Campinas e de ciclos solares magnéticos (1895-1994).

Mas algo mais diferencia esta série das anteriores. No capítulo anterior, o MESA detectou a presença de ciclos com períodos de 31,9 anos no intervalo de 1895 a 1949. Não foi detectado nenhum período entre 20 e 25 anos. Por esta razão, o coeficiente de correlação com a série de ciclos solares magnéticos é de apenas $27,3\% \pm 13,8\%$. A partir de ~1950, a série deixa de exibir ciclos e torna-se uma quase reta ascendente ! Na figura 4.1.6, foi possível obter uma boa aproximação linear para o conjunto de pontos a partir de 1950. Durante este período, o índice de chuvas anual de Campinas variou de 1251 mm em 1949 para 1441 mm em 1994, uma variação de aproximadamente 13%.

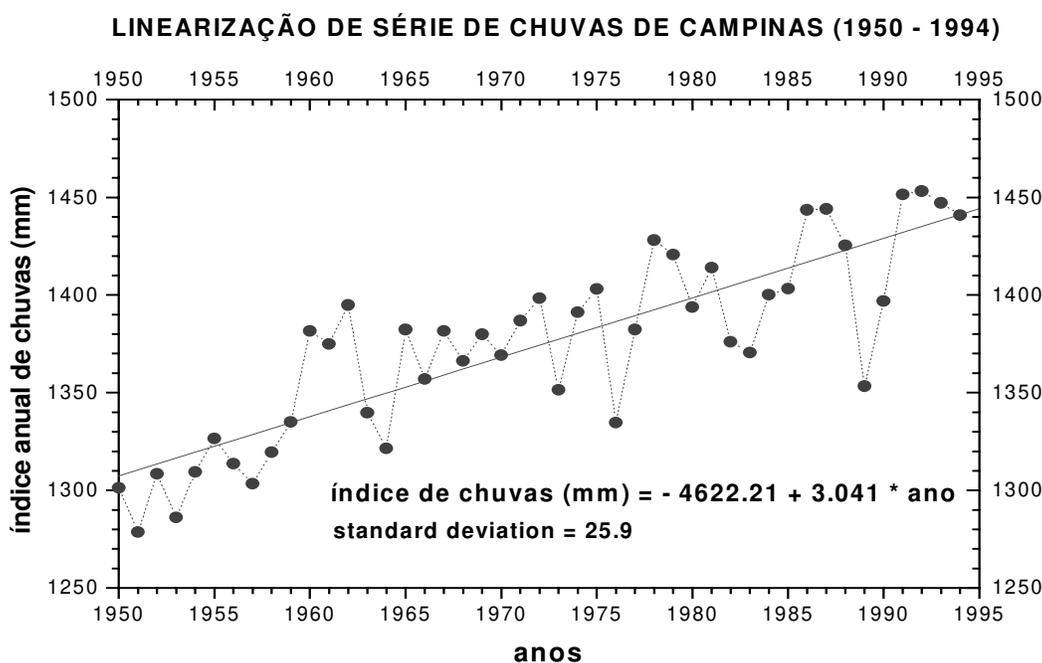


Figura 4.1.6 Regressão Linear para os índices de chuvas em Campinas entre 1950 e 1994.

A análise espectral do capítulo anterior não detectou ciclos bem definidos para a série alisada de Campinas após 1950. Mas esta é uma característica comum às séries de estações do interior paulista, em latitudes muito próximas às de Campinas. Uma das hipóteses é a de que este comportamento tenha sido influenciado pela emissão de gases poluentes. O período estudado corresponde ao de forte industrialização destas regiões.

Para o litoral paulista, estudamos as séries de Ubatuba ($23^{\circ} 25' S, 45^{\circ} 05' W$) e Caraguatatuba ($23^{\circ} 38' S, 45^{\circ} 26' W$). E, para o interior paulista, duas séries além de

Campinas: Bauru (22° 19' S, 49° 02' W) e Araçatuba (21° 12' S, 50° 27' W). As séries do litoral, ao contrário das séries do interior, apresentam ciclos bem definidos na segunda metade do século XX. Infelizmente, não existem dados de chuvas disponíveis antes de 1940 para nenhuma destas séries. Estes dados seriam úteis para verificarmos se estas séries apresentam comportamento semelhante à série de Campinas.

A análise espectral pelo MESA detecta os seguintes períodos (significantes ao nível de 95%) para as séries alisadas por um filtro de médias móveis de 11 anos: 22,2 anos para Ubatuba e 20,9 anos para Caraguatatuba. Ou seja, como em Pelotas e Fortaleza, estas séries também apresentam ciclos a cada aproximadamente duas décadas. Para Araçatuba e Bauru (interior), os períodos de maior amplitude detectados são de 8,0 anos para ambas as séries.

Nas figuras 4.1.7 e 4.1.8 são comparadas algumas séries de chuvas alisadas de estações do interior e do litoral paulista com a série de ciclos solares magnéticos. A diferença entre estes gráficos confirma a hipótese de que existem de fato diferenças, pelo menos a longo prazo, entre regiões do interior e do litoral com latitudes muito próximas.

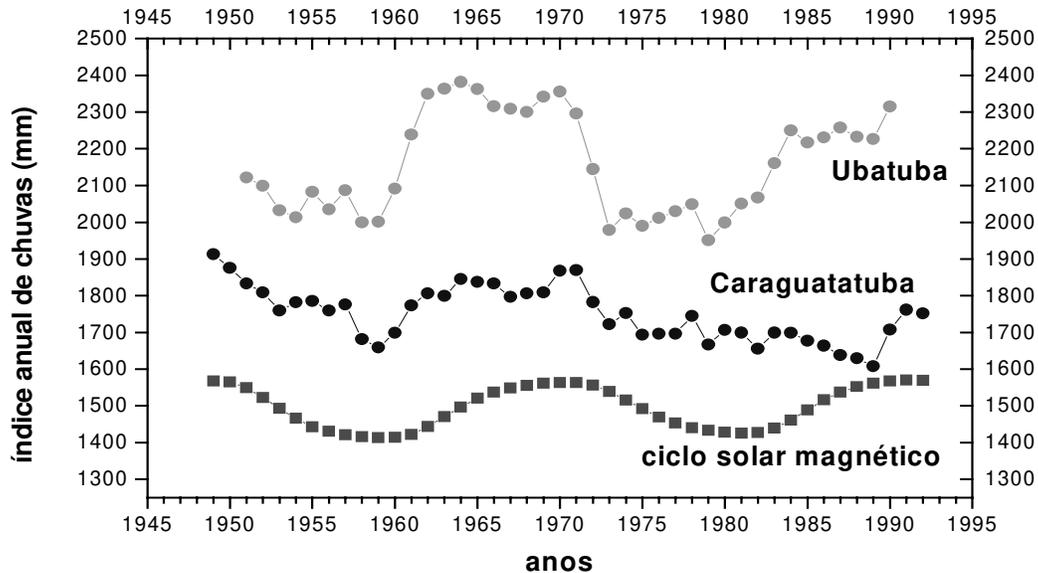


Figura 4.1.7 Fases de (anti)correlação entre as séries de chuvas do litoral paulista e a série de ciclos solares magnéticos.

O coeficiente de correlação entre as séries de Ubatuba (1951-1990) e Caraguatatuba (1949-1992) com a série de ciclos solares magnéticos no período correspondente é, respectivamente, de $53,5\% \pm 11,28\%$ e $37,3\% \pm 12,98\%$ em amplitudes normalizadas.

As séries do interior paulista apresentam comportamento semelhante à série de Campinas a partir de 1950 (O MESA detecta períodos de 6,3 anos para a série de Campinas, no intervalo 1950-1994). Apesar de apresentarem pequenas flutuações de amplitude, estas séries também podem ser bem aproximadas por retas. Obviamente, os coeficientes de correlação com a série de ciclos solares magnéticos foram muito pequenos e com grande desvio padrão em valor absoluto: $-16,1\% \pm 14\%$ para Bauru (1945-1992) e $2,8\% \pm 15,06\%$ para Araçatuba (1949-1992).

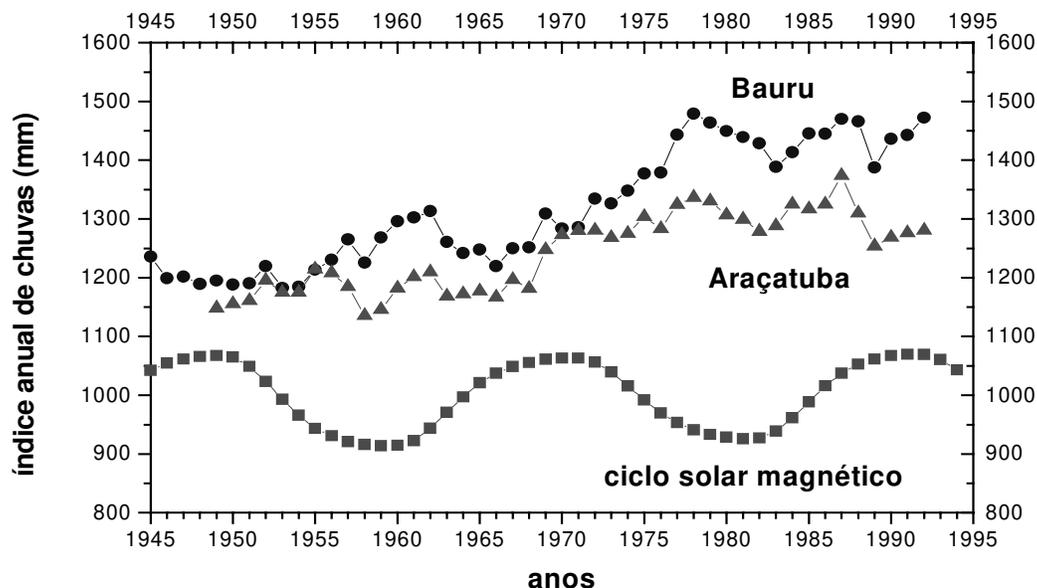


Figura 4.1.8 Fases de (anti)correlação entre as séries de chuvas do interior paulista e a série de ciclos solares magnéticos.

4.2 Fases de Correlação com o Mecanismo Oceano-Atmosfera

Obviamente, o fato de existirem coeficientes de correlação tão significativos entre as séries estudadas ainda não é suficiente para o estabelecimento de uma relação de

dependência das variações pluviométricas com a série de ciclos solares magnéticos. Mas os resultados apresentados acima, reforçam ainda mais a procura por um mecanismo conectando ambos os fenômenos.

Nesta seção consideraremos a hipótese de que as variações pluviométricas com periodicidades bem definidas entre 20 e 25 anos observadas no Brasil, possam ser causadas por algum mecanismo climático não relacionado diretamente à atividade solar. Como estes ciclos de chuvas são observados somente em regiões do litoral, um possível candidato é o mecanismo de interação oceano-atmosfera. Acredita-se que o mecanismo oceano-atmosfera seja responsável por uma periodicidade natural de $\sim 24 \pm 1$ anos para alguns parâmetros meteorológicos observados em regiões de latitudes subtropicais do hemisfério norte (Hurrell, 1995). Ainda não são conhecidos os efeitos e as periodicidades deste mecanismo em latitudes do hemisfério sul.

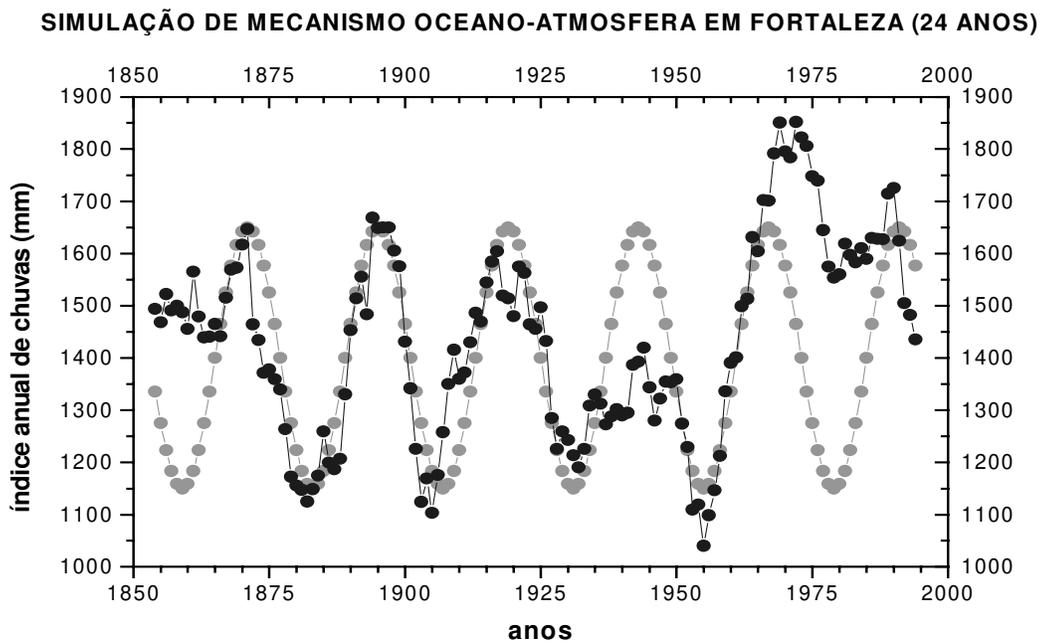


Figura 4.2.1 A série anual de chuvas de Fortaleza e uma curva senoidal normalizada com período de 24 anos, representativa do mecanismo de interação oceano-atmosfera.

Na figura 4.2.1, comparamos os dados da série alisada inteira de Fortaleza com uma curva senoidal normalizada com período de 24 anos e primeiro máximo fixado no ano de 1871 (ano de máximo do primeiro ciclo da série de chuvas, com índice anual de 1647 mm):

$$\text{índice de chuvas (mm)} = 1400 + 250 * \cos \left[\frac{2\pi(T - 1871)}{24} \right]$$

onde T varia de 1854 a 1994. O coeficiente de correlação entre estas curvas é de $52,56\% \pm 5,9\%$, com um nível de confiança de 99%.

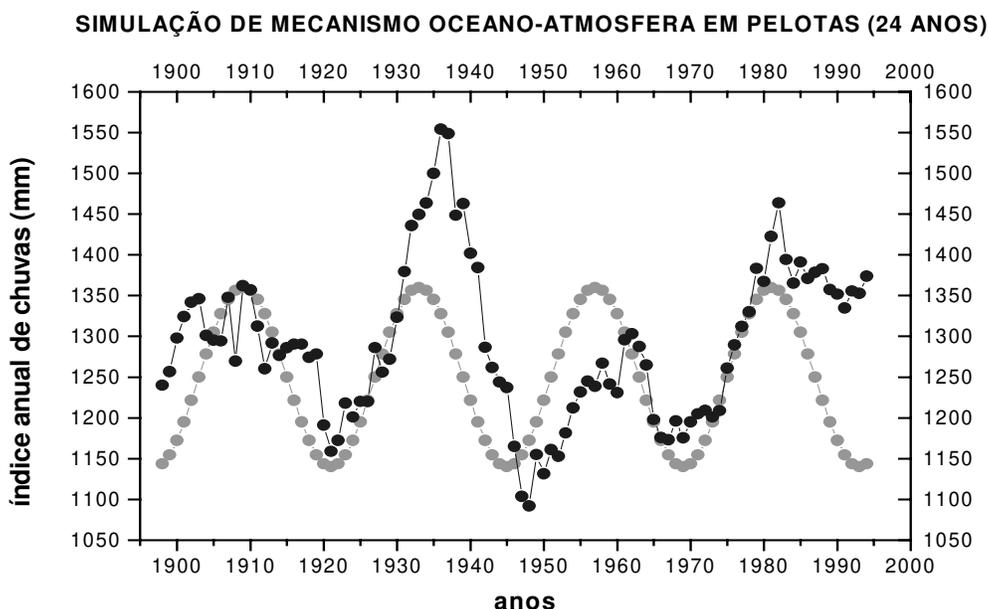


Figura 4.2.2 A série anual de chuvas de Pelotas e uma curva senoidal normalizada com período de 24 anos, representativa do mecanismo de interação oceano-atmosfera.

Na figura 4.2.2, fizemos o mesmo para a série alisada inteira de Pelotas com o primeiro máximo da curva senoidal normalizada fixado em 1909 (ano de máximo do primeiro ciclo da série, com índice anual de 1360 mm):

$$\text{índice de chuvas (mm)} = 1250 + 110 * \cos \left[\frac{2\pi(T - 1909)}{24} \right]$$

onde T varia de 1898 a 1994. O coeficiente de correlação entre estas curvas é de $47,69\% \pm 7,84\%$, com um nível de confiança de 99%.

Esta interpretação não tem o problema de mudança de fase de correlação e certamente está de acordo com a análise espectral revelada no capítulo anterior, pois as séries de Fortaleza e Pelotas possuem periodicidades próximas de 24 anos (veja as figuras 3.2.2 e 3.2.6).

Os resultados da análise da variação do nível de chuvas em Fortaleza demonstra que, se a mudança de fase de correlação não é assumida, obtemos um coeficiente de correlação melhor ($52,56\% \pm 5,9\%$) com uma curva de periodicidade de 24 anos do que com a série de ciclos solares magnéticos ($15,32\% \pm 8\%$). Mas, para a série inteira de Pelotas, obtemos coeficientes de correlação próximos para os dois mecanismos ($-50,62\% \pm 7,5\%$ para o mecanismo de interação Sol-Terra e $47,69\% \pm 7,84\%$ para o mecanismo de interação oceano-atmosfera). Com o mecanismo de mudança de fase de correlação nas séries de chuvas obtém-se coeficientes de correlação muito maiores ($-77,2\% \pm 4,4\%$ e $80\% \pm 5,4\%$ para Fortaleza; $60\% \pm 13\%$ e $-84\% \pm 4,0\%$ para Pelotas). No entanto, baseando-se somente nestes resultados, não é possível optar por uma das hipóteses, que necessariamente não se excluem entre si. Existe a possibilidade de ambas atuarem conjuntamente ou, até mesmo, do mecanismo climático ser controlado pelo mecanismo de interação Sol-Terra. A análise desta questão é de grande complexidade, já que as periodicidades destes mecanismos são muito próximas entre si (22 ± 1 e 24 ± 1 anos) e, possivelmente, não são estacionárias. Além disso, há dependência com características geográficas da região em questão (latitude, longitude, serras, oceanos, rios, florestas, correntes marítimas, poluição atmosférica, etc.).

Capítulo 5

Eventos MSB, GLE e Forbush

Ciclos com períodos de 11 e 22 anos são observado em quase todas as manifestações de atividade solar (irradiação, número de manchas solares, frequência de *flares* solares, etc.) e em vários fenômenos magnetosféricos e atmosféricos provocados pela atividade solar (tempestades magnéticas, correntes ionosféricas, auroras polares, etc.). Um possível mecanismo relacionando a atividade solar ao clima terrestre poderia ser revelado através do estudo da resposta de fenômenos atmosféricos a eventos magnetosféricos e solares isolados tais como: eventos MSB (*Magnetic Sector Boundary*), eventos GLE (*Ground Level Enhancements*, aumento da intensidade do fluxo de prótons chegando à superfície terrestre durante *flares* solares) e decréscimos Forbush de raios cósmicos galácticos.

Alguns fenômenos meteorológicos foram descritos por Tinsley (1996), tais como variações da pressão atmosférica, dos índices de chuvas, da corrente elétrica entre a superfície e a atmosfera e da frequência e intensidade de tempestades durante e/ou após grandes *flares* solares. A influência de eventos MSB sobre o campo elétrico da atmosfera e sobre outros parâmetros meteorológicos também tem sido estudada (Herman e Goldberg, 1978).

5.1 Eventos MSB e Variações Pluviométricas

No capítulo anterior, estudamos as correlações de longo prazo entre a variabilidade do campo magnético solar e os índices de chuvas de localidades de algumas regiões de baixas latitudes. E encontramos correlações muito significativas entre a série de ciclos solares magnéticos e as séries de Fortaleza e Pelotas. Um estudo interessante seria estudar se também existem nestas regiões correlações entre a variabilidade do campo magnético interplanetário (uma extensão do campo magnético solar) e os índices de chuvas no prazo de alguns dias. Para tanto, utilizamos um banco de dados de eventos MSB, que são as datas em que a Terra atravessa uma “fronteira” de setor magnético solar e há mudança de polaridade do IMF (dia “zero” de evento MSB).

Usamos um método de superposição de épocas para estudar uma possível correlação entre eventos MSB e variações dos índices de chuvas. Queremos saber, por exemplo, se há alguma variação significativa do índice de chuvas durante 10 dias antes e 10 dias depois do dia “zero”. Inicialmente calculamos um índice relativo de chuvas I_i para cada evento que ocorreu na época de chuvas de uma região como:

$$I_i = \frac{r_i}{r_{\text{médio}}}$$

onde i varia de -10 a $+10$ e $r_{\text{médio}}$ é a média dos 10 dias anteriores ao dia “zero” do evento. Depois disto fizemos, para cada dia, uma média dos índices relativos de todos os eventos. Podemos agora fazer um gráfico *índice relativo médio x dia* e estudar a curva de um índice relativo de chuvas para alguns dias antes e depois do dia “zero”.

Algumas questões pertinentes : haverá algum efeito da mudança de polaridade do campo magnético interplanetário (IMF) sobre a variabilidade dos índices de chuvas ? Observam-se médias maiores ou menores antes ou depois da maioria destes eventos ? Haverá diferenças entre mudanças de polaridade de “+” para “-” e de “-” para “+” ?

Estes cálculos foram feitos separadamente para eventos MSB em que a mudança de polaridade do campo magnético interplanetário foi de “+” para “-” e de “-” para “+” porque foram observadas variações significativas de alguns parâmetros meteorológicos durante eventos MSB apenas de “+” para “-” ou de “-” para “+” (Tinsley, 1996).

As figuras 5.1.1 e 5.1.2 mostram os resultados obtidos para os eventos que ocorreram durante a estação de chuvas de Fortaleza. Foram selecionados 95 eventos MSB para Fortaleza, 48 de “+” para “-” e 47 de “-” para “+”. Todos os pontos após o dia zero têm índices relativos maiores que 1, ou seja, todos os índices relativos de chuvas após o dia “zero” são maiores que a média dos 10 dias anteriores ao dia “zero”. Estão representadas as médias diárias do índice relativo de chuvas de todos os eventos e o desvio padrão da média dos 10 primeiros dias e de cada um dos dias após o dia “zero”.

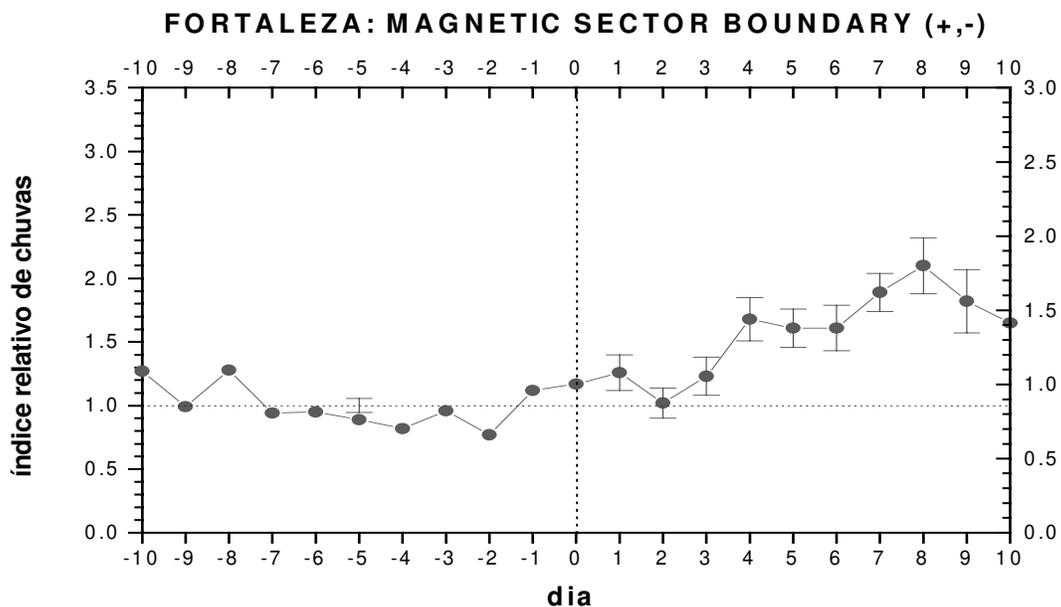


Figura 5.1.1. Índice relativo médio, I , para 10 dias antes e 10 dias depois do dia “zero” de evento MSB (+, -) que ocorreu em época de chuvas de Fortaleza.

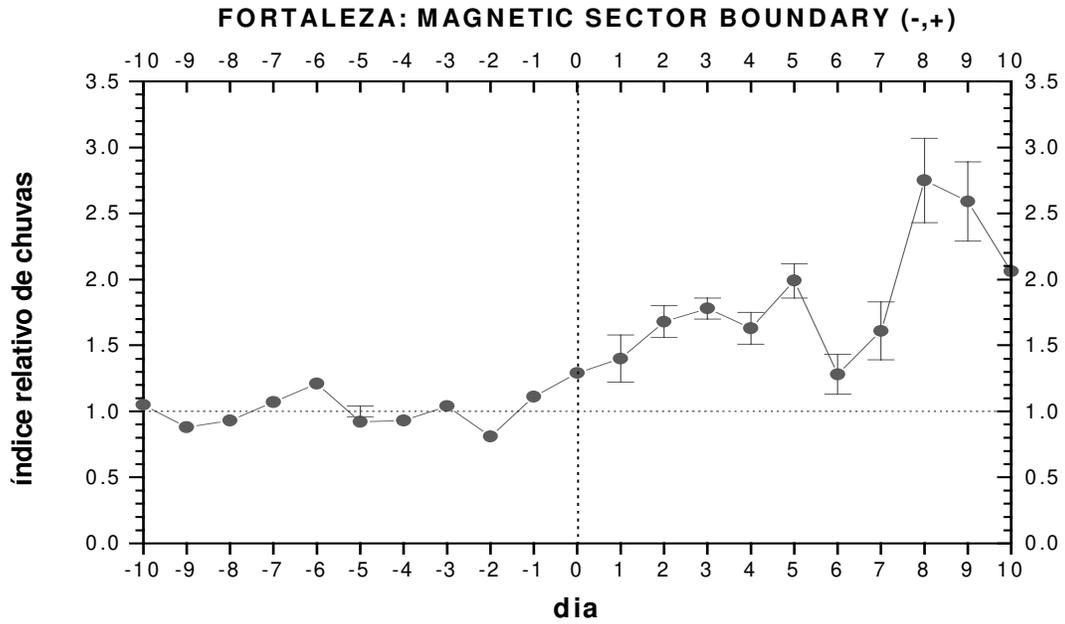


Figura 5.1.2. Índice relativo médio, I , para 10 dias antes e 10 dias depois do dia “zero” de evento MSB (-, +) que ocorreu em época de chuvas de Fortaleza.

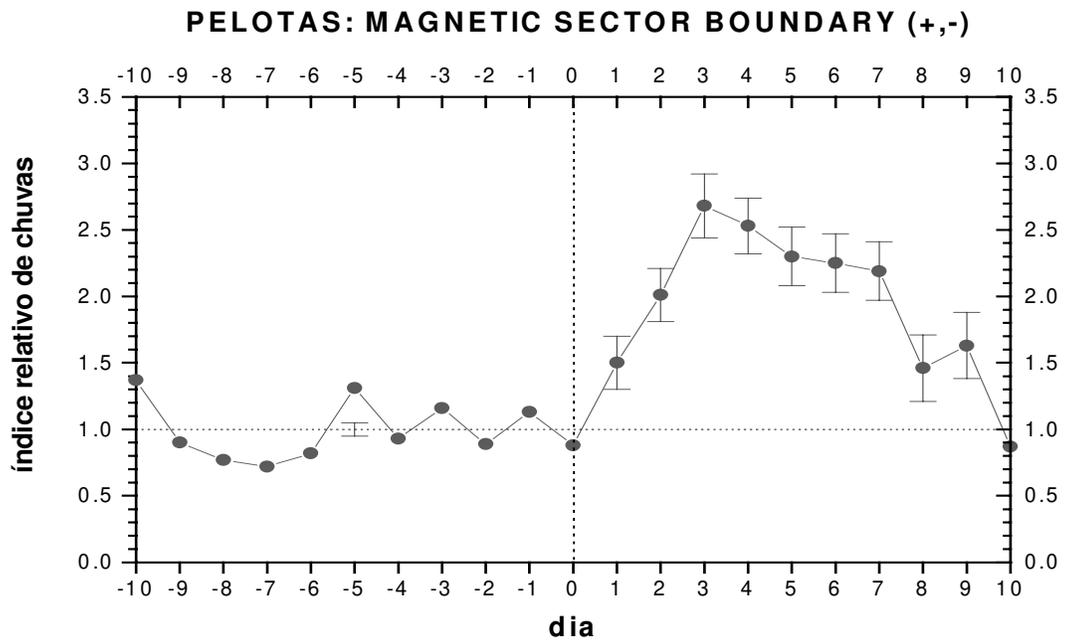


Figura 5.1.3. Índice relativo médio, I , para 10 dias antes e 10 dias depois do dia “zero” de evento MSB (+, -) que ocorreu em época de chuvas de Pelotas.

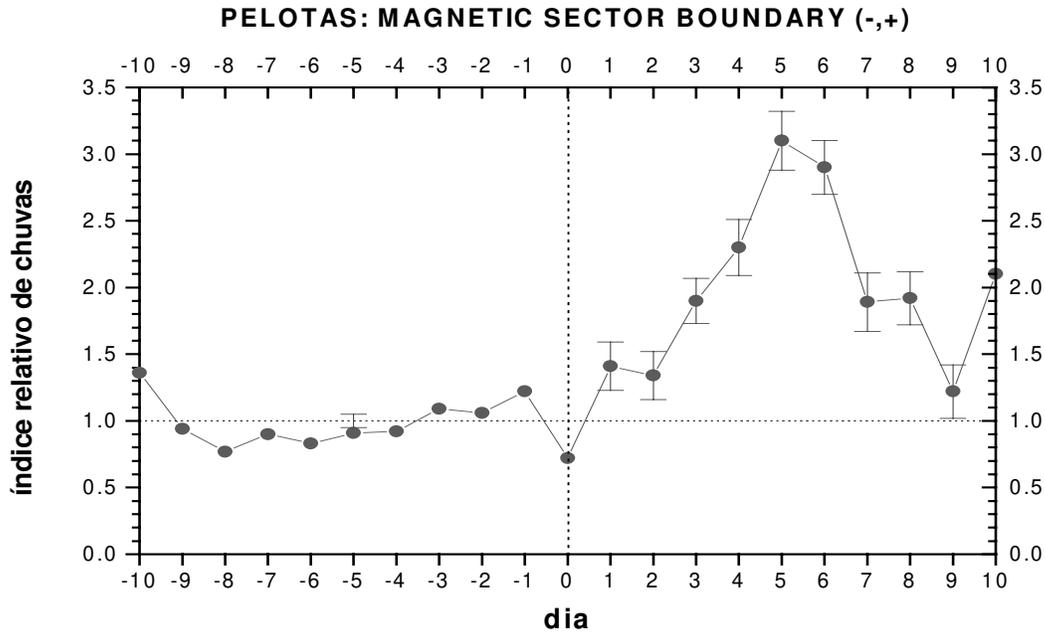


Figura 5.1.4. Índice relativo médio, I , para 10 dias antes e 10 dias depois do dia “zero” de evento MSB (–, +) que ocorreu em época de chuvas de Pelotas.

Também foram selecionados 79 eventos MSB que ocorreram em estação de chuvas de Pelotas, 42 de “+” para “–” e 37 de “–” para “+”. A tabela destes eventos encontra-se no final do capítulo 2. Os resultados encontrados foram ainda melhores do que para Fortaleza. Veja as figuras 5.1.3 e 5.1.4. Novamente, todos os pontos após o dia zero têm índices relativos maiores que 1, ou seja, todos os índices relativos de chuvas após o dia “zero” são maiores que a média dos 10 dias anteriores ao dia “zero”.

Portanto, encontramos correlações entre a variabilidade de polaridade do campo magnético interplanetário e os níveis de chuvas de Fortaleza e Pelotas. Os estudos publicados de correlações entre eventos MSB e parâmetros geofísicos (Tinsley, 1996) apontam que quando a polaridade do IMF é negativa, sobretudo da componente B_z , a penetração de partículas carregadas para dentro da magnetosfera é facilitada. Os resultados obtidos para níveis de chuvas concordam com este mecanismo, mas sugerem que mais importante do que o *signal* de troca, é o fato de haver a *troca de sinal* de polaridade.

5.2 Eventos de Raios Cósmicos

A influência de fluxos de partículas carregadas sobre as propriedades ópticas da atmosfera foi estudada por Pudovkin e Raspopov (1992). Eles sugeriram um mecanismo em que a transparência é afetada por raios cósmicos galácticos e solares com energia superiores a 1 GeV. Com esta energia, seriam capazes de penetrar até as camadas mais baixas da atmosfera e provocar processos de ionização. Os autores mostraram que a transparência varia quando fluxos de raios cósmicos solares aumentam na atmosfera, durante *flares*, ou quando há decréscimo de raios cósmicos galácticos, durante decréscimos Forbush. Estes resultados mostraram-se válidos para latitudes médias e altas, onde a rigidez magnética de corte é baixa suficiente para permitir a penetração de raios cósmicos para a atmosfera. Para baixas latitudes, efeitos deste tipo puderam ser observados somente durante manifestações de grandes *flares* solares que resultaram em eventos GLE.

Se processos de ionização podem ocorrer em decorrência do fluxo de partículas carregadas, seria interessante observar as relações entre eventos de curto prazo observados na superfície terrestre com os níveis de precipitação das regiões que estamos estudando. Analisaremos as variações dos níveis *diários* de nossas séries de chuvas em conexão com os eventos GLE e Forbush.

5.2.1 Eventos GLE e Variações Pluviométricas

Um método de superposição de épocas foi usado para analisar a possível influência de eventos GLE sobre o índice diário de nossas séries de chuvas. No dia “zero” de cada evento GLE, os monitores de nêutrons registram um fluxo maior de prótons solares. As variações relativas de chuvas D_i foram calculadas para 15 dias antes e 15 dias depois do dia “zero” de cada evento GLE:

$$D_i (\%) = 100 \frac{(r_i - r_{ismth})}{r_{ismth}}$$

onde r_i e r_{ismth} são, respectivamente, o índice de chuvas do dia i e a média móvel dos índices de chuvas durante um período de 5 dias centrado no dia i ($i = -15, \dots, 15$). Consideramos apenas os eventos que ocorrem durante a estação de chuvas de cada localidade, pois nestas épocas a variação diária do nível de chuvas torna-se evidente. Se o cálculo fosse realizado considerando D em relação, por exemplo, à média de todos os 31 dias e/ou se os eventos de todas as épocas do ano fossem considerados, uma possível influência de variações do fluxo de partículas carregadas sobre processos de formação de chuvas na atmosfera poderia ser mascarada.

Estudamos as variações dos índices diários de chuvas de Fortaleza, Campinas e Pelotas durante os 56 eventos GLE descritos no final do capítulo 2. Os eventos selecionados com um, dois e três asteriscos ocorreram, respectivamente, durante a época de chuvas de Fortaleza, Campinas e Pelotas. Uma evidência da relação entre o fluxo de partículas e o nível de chuvas poderia se manifestar através de um pico no dia “zero” de um gráfico da média diária das variações relativas (Pudovkin e Veretenenko, 1996).

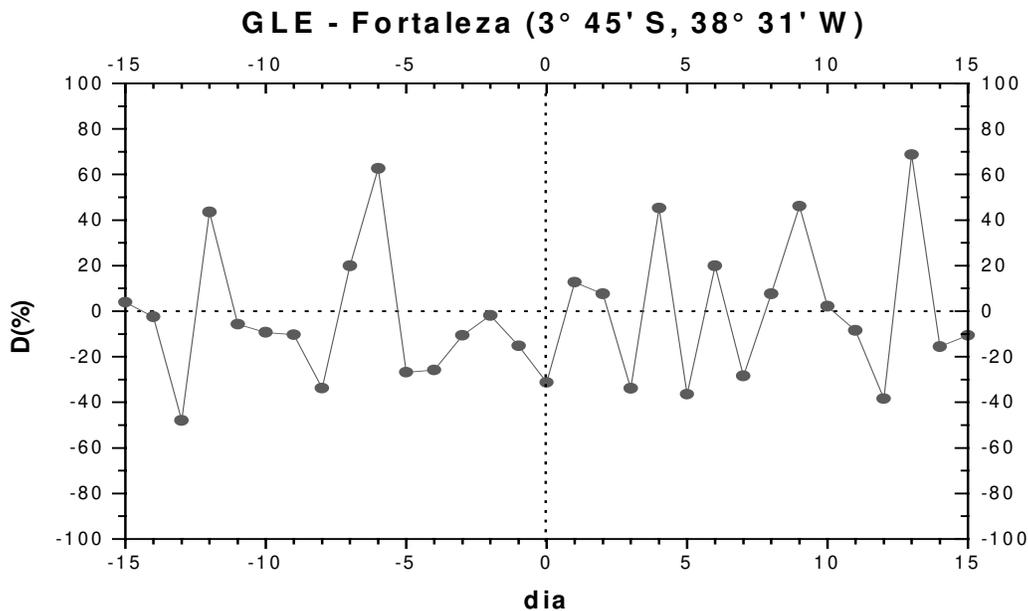


Figura 5.2.1 Variação relativa média dos índices de chuvas, D (%), para 15 dias antes e 15 dias depois do dia “zero” de 14 eventos GLE que ocorreram durante a estação de chuvas de Fortaleza.

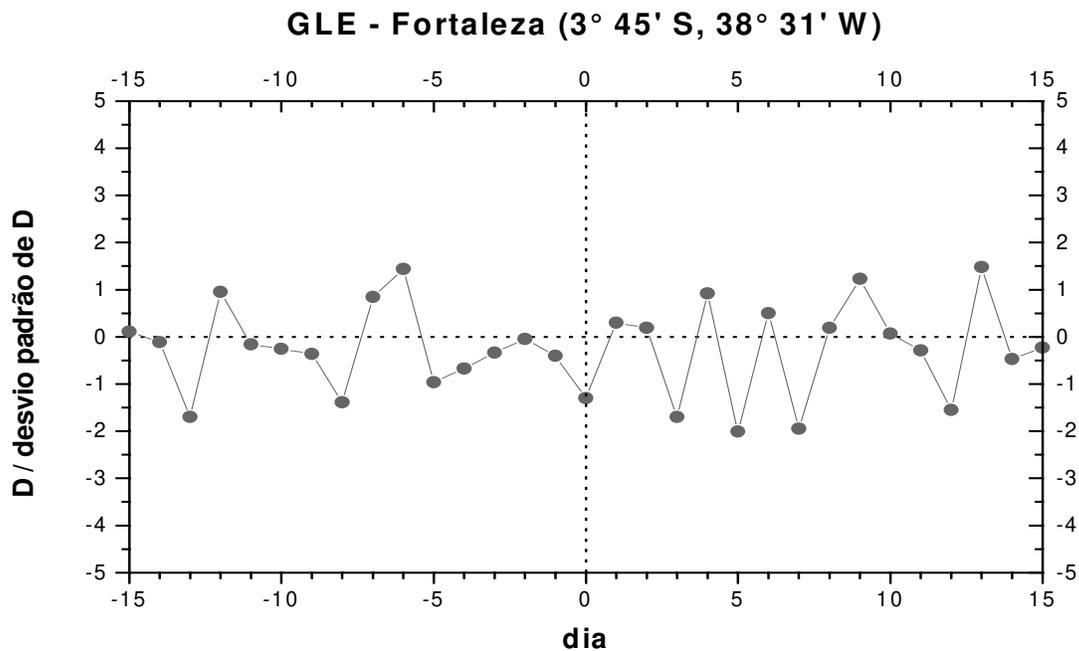


Figura 5.2.2 Fortaleza: razão $D(\%)$ pelo seu desvio padrão para eventos GLE.

Calculado os desvios relativos D_i para os 30 dias em torno do dia “zero” de cada evento, obtém-se a média dos desvios relativos de cada dia de todos os 14 eventos. Veja a figura 5.2.1. Pela figura 5.2.1 observa-se que para o dia “zero” foi obtido um valor negativo, - 31%.

A figura 5.2.2 é um gráfico da razão da variação relativa média diária pelo seu respectivo desvio padrão. Um critério estatístico que garante a confiabilidade dos resultados em 99% é quando a condição $D(\%) / \sigma(D(\%)) > 3$ é satisfeita. Portanto, uma evidência da relação entre o fluxo de partículas e o nível de chuvas que poderia se manifestar através de um pico no dia “zero” dos gráficos de $D(\%)$ e $D(\%) / \sigma(D(\%))$ não foi encontrada.

Durante a estação de chuvas de Pelotas, temos 17 eventos. Estes eventos foram distinguidos por três asteriscos na tabela de eventos GLE do capítulo 2. Novamente não foi registrada aqui uma variação positiva do nível de chuvas no dia “zero”. O valor encontrado foi negativo e muito pequeno: - 7.7 %. Vejas as figuras 5.2.3 e 5.2.4

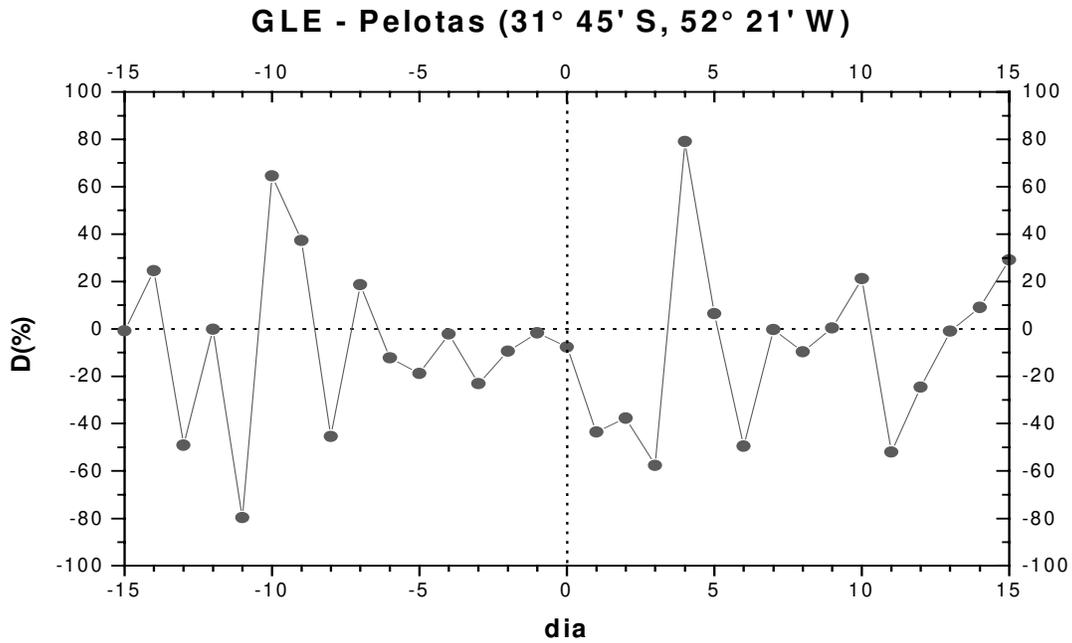


Figura 5.2.3 Variação relativa média dos índices de chuvas, D (%), para 15 dias antes e 15 dias depois do dia “zero” de 17 eventos GLE que ocorreram durante a estação de chuvas de Pelotas.

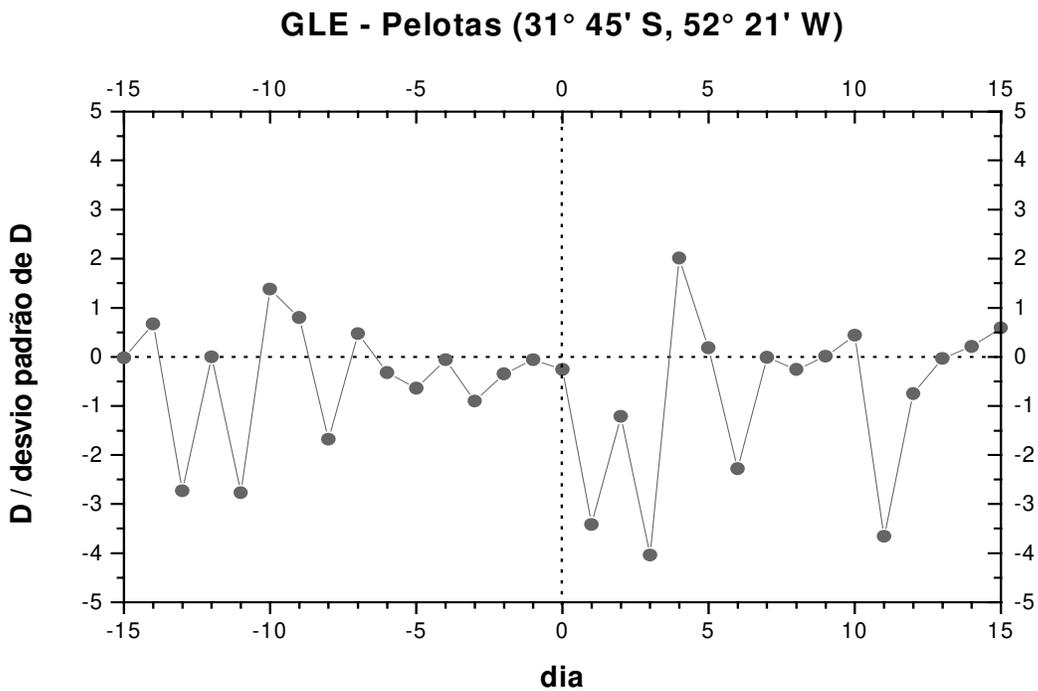


Figura 5.2.4 Pelotas: razão D (%) pelo seu desvio padrão para eventos GLE.

5.2.2 Eventos Forbush e Variações Pluviométricas

Usamos o mesmo método de superposição de épocas usado para eventos GLE no estudo de variações pluviométricas durante decréscimos Forbush: o cálculo da variação relativa D_i , para 15 dias antes e 15 dias depois do dia “zero” (neste caso, o dia de menor fluxo de partículas) dos eventos que ocorreram durante a estação de chuvas local (também selecionados com asteriscos na tabela de eventos Forbush no final do capítulo 2: os eventos selecionados com um, dois e três asteriscos ocorreram, respectivamente, durante a época de chuvas de Fortaleza, Campinas e Pelotas.). Uma evidência da relação entre o fluxo de partículas e o nível de chuvas poderia se manifestar através de uma depressão no dia “zero” de um gráfico da média diária das variações relativas (Stozhkov, 1995).

Tanto em Fortaleza como em Pelotas não foi verificada uma depressão no dia “zero”. Portanto, novamente, *não encontramos uma dependência das variações dos níveis de chuvas com a variação do fluxo de raios cósmicos*. Veja os resultados nas figuras 5.2.5 e 5.2.6 para Fortaleza e 5.2.7 e 5.2.8 para Pelotas.

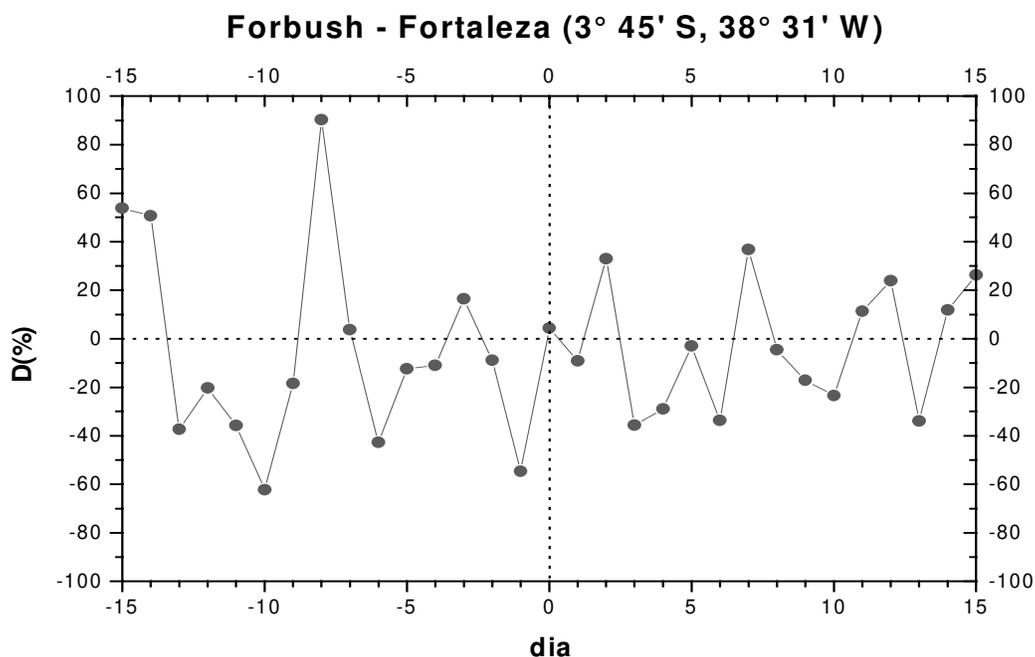


Figura 5.2.5 Variação relativa média dos índices de chuvas, D (%), para 15 dias antes e 15 dias depois do dia “zero” de 15 eventos Forbush que ocorreram durante a estação de chuvas de Fortaleza.

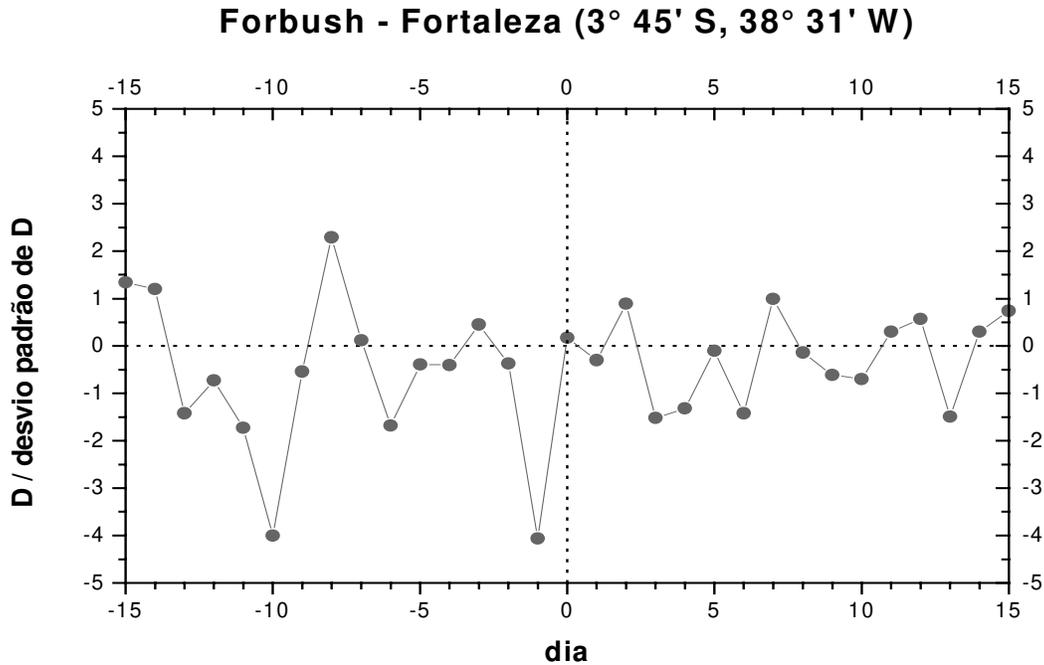


Figura 5.2.6 Fortaleza: razão $D(\%)$ pelo seu desvio padrão para eventos Forbush.

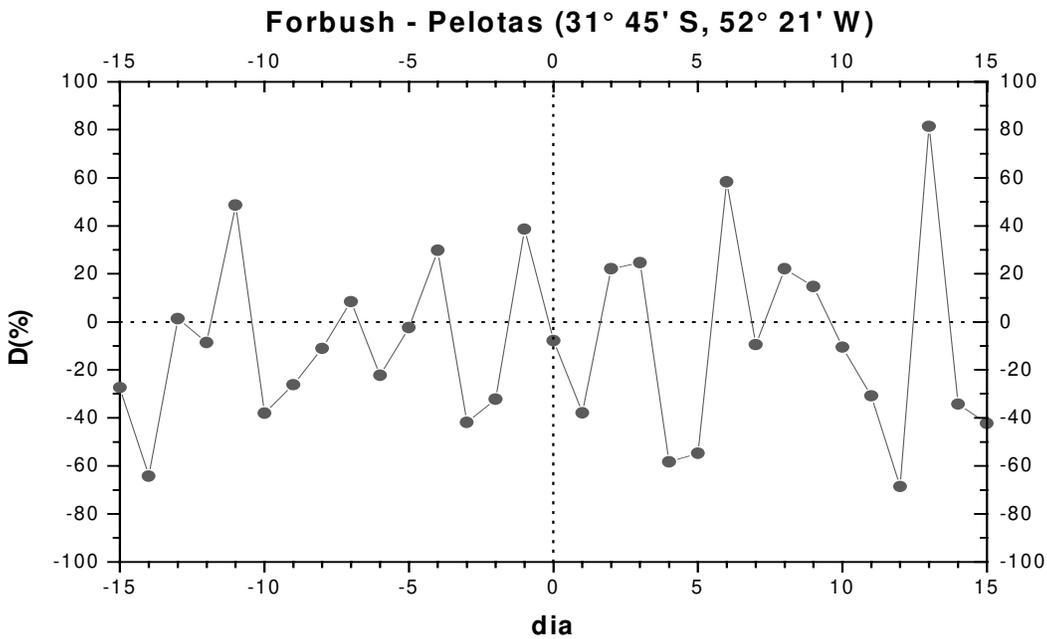


Figura 5.2.7 Variação relativa média dos índices de chuvas, $D(\%)$, para 15 dias antes e 15 dias depois do dia “zero” de 15 eventos Forbush que ocorreram durante a estação de chuvas de Pelotas.

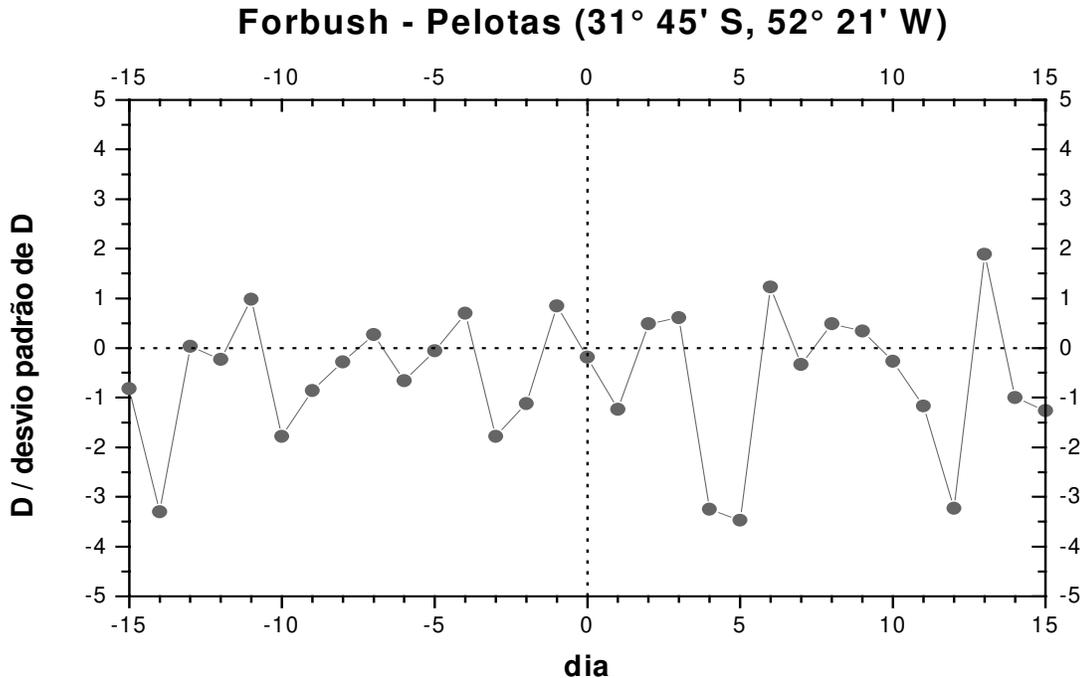


Figura 5.2.8 Pelotas: razão $D(\%)$ pelo seu desvio padrão para eventos Forbush.

Os valores de D para os dias “zero” de eventos Forbush em estações de chuvas de Fortaleza e Pelotas foram respectivamente: 4.4 % e -7.8% . Segundo artigos publicados por Pudovkin (1992, 1996), há influência direta de ionização por raios cósmicos galácticos e solares em camadas atmosféricas de regiões de altas e médias latitudes e a taxa de ionização está relacionada à maior ou menor intensidade de chuvas. Para eventos GLE e Forbush, esperávamos obter para o dia “zero” respectivamente um “pico do nível de chuvas” e uma “depressão do nível de chuvas”. Outros autores (Tinsley, 1989) também encontraram correlações de curto prazo com fenômenos meteorológicos, entre os quais a formação de nuvens e chuvas. *Tais resultados não foram obtidos para as séries de chuvas de latitudes tropicais e subtropicais do hemisfério sul.*

O estudo das relações entre distúrbios magnetosféricos e variações diárias do nível de chuvas ainda é um tópico que necessita de muita pesquisa experimental. Por exemplo, Campinas está situada na “ponta” sul da linha magnética $L = 1.16$, onde $B = 0.23 \text{ Gauss}$ ⁵. A

⁵ O sistema de coordenadas B-L criado por Mc Ilwain em 1961, permite localizar as partículas carregadas dos cinturões de radiação da Terra em função de duas coordenadas magnéticas ao invés de três coordenadas espaciais (Jursa, 1985)

altitude máxima desta linha é de 400 km. A “ponta” norte da linha atravessa a superfície da Terra com $B = 0.32$ Gauss. No topo da linha de campo magnético $L = 1.16$, está confinado um fluxo de elétrons de $\sim 1/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr})$ com energia ≥ 100 MeV e um fluxo de prótons de $\sim 300/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr})$ com energia ≥ 400 MeV. Durante distúrbios magnéticos, as partículas confinadas presumivelmente precipitam-se em direção à “ponta” sul da linha onde a magnitude do campo magnético é menor (Gusev, 1995) Portanto, é interessante estudar uma relação entre o nível de chuvas e distúrbios magnéticos em Campinas, pois é exatamente nesta região onde se pode esperar partículas precipitando-se em direção à atmosfera. No entanto, em Campinas temos apenas 7 eventos GLE e 8 eventos Forbush que ocorreram durante a principal estação de chuvas (dezembro, janeiro e fevereiro). Apesar disto, o cálculo foi feito mas, assim como em Fortaleza e Pelotas, não revelou para o dia “zero” uma variação significativa em relação aos dias próximos. Os eventos que ocorreram durante a estação de chuvas de Campinas estão marcados com dois asteriscos na tabela de eventos de raios cósmicos ao final do capítulo 2.

O principal problema da análise de variações de níveis de chuvas em um curto período de tempo são as grandes flutuações dos índices. Mesmo em épocas de chuvas, há períodos em que as estações meteorológicas não registram chuvas por mais de uma semana. Isto pode mascarar a influência das variações do fluxo de partículas carregadas sobre processos atmosféricos, entre os quais, a formação de nuvens e de chuvas (Stozhkov, 1995). Uma análise mais refinada, que poderia também evitar efeitos locais, deveria incluir dados de muitas estações e de uma vasta região. Além desta tarefa demandar muito trabalho e critério estatístico, poucas estações meteorológicas brasileiras possuem séries de dados de chuvas diários confiáveis dos últimos 50 anos.

Capítulo 6

Conclusões

O estudo da influência de fenômenos relacionados com a atividade solar sobre o clima terrestre e da previsão do “tempo espacial” é um dos principais tópicos atuais de pesquisa em geofísica. Os resultados obtidos estão respondendo a algumas contradições da teoria meteorológica clássica, que considera os processos atmosféricos atuando de forma independente do meio interplanetário.

As correlações entre fenômenos ligados à variabilidade solar de longo e curto prazos e índices de chuvas em regiões do hemisfério sul são importantes para o entendimento da ação do mecanismo de interação Sol-Terra. Além disso, com estes resultados é possível fazer boas previsões, a longo prazo, dos níveis de chuvas, pelo menos para regiões do litoral brasileiro. A previsão de períodos de cheias e de secas é de grande importância para

a população destas regiões, pois facilita o planejamento agrícola e o controle da operacionalidade das redes hidroelétricas. As principais contribuições de meu trabalho de tese de mestrado para o melhor entendimento da influência da variabilidade solar sobre o clima terrestre foram as seguintes:

1. As séries anuais de chuvas das regiões do litoral brasileiro exibem ciclos com grande variabilidade de amplitudes entre mínimos e máximos e periodicidades bem definidas entre 20 e 25 anos por mais de 100 anos. Estas características sugerem que há algum mecanismo físico atuando a longo prazo e de forma contínua. As séries de chuvas de Fortaleza e Pelotas apresentam fases de (anti)correlação consistentes e bem definidas com a série de ciclos solares magnéticos. Além disto, o período de mudança de fase de correlação entre as séries de chuvas e de ciclos solares magnéticos ocorreu quando a polaridade do campo magnético solar foi negativa.
2. As séries de chuvas do interior paulista não apresentam ciclos com periodicidades entre 20 e 25 anos após 1950. Estas curvas apresentam uma tendência linear ascendente a partir desta data. Acredita-se que efeitos atmosféricos, provenientes talvez da ação do homem, possam estar atuando junto com o mecanismo de modulação a longo prazo da variabilidade solar e que estas curvas tenham se tornado parte de um ciclo com um período superior a 20-25 anos.
3. Além da existência de correlações a longo prazo entre os ciclos solares magnéticos e as periodicidades e intensidades de chuvas, foram observadas correlações de curto prazo entre a variabilidade de polaridade do campo magnético interplanetário (de origem solar) com os níveis de chuvas de Fortaleza e Pelotas. Nestas duas regiões litorâneas, observou-se um aumento significativo do nível de chuvas durante alguns dias após o dia “zero” de eventos MSB. Estes resultados mostram-se válidos para ambas as trocas de sinal de polaridade, o que sugere que o mecanismo de penetração de partículas na magnetosfera é favorecido durante os períodos em que há troca de sinal de polaridade do IMF, não importando qual seja o sinal de troca.
4. Uma análise estatística da variação dos índices de chuvas durante eventos GLE e Forbush não revelou uma influência direta de ionização por raios cósmicos galácticos e solares em camadas atmosféricas de regiões de baixas latitudes do hemisfério sul. Os

resultados obtidos para Fortaleza e Pelotas contrariam os resultados já obtidos para regiões de latitudes altas, em que a penetração de partículas é facilitada devido à baixa rigidez magnética de corte destas regiões.

5. Caso haja comprovação meteorológica da existência de um mecanismo de interação oceano-atmosfera com uma periodicidade em torno de 24 anos atuando na formação de chuvas em regiões de baixas latitudes do hemisfério sul, será possível prever com boa precisão os ciclos de chuvas destas regiões. As séries de chuvas e de simulações do mecanismo oceano-atmosfera mostraram boa correlação, embora inferior à correlação com o mecanismo Sol-Terra. Uma das hipóteses a ser estudada futuramente é a de que o próprio mecanismo oceano-atmosfera seja na verdade controlado pelo mecanismo de interação Sol-Terra. Ainda não é possível afirmar se estes mecanismos agem independente ou conjuntamente pois as periodicidades de ambos são muito próximas.

Sugestões para Próximos Estudos

Ainda há muito pouco material publicado sobre as correlações de curto e longo prazo entre eventos da variabilidade solar e do clima de regiões de baixas latitudes do hemisfério sul. Nesta tese, todos os resultados apresentados foram obtidos pela primeira vez por nosso grupo de pesquisa de geofísica espacial do Departamento de Raios Cósmicos da UNICAMP. Consideramos que estes resultados podem ajudar a entender melhor os mecanismos de interação Sol-Terra e também podem servir para o melhoramento dos modelos existentes de previsão meteorológica.

Neste trabalho estudamos apenas a relação entre fenômenos da atividade solar e a variabilidade de índices pluviométricos, mas outros parâmetros meteorológicos, tais como índices relacionados a temperatura, ciclones, ventos, tempestades e pressão atmosférica também podem ser estudados.

Mas, o que ainda poderia ser feito para dar continuidade à linha de pesquisa que estudamos? O que mais podemos fazer em relação aos índices de chuvas? Por exemplo, podemos (e devemos) ainda estudar as fases de correlação de séries de chuvas de outras localidades do litoral e do interior, não só do território brasileiro, mas de outras partes da

Terra, inclusive de regiões do hemisfério norte. No caso de eventos MSB, poderemos ainda selecionar todos os eventos que tiveram quatro ou mais dias com a mesma polaridade de IMF ao invés de 10 dias como fizemos. Também poderemos dividir estes eventos entre os que ocorreram nos períodos de máximos e de mínimos dos ciclos solares magnéticos (quando a configuração do campo magnético solar é alterada) e verificar se há correlação com os níveis de chuvas para cada caso. Outra questão, talvez ainda mais interessante: será que há correlação entre o *número* de eventos MSB que ocorrem em alguma fase do ciclo solar (não importando qual seja a troca de sinal de polaridade durante o evento), e a variabilidade dos índices de chuvas de regiões do litoral e/ou do interior do continente ?

Talvez o maior desafio seja mesmo o aperfeiçoamento dos métodos estatísticos para o tratamento de todos estes dados. Mas mesmo com métodos estatísticos simples já foi possível obter resultados significativos que originaram, ou que confirmaram, interpretações físicas atribuídas aos mecanismos de interação Sol-Terra.

Há dados geofísicos acumulados durante décadas por estações meteorológicas, satélites e observatórios de raios cósmicos de todo o mundo que foram até agora pouco explorados, mas que com o desenvolvimento destas pesquisas têm se mostrado reveladores para o entendimento do clima terrestre. Para o futuro, visando resultados quantitativos mais precisos, haverá a necessidade de se fazer estudos mais refinados com o aprimoramento dos métodos estatísticos e a expansão da capacidade computacional.

A pesquisa nesta área é muito promissora e merece ser continuada.

Referências Bibliográficas

- [1] Bevington, P. R.; “Data reduction and error analysis for the Physical Sciences”, Mc Graw Hill, New York, pp. 164-176, 1969.
- [2] Bronshtein, I. N. and Semendiaev, K. A.; “Handbook of Mathematics”, Toinber Publisher, Germany, 1979.
- [3] Brückner, Eduard; “The Sources and Consequences of Climate Changes and Climate Variability in Historical Times”, Kluwer Academic Publisher, Germany, 2000.
- [4] Burg, J. P.; “Maximum Entropy Spectral Analysis”, artigo apresentado no 37º encontro da *Society of Exploration Geophysics*, Oklahoma City, Outubro-1967.
- [5] Diggle, P. J.; “Time Series – A Biostatistical Introduction” , Oxford Statistical Science Series, Oxford Science Publications, 1990.
- [6] Forbush, S. E.; “World-wide cosmic ray variations, 1937-1952”; *Journal of Geophysical Research*, Vol. 59, pp. 525-542, 1954.
- [7] Georgieva, K. and Kirov, B.; “About the instability of solar-climatic relations”, submitted to *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2000.
- [8] Gusev, A. *et al.*; “The Study of Solar-Terrestrial Connection in the Brazilian Magnetic Anomaly Region”, *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 13, N. 2, Julho-1995.
- [9] Hargreaves, J. K.; “The Solar-Terrestrial Environment”; Cambridge University Press, NY, EUA, 1992.
- [10] Herman, J. R. e Goldberg, R. S. A.; “Sun, Weather and Climate”, NASA, Washington D.C., pp. 318, 1978.
- [11] Hurrell, J. W.; “Decadal trend in the North Atlantic Oscillation and relationship to regional temperature and precipitation”, *Science*, 269, pp. 676-679, 1995.
- [12] Jursa, Adolph; “Handbook of Geophysics and the Space Environment”, U.S. Air Force Geophysics Laboratory, 1985.
- [13] Kane, R. P.; “Power Spectrum Analysis of Solar and Geophysical Parameters”, *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, Vol. 29, pp. 471-495, 1977.

- [14] Kane, R. P.; “Maximum Entropy Spectral Analysis of Some Artificial Samples”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 84, N. A3, pp. 965-966, Março-1979.
- [15] Kane, R. P. and Trivedi, N. B.; “Periodicities in Sunspot Numbers”, *Journal Geomagnetism and Geoelectricity*, Vol. 37, pp. 1071-1085, 1985.
- [16] Kane, R. P. and Trivedi, N. B.; “Are droughts predictable?”; *Climate Change*, Vol. 8, pp. 209-223, 1986.
- [17] Kane, R. P. and Trivedi, N. B.; “Spectral Characteristics of the Annual Rainfall Series for Northeast Brazil” , *Climatic Change*, Vol. 13, pp. 317-336, 1988.
- [18] Kane, R. P.; “Quasi-Biennial and Quasi-Triennial Oscillations in the Rainfall of Northeast Brazil” , *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 16 (1), 1998.
- [19] Kane, R. P.; “Sun-Weather/Climate Relationship - An Update”, Scientific Note; Indian Space Research Organization, Bangalore, India (January, 1999).
- [20] Kane, R. P.; “Prediction of the Sunspot Maximum of Solar Cycle 23 by Extrapolation of Spectral Components”; *Solar Physics*, Vol. 189, pp. 217-224, 1999.
- [21] Kane, R. P.; “Relação entre a duração do El Niño e Extremos Pluviométricos no Nordeste, Cidade de São Paulo e Sul do Brasil” , *private communication* (INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) , 2000.
- [22] Kantor, I. e Trivedi, M.; “Espectro de Potência do Campo Geomagnético pelo Método de Entropia Máxima” , *Revista Brasileira de Física*, Vol. 10, N. 3, 1980.
- [23] King, J. W.; “Sun-Weather Relationships”, *Aeronautics and Astronautics*, Vol. 13, N. 4, pp. 10-19, Abril-1975.
- [24] Labitzke, K. and Loon, H.; “Associations between the 11-year solar cycle, the QBO and the atmosphere. Part I: the troposphere and stratosphere in the northern hemisphere in winter”, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 50, N. 3, pp. 197-206, 1988.
- [25] Lassen, K. and Friis-Christensen, E.; “Variability of the solar cycle length during the past five centuries and the apparent association with terrestrial climate”, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 57, N. 8, pp. 835-845, 1995.
- [26] Pudovkin, M. I. and Raspopov, O. M.; “The Mechanism of Action Of Solar Activity on the State of the Lower Atmosphere and Meteorological Parameters – A Review”, *Geomagnetism and Aeronomy*, Vol. 32, N° 5, 1992.

- [27] Pudovkin, M. I. and Veretenenko, S. V.; “Variations of the Cosmic Rays as One of the Possible Links Between the Solar Activity and the Lower Atmosphere”, *Advanced Space Research*, Vol. 17, N. 11, pp. 161-164, 1996.
- [28] Stozhkov, Y. *et al*; “Rainfalls during Great Forbush Decreases”; *Il Nuovo Cimento*, Vol. 18 C, N. 3, Maio-Junho, 1995.
- [29] Svalgaard, L.; “Solar activity and the weather” , SUIPR Report N.º 526, Institute for Plasma Research, Stanford University, Stanford, 1973.
- [30] Svensmark, H. and Friis-Christensen, E.; “Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage – a missing link in solar-climate relationships”, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 59, N. 11, pp. 1225-1232, 1997.
- [31] Tinsley, B. A.; Brown, Geoffrey M. and Scherrer, Philip; “Solar Variability Influences on Weather and Climate: Possible Connections Through Cosmic Ray Fluxes and Storm Intensification”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 94, N. D12, pp. 14783-14792, Outubro-1989.
- [32] Tinsley, B. A.; “Apparent Tropospheric response to MeV-GeV Particle Flux Variations: A Connection Via Electrofreezing of Supercooled Water in High-Level Clouds?”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 96, N. D12, pp. 22283-22296, Dezembro, 1991.
- [33] Tinsley, B. A. and Heelis, Roderick A.; “Correlations of Atmospheric Dynamics with Solar Activity Evidence for a Connection via the Solar Wind, Atmospheric Electricity, and Cloud Microphysics”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 98, N. D6, pp. 10375-10384, Junho-1993.
- [34] Tinsley, B. A.; “Correlations of atmospheric dynamics with solar wind-induced, changes of air-earth density into cloud tops”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101 N. D23, pp. 29701-29714, Dezembro-1996.
- [35] Troup, A. J.; “A secular change in the relation between the sunspot cycle and the temperature in the tropics”, *Geophysics*, 1962.
- [36] Ulrych, T. J. and Bishop, T. N.; “ Maximum Entropy Spectral Analysis and Autoregressive Decomposition”, *Rev. Geophysics*, Vol. 13, pp. 183-200, 1975.

Endereços Eletrônicos Consultados

[1] Landscheidt, Theodor (Schroeter Institute for Research in Cycles of Solar Activity – Nova Escócia, Canadá); “Solar Activity: A Dominant Factor in Climate Dynamics”.

<http://www.microtech.com.au/daly/solar/solar.htm>

[2] Keller, Charles (Institute of Geophysics and Planetary Physics – University of California, Los Alamos National Laboratory, New Mexico, USA); Comments on “Solar Activity: A Dominant Factor in Climate Dynamics”.

<http://www.microtech.com.au/daly/solar/keller.html>

[3] Landscheidt, Theodor (Schroeter Institute for Research in Cycles of Solar Activity – Nova Escócia, Canadá); “Solar Activity Controls El Niño and La Niña”.

<http://www.microtech.com.au/daly/sun-enso/sun-enso.html>

[4] “Space Weather’s Connection to Solar Activity”

<http://www.earth.agu.org/revgeophys/>

[5] “Geomagnetic Activity”

<http://www.ousrvt2oulu.fi~spaceweb/textbook/ga.html>

[6] IPS Radio & Space Services: “Observed And Predicted Sunspot Numbers”.

<http://www.ips.gov.au/papers/>

[7] “Sunspot Numbers”

<http://web.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/SSN/ssn.html>

[8] “Magnetic Sector Boundary Lists (1947-1993)”

<http://quake.stanford.edu/~wso/SB/SB.html>

[9] “SpaceWeather.com”

<http://www.spaceweather.com/>

[10] “Space Physics” – Magnetosphere (Earth’s)

<http://www.oulu.fi/~spaceweb/textbook/magnetosphere.html>

Apêndice

CÁLCULO DE COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO

```
%programa cross-correlation
clear
precm=[];
k1=input('entre com k1, arquivo inicial de manchas: ');
k2=input('entre com k2, arquivo final de manchas: ');
for k=k1:k2;
    c1='load arquivo-manchas';
    c2=num2str(k);
    c1=[c1,c2,'.txt;'];
    eval(c1)
    c3= ['precmmais=', 'arquivo-manchas', c2, ';''];
    eval(c3);
    precm=[precm;precmmais];
    eval(['clear arquivo-manchas', num2str(k)])
end
precc=[];
q1=input('entre com q1, arquivo inicial de chuvas: ');
q2=input('entre com q2, arquivo final de chuvas: ');
for q=q1:q2;
    z1= 'load arquivo-chuvas';
    z2=num2str(q);
    z1=[z1,z2,'.txt;'];
    eval(z1)
    z3=['preccmais=', 'arquivo-chuvas', z2, ';''];
    eval(z3);
    precc=[precc;preccmais];
    eval(['clear arquivo-chuvas', num2str(q)])
end
warning('Dimensões da matriz de dados "NÚMERO DE MANCHAS
SOLARES"')
[p,n]=size(precm);
warning('Dimensões da matriz de dados "INDICES
PLUVIOMÉTRICOS"')
[r,s]=size(precc);
if p~=r or n~=s
    Error('AS DUAS MATRIZES DEVEM TER A MESMA DIMENSÃO!!!')
end
vetorm=[];
```

```

vetorc=[];
for i=1:p
    vetorm=[vetorm, precm(i,:)];
    vetorc=[vetorc, precc(i,:)];
end
vetorm=vetorm';
vetorc=vetorc';
warning('vetor de manchas solares');
disp(vetorm)
pause
warning('vetor de chuvas');
disp(vetorc)
mediam = mean(vetorm);
mediac = mean(vetorc);
for i=1:p
termomanchadenominador (i) = (vetorm(i)-mediam)^2;
termochuvadeterminador(i)= (vetorc(i)-mediac)^2;
end
denominadormancha = mean (termomanchadenominador);
denominadorchuva = mean (termochuvadeterminador);
sigma=sqrt(denominadormancha*denominadorchuva);
K= input ('entre com o valor máximo de k, "lag" de cross-
correlation = ');
for k=0:K
    d=1;
    termonumerador =[];
    for T=k+1:p
        termomanchanumerador = vetorm(T-k)- mediam;
        termochuva = vetorc(T)- mediac;
        termonumerador(d)= termomanchanumerador*termochuva;
        d=d+1;
    end
    numerador(k+1) = sum(termonumerador)/p;
    correlograma(k+1) = numerador(k+1)/sigma;
end
h=(0:1:K);
plot(h,correlograma)
title('Cross-Correlogram')
xlabel('k')
ylabel('Ck')
disp(correlograma')
disp(p);

```