



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-7260-TDI/702

**REGISTROS DA ATIVIDADE SOLAR E DE OUTROS
FENÔMENOS GEOFÍSICOS EM ANÉIS DE CRESCIMENTO DE
ÁRVORE**

Nivaor Rodolfo Rigozo

Tese de Doutorado em Geofísica Espacial, orientada pelo Dr. Daniel Jean Roger Nordemann, aprovada em 17 de dezembro de 1998.

INPE
São José dos Campos
1999

523.745

RIGOZO, N. R.

Registros da atividade solar e de outros fenômenos
geofísicos em anéis de crescimento de árvore / N. R. Rigozo -
São José dos Campos: INPE, 1998.

131p. – (INPE-7260-TDI/702).

1. Anéis de árvores. 2. Atividade solar. 3. Análise
espectral. 4. Regressão. 5. Método de máxima entropia.
I. Título.

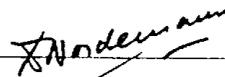
Aprovado pela Banca Examinadora em
cumprimento a requisito exigido para a
obtenção do Título de **Doutor** em
Geofísica Espacial.

Dr. Yogeshwar Sahai



Presidente

Dr. Daniel Jean Roger Nordemann



Orientador

Dr. José Humberto Andrade Sobral



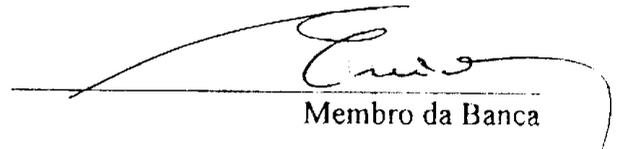
Membro da Banca

Dr. Walter Demetrio Gonzalez-Alarcon



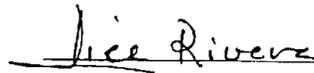
Membro da Banca

Dr. Enio Bueno Pereira



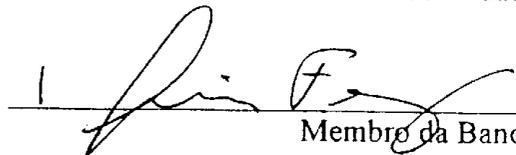
Membro da Banca

Dr^a Alice Rivera



Membro da Banca
Convidada

Dr. Epaminondas Sansigolo de Barros Ferraz



Membro da Banca
Convidado

Candidato (a): Nivaor Rodolfo Rigozo

São José dos Campos, 17 de dezembro de 1998.

O teu futuro é apenas um momento em minha vida.

Dedicado às árvores

Aos meus pais Ângelo R. Rigozo, Nilda G. Rigozo e meus irmãos:
Nivan A. Rigozo, Nivair A. Rigozo e Nivaldo A. Rigozo

AGRADECIMENTOS

Ao orientador, Dr. Daniel Jean Roger Nordemann, quero exprimir minha especial gratidão pela eficiente orientação, assistência e incentivo em todas as fases deste trabalho. Também agradeço pela sua grande amizade.

Ao meu grande amigo Luiz Eduardo Antunes Vieira pela sua grande e imprescindível colaboração nas pesquisas de campo, sem a qual não seria possível a realização deste trabalho. Também agradeço pelas suas sugestões e críticas na execução do mesmo.

Aos meus amigos Ademilson Zanandrea e sua esposa, Homera Zanandrea, pelo carinho e auxílio na recuperação de minha saúde, além de suas estimadas amizades. Também agradeço o amigo Ademilson Zanandrea pelas discussões e sugestões para a melhoria deste trabalho.

As minhas amigas Heloísa de Helena Faria, pelas sugestões, amizade e auxílio quando necessário, e a Lúcia Beatriz Fernandes da Silva pela sua amizade.

Ao meu amigo Cláudio Casiccia por ter conseguido e trazido as amostras de árvores do Chile. Agradeço a Juan C. Aravena do Laboratório de Botânica, Faculdade de Ciências, Universidad de Chile, pelo empréstimo das amostras de árvores do Chile.

Ao Jandir Lopes pela sua ajuda inestimável no acompanhamento nos lugares e na obtenção das amostras de árvores em Concórdia – S. C. Também agradeço ao Sr. Moacir Conradi, diretor do meio ambiente, pelo auxílio em Concórdia – S. C.

Aos senhores Zeferino Pegoraro, Mauro Ortigara, Wilson Zilío e Lauri Zilío pela permissão e ajuda para coletar as amostras de árvores em suas propriedades.

À Sra. Maria da Graça Hübbe pelos seus contatos e sua grande ajuda na obtenção de amostras de árvore nos municípios de Canela, São Francisco de Paula e Nova Petrópolis – R. S. Também agradeço ao Sr. Marcus Graff pelo seu acompanhamento e ajuda na aquisição das amostras de Canela – R. S.

Aos Engenheiros Florestais do IBAMA Everton Aires Ricardo Veraz, responsável pela Floresta Nacional de Canela – R. S., e Artur José Soligo, responsável pela floresta Nacional de São Francisco de Paula – R. S., pela ajuda e doação das amostras de árvores das FLONAs.

À Dra. Lycia Maria da Costa Pinto Moreira Nordemann pela utilização do seu laboratório para o armazenamento das amostras durante o tempo de secagem das mesmas.

Aos Doutores Nalin Babulal Trivedi e José Humberto Andrade Sobral pelo auxílio na realização da pesquisa de campo no Rio Grande do Sul.

Ao Dr. Pierre Girard, INPE e o Professor Claude Hillaire Marcel – GEOTOP/Université de Québec à Montréal – Canada pelo incentivo e empréstimo de uma sonda de trado para obtenção de amostras de árvores.

Aos Doutores Yogeshwar Sahai, José Humberto Andrade Sobral, Walter Demétrio Gonzalez Alarcon, Ênio Bueno Pereira, membros da banca, pelas críticas e sugestões. Também agradeço ao Dr. Epaminondas Sansigolo de Barros Ferraz e à Dra. Alice Rivera pela presença na banca como membros externos, assim como pelas sugestões.

Ao Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq) pela bolsa de doutoramento.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo auxílio à pesquisa, através da compra de material computacional.

Às secretárias da Divisão de Geofísica Espacial – Filomena de Fátima Xavier e Cláudia Regina Alves Duarte, aos meus colegas do curso de Geofísica Espacial e amigos no INPE.

RESUMO

Os estudos dos anéis de crescimento de árvores são, em sua maioria, realizados para verificar ou determinar os fatores climáticos, que estão atuando num local ou região, provocando variações nas espessuras de anéis de crescimento. Poucos estudos são feitos para se verificar e/ou determinar os fenômenos geofísicos, que possam causar variações nas espessuras de anéis de crescimento de árvores. Apresenta-se um novo método interativo de análise de imagens na determinação das espessuras dos anéis de crescimento de árvores, para a procura de periodicidades devidas à atividade solar e/ou outros fenômenos geofísicos que estejam influenciando o crescimento dos anéis. O método consiste na utilização de um computador, um digitalizador de mesa de alta resolução e na utilização de um programa desenvolvido no ambiente Interactive Data Language (IDL 5.0) para o estudo das imagens digitalizadas dos anéis de crescimento. A principal vantagem deste método é a análise interativa de imagens dos anéis de crescimento de árvores sem a necessidade de aparelhos complexos de alto custo. Foram coletadas no total 39 amostras, sendo que 12 são de Concórdia – SC, 09 de Canela – RS, 14 de São Francisco de Paula – RS, uma de Nova Petrópolis – RS, 02 de São Martinho da Serra – RS e uma do Chile. Nas séries temporais da espessura dos anéis de crescimento são aplicadas funções de ajustes, a fim de se obter a melhor curva que represente as tendências de longos períodos associadas ao ritmo de crescimento de cada série, na qual é efetuado o procedimento da padronização, através do qual é obtido o índice da espessura dos anéis de crescimento das árvores. Nas análises espectrais foram utilizados os métodos da máxima entropia e da regressão iterativa. Os resultados obtidos pelas análises espectrais mostram periodicidades próximas aos ciclos solares de 11 anos, de Hale, e do segundo harmônico do ciclo de 11 anos em 5,5 anos para todos os locais de coleta. Também se encontrou periodicidades pertencentes aos ciclos solares de 52 anos e Gleissberg, para as amostras de Concórdia – SC e na Cordilheira da Costa de Osorno - Chile. Também se observou eventos do El Niño para períodos em torno de 4 e 7 anos.

RECORD OF THE SOLAR ACTIVITY AND OF OTHER GEOPHYSICAL PHENOMENONS IN TREE RING

ABSTRACT

Tree ring studies are usually used to determine or verify climatic factors which prevail in a given place or region and may cause tree ring width variations. Few studies are dedicated to the geophysical phenomena which may underlie these tree ring width variations. In order to look for periodicities which may be associated to the solar activity and/or to other geophysical phenomena which may influence tree ring growth, a new interactive image analysis method to measure tree ring width was developed and is presented here. This method makes use of a computer and a high resolution flatbed scanner; a program was also developed in Interactive Data Language (IDL 5.0) to study ring digitized images and transform them into time series. The main advantage of this method is the tree ring image interactive analysis without needing complex and high cost instrumentation. Thirty-nine samples were collected: 12 from Concórdia – S. C., 9 from Canela – R. S., 14 from São Francisco de Paula – R. S., one from Nova Petrópolis – R. S., 2 from São Martinho da Serra – R. S. e one from Chile. Fit functions are applied to ring width time series to obtain the best long time range trend (growth rate of every tree) curves and are eliminated through a standardization process that gives the tree ring index time series from which is performed spectral analysis by maximum entropy method and iterative regression. The results obtained show periodicities close to 11 yr, 22 yr Hale solar cycles and 5.5 yr for all sampling locations 52 yr and Gleissberg cycles for Concórdia – S. C. and Chile samples. El Niño events were also observed with periods around 4 e 7 yr.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	21
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	23
CAPÍTULO 2 – ATIVIDADE SOLAR E ANÉIS DE CRESCIMENTO DE ÁRVORES	27
2.1 – Registros da atividade solar	27
2.1.1 – Observações diretas	27
2.1.2 – Observações indiretas	28
2.2 – Fenômenos geofísicos nos anéis de crescimento	29
2.2.1 – Atividade solar	30
2.3 – Anéis de crescimento de árvores	35
2.3.1 – Estrutura interna do tronco das árvores	35
2.3.2 – Métodos de estudos	37
2.3.2.1 – Densidade do lenho	37
2.3.2.2 – Espessura do anel de crescimento	38
2.3.3 – Fatores limitantes	38
2.3.4 – Seleção do local	39
2.3.5 – Datação cruzada	40
2.3.6 – Agregação no crescimento da árvore	41
2.3.7 – Réplica	42
2.3.8 – Padronização	42
2.3.9 – Índice da espessura do anel de crescimento	43
CAPÍTULO 3 - COLETA E TRATAMENTO DAS AMOSTRAS	45
3.1 – Coleta das amostras	45
3.2 – Locais das coletas	46
3.3 – Espécies e números de amostras coletadas	47
3.3.1 – Amostras de Concórdia	48
3.3.2 – Amostras de Canela	49
3.3.3 – Amostras de São Francisco de Paula	50
3.3.4 – Amostras de Nova Petrópolis e São Martinho da Serra	51
3.4 – Tratamento das amostras	51

CAPÍTULO 4 – DIGITALIZAÇÃO E TRATAMENTO DAS IMAGENS	55
4.1 - Introdução	55
4.2 – Digitalização das amostras	57
4.2.1 – Obtenção das imagens	58
4.2.2 – Resolução das imagens	59
4.3 – Tratamento das imagens	59
4.4 – Série temporal da espessura de anéis de crescimento	67
CAPÍTULO 5 - ANÁLISE E RESULTADOS	69
5.1 – Série temporal das amostras de árvores	69
5.2 – Curvas de ajustes	73
5.3 – Padronização dos anéis de crescimento de árvores	73
5.4 – Análise espectral dos anéis de crescimento de árvores	77
5.5 – Resultados das análises espectrais	78
5.6 – Atividade solar observada nos anéis de crescimento	85
5.7 – Outros fenômenos nos anéis de crescimento de árvores	87
5.8 – Cronologia dos anéis de crescimento antes de 1797	88
5.9 – Resultados das periodicidades	91
5.10 – Comparações com outros registros naturais	92
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES	99
6.1 – Metodologia	99
6.1.1 – Coletas e tratamentos das amostras	99
6.1.2 – Digitalizações e tratamentos das imagens	99
6.1.3 – Curvas de ajustes	100
6.2 – Periodicidades observadas em anéis de crescimento	100
6.2.1 – Ciclo solar de 11 anos	100
6.2.2 – Ciclo solar de 22 anos	102
6.2.3 – Ciclo solar de 52 anos	103
6.2.4 – Ciclo solar de Gleissberg	103
6.2.5 – Ciclo solar de 5 anos	104
6.2.6 – Eventos El Niño	105
6.3 – Estatística dos sinais de frequências	106
6.4 – Conclusão geral	108
6.5 – Trabalhos futuros	110
6.5.1 – Metodologia	110
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
APÊNDICE A – ANÁLISE ESPECTRAL	123
APÊNDICE B – FUNÇÕES DE AJUSTES	129

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Espectro do número anual médio das manchas solares	24
2.1 Média anual do número de manchas solares	28
2.2 O mínimo de Maunder é visível entre os anos de 1645 a 1710 nas variações da razão de produção do ¹⁴ C	29
2.3 Imagem dos anéis de crescimento de árvores da espécie <i>Eberswalde</i> , da Alemanha. O máximo no número de manchas solares (representados por um ponto escuro nos anéis de crescimento) foram marcados iniciando-se pelo ano de 1830 (da esquerda para a direita)	30
2.4 Imagem dos anéis de crescimento de árvores da espécie <i>Eberswalde</i> , da Alemanha. O máximo no número de manchas solares (representados por um ponto escuro nos anéis de crescimento). A árvore foi cortada em 1912	30
2.5 Cronologia do índice da espessura de anel de crescimento, do <i>Picea engelmannii</i> , com média zero	32
2.6 Densidade espectral dos dados de anéis de crescimento de árvores, do espruce Engelmann, para o período de 1700 até 1987 d. C., com um nível de confiança em 95%	32
2.7 Espectros de potências da série do índice das espessuras de anéis de crescimento para os anos de: (a) 1673 – 1986; (b) 1700 – 1986; (c) 1800 – 1986; (d) 1900 – 1986. A linha tracejada representa os limites de confiança para 50% e 95%	34
2.8 Série da espessura dos anéis de crescimento com média de 5 anéis de crescimento	35
2.9 Imagem da estrutura interna do tronco de uma árvore, nas regiões de clima temperado	37
2.10 A figura mostra onde as condições são limitadas nos anéis de crescimento, devido a um ou mais fatores limitantes do crescimento da árvore	39

2.11	Em (A) têm-se os anéis de crescimento <i>complacentes</i> com o ambiente. (B) Os anéis de crescimento apresentam uma <i>sensitividade</i> a mudanças do ambiente	40
2.12	Esquema de como é feita a datação cruzada e como se estende uma cronologia no passado	41
2.13	(A) Exemplo de uma série temporal da espessura dos anéis de crescimento (CA) e a sua função de ajuste (curva em vermelho). (B) Série temporal do índice da espessura dos anéis de crescimento(I_t)	44
3.1	Obtenção de amostras diretamente do tronco de árvore derrubado	45
3.2	Obtenção de amostra do restante do tronco que ficou enraizado	46
3.3	Cidades escolhidas para as coletas das amostras de árvores	47
3.4	Mapa do Município de Concórdia mostrando os locais de coletas	49
3.5	Mapa do Município de Canela com os locais de coletas	50
3.6	Imagem de uma amostra antes de receber o tratamento	52
3.7	Imagem da amostra após o tratamento	53
4.1	Imagem de dois anéis de crescimento (base da figura) e de suas curvas de brilho (topo da figura). Na imagem dos anéis de crescimento, a linha branca vertical marca os contornos, e as faixas escuras verticais marcam a transição dos lenhos inicial – tardio. A linha branca horizontal marca o comprimento do Anel 1. A mancha escura no Anel 1 é um canal de resina. Na parte superior da figura está representado o comprimento total do Anel 1, bem como os comprimentos do lenho inicial e tardio. Também é apresentada o brilho máximo e médio do lenho inicial (símbolo ●), brilho médio e mínimo do lenho tardio (símbolo ▲), brilho médio total (símbolo ■). Áreas de tons de cinza escuro representam a transição do lenho inicial, e claro para o lenho tardio, para o Anel 2	56
4.2	Apresentação do programa TIIAA	61
4.3	Os processos de tratamento da imagem	62
4.4	Imagem após os processos de tratamento	62

4.5	Imagem na qual será selecionada uma região de interesse	63
4.6	Região selecionada para digitalização dentro da imagem	63
4.7	A janela mostra a região selecionada, da digitalização, junto com a imagem original (parte superior) e um gráfico dos tons de cinza em função do número de pixels (parte inferior)	66
4.8	As curvas em preto representam as espessuras dos anéis de crescimento (dado em pixels) em função do tempo para as imagens arv001, arv002, arv003, arv004, arv005, arv006, arv007, arv008, arv009. A curva em vermelho é a série média da espessura dos anéis de crescimento em função do tempo	68
5.1	Séries temporais da espessura dos anéis de crescimento das 12 amostras de árvores coletadas em Concórdia – SC	70
5.2	Séries temporais da espessura dos anéis de crescimento de 9 amostras de árvores coletadas em Canela – RS	70
5.3	Séries temporais da espessura dos anéis de crescimento de 14 amostras de árvores coletadas em São Francisco de Paula – RS	71
5.4	Série temporal da espessura dos anéis de crescimento obtida em uma amostra de árvore em Nova Petrópolis – RS	71
5.5	Séries temporais da espessura dos anéis de crescimento de 2 amostras de árvores coletadas em São Martinho da Serra – RS	72
5.6	Série temporal da espessura dos anéis de crescimento de árvores para uma amostra proveniente do Chile	72
5.7	Séries temporais do Índice da Espessura dos Anéis de Crescimento (IEAC) das amostras de árvores de Concórdia (curvas em preto) e a série temporal média da espessura dos anéis de crescimento, com 200 anos, representativa do local (curva em vermelho)	74
5.8	Séries temporais do Índice da Espessura dos Anéis de Crescimento (IEAC) das amostras de árvores de Canela (curvas em preto) e a série temporal média da espessura dos anéis de crescimento, com 49 anos, representativa do local (curva em vermelho)	74
5.9	Séries temporais do Índice da Espessura dos Anéis de Crescimento (IEAC) das amostras de árvores de São Francisco de Paula (curvas em	

preto) e a série temporal média da espessura dos anéis de crescimento, com 67 anos, representativa do local (curva em vermelho)	
5.10 Série temporal do Índice da Espessura dos Anéis de Crescimento (IEAC) da amostra de árvore de Nova Petrópolis, com 43 anos	75
5.11 Séries temporais do Índice da Espessura dos Anéis de Crescimento (IEAC) das amostras de árvores de São Martinho da Serra (curvas em preto) e a série temporal média da espessura dos anéis de crescimento, com 66 anos, representativa do local (curva em vermelho)	76
5.12 Série temporal do Índice da Espessura dos Anéis de Crescimento (IEAC) para a amostra de árvores do Chile, com 419 anos	76
5.13 Espectro da densidade de potência da cronologia média de Concórdia ...	79
5.14 Espectro da densidade de potência da cronologia média de Canela	79
5.15 Espectro da densidade de potência da cronologia média de São Francisco de Paula	80
5.16 Espectro da densidade de potência da cronologia de Nova Petrópolis ...	80
5.17 Espectro da densidade de potência da cronologia média de São Martinho da Serra	81
5.18 Espectro da densidade de potência da cronologia do Chile	82
5.19 Espectro de amplitude da cronologia média de Concórdia	83
5.20 Espectro de amplitude da cronologia média de Canela	83
5.21 Espectro de amplitude da cronologia média de São Francisco de Paula ..	84
5.22 Espectro de amplitude da cronologia de Nova Petrópolis	84
5.23 Espectro de amplitude da cronologia média de São Martinho da Serra ..	85
5.24 Espectro de amplitude da cronologia do Chile	
5.25 Espectro da densidade de potência da cronologia do Chile para os anos de 1575 a 1796	89
5.26 Espectro de amplitude da cronologia do Chile, para os anos de 1575 a 1796	89

5.27	Série temporal dos anéis de crescimento de árvores (curva em preto) e a sua tendência de crescimento (curva em vermelho), juntamente com a indicação da época do mínimo de Maunder, em 1645 a 1715	90
5.28	Variações do ^{14}C em anéis de crescimento de árvores de 1600 a 1940 (curva em preto) e a sua tendência de longo período (curva em vermelho)	93
5.29	Índice da espessuras dos anéis de crescimento do Colorado, de 1588 a 1987	93
5.30	Série temporal do nível do Rio Paraguai em Ladário – MS, de 1900 a 1997 (curva em preto) e a sua tendência de longo período (curva em vermelho)	94
5.31	Espectros da densidade de potência das séries temporais do $\Delta^{14}\text{C}$ (para os anos de 1797 a 1940), anéis de crescimento de árvores (para os anos de 1797 a 1987) e do nível do Rio Paraguai	94
5.32	Espectros de amplitude das séries temporais do $\Delta^{14}\text{C}$ (para os anos de 1797 a 1940), anéis de crescimento de árvores (para os anos de 1797 a 1987) e nível do Rio Paraguai	95
5.33	Espectros da densidade de potência das séries temporais do $\Delta^{14}\text{C}$ (para os anos de 1600 a 1796), anéis de crescimento de árvores (para os anos de 1588 a 1796)	98
5.34	Espectros de amplitude das séries temporais do $\Delta^{14}\text{C}$ (para os anos de 1600 a 1796), anéis de crescimento de árvores (para os anos de 1588 a 1796)	98
6.1	Estatística dos sinais de frequências dos espectros da densidade de potência das 39 amostras dos anéis de crescimento de árvores	107
6.2	Estatística dos sinais de frequências dos espectros de amplitude das 39 amostras dos anéis de crescimento de árvores	108

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Informações sobre a altitude, latitude e longitude dos locais de coletas ..	47
3.2 Informações sobre as amostras coletadas em cada cidade	48
3.3 Distribuição do número de amostras coletadas no Município de Concórdia	49
3.4 Distribuição do número de amostras coletadas no Município de Canela .	50
3.5 Distribuição do número de amostras coletadas na Floresta Nacional do IBAMA de São Francisco de Paula	51
4.1 Código adotado para identificar a resolução de cada imagem	59
5.1 Apresentação das periodicidades dos fenômenos geofísicos obtidas pelo método de máxima entropia para cada localidade	91
5.2 Apresentação das periodicidades dos fenômenos geofísicos obtidas pelo ARIST para cada localidade.....	91

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O mais conhecido aspecto da variabilidade solar é o ciclo de 11 anos, descoberto por A. N. Schwabe em 1843. Este ciclo se deve às inversões do campo magnético solar, que provocam periodicamente uma maior emissão de partículas e radiações, ou seja, um aumento da atividade solar.

Alguns fenômenos terrestres parecem ser influenciados pela variabilidade solar de curtas e longas escalas de tempo. Evidências estatísticas recentes, reunidas em alguns programas de pesquisas meteorológicas têm mostrado eventos cíclicos das águas, tal como uma oscilação quase bienal e uma com o ciclo solar de 11 anos. Dados obtidos por satélites sobre o máximo solar, desde o início de 1980, indicaram uma variação percentual de 0,1% na luminosidade solar sobre o ciclo de 11 anos, com uma emissão máxima para o período do máximo número de manchas solares (Wilson e Hudson, 1988).

Longas cronologias das variações da atividade solar têm sido reconstruídas a partir de uma variedade de fontes. Schrove (1955) usou registros históricos das observações das manchas solares e da atividade auroral para estimar as magnitudes e os anos em que ocorreu o máximo do número de manchas solares, desde o ano 300 D.C. Junto com o ciclo médio de 11 anos, ele identificou um ciclo de 78 anos (chamado ciclo de Gleissberg) na atividade das manchas solares e um ciclo de 200 anos para a atividade auroral. Segundo Schrove (1955), a amplitude média anual do número de manchas solares é também modulada sobre alguns ciclos solares. A análise espectral desses dados revelou um pico dominante em 11,11 anos, como mostra a Figura 1.1.

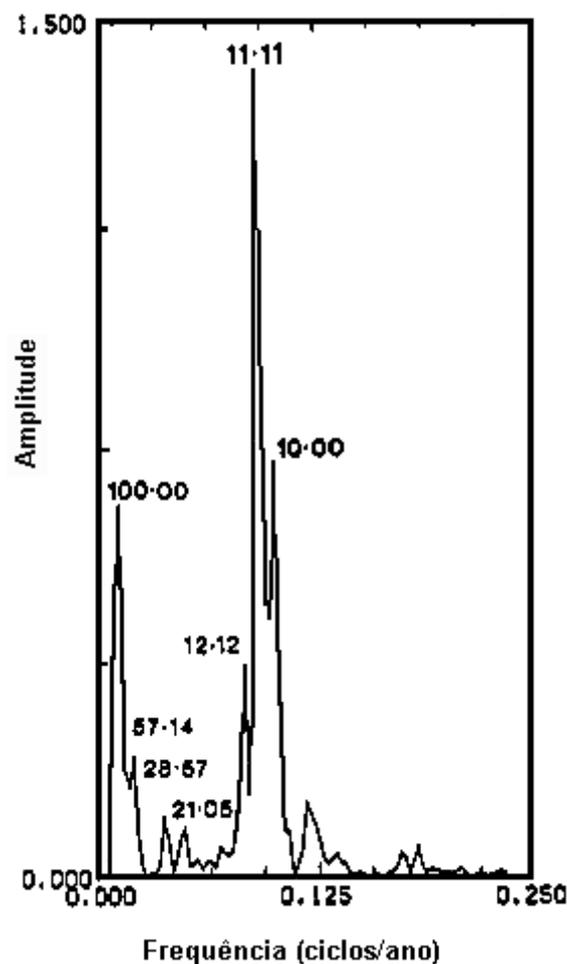


Fig. 1.1 - Espectro do número anual médio das manchas solares.
 FONTE: Murphy (1990, p. 294).

Mudanças nos níveis de ^{14}C atmosférico também têm sido relacionadas às variações da atividade solar. Um estudo feito por Stuiver e Quay (1980) sobre a variação relativa da atividade do ^{14}C , obtida através de amostras dos anéis de crescimento de árvores para algumas árvores da mesma espécie, a partir de diferentes lugares, formando uma cronologia de 860 anos, identificou três períodos de anomalia solar, que correspondem a uma possível ausência de manchas solares. Esses períodos são: o mínimo de Wolf, de 1282 a 1342 d.C.; o mínimo de Spörer, de 1416 a 1584 d.C., e o mínimo de Maunder, de 1645 a 1715 d.C. Sonett e Finney (1990), ainda estudando o ^{14}C , observaram um ciclo de 200 anos em um longo registro de ^{14}C , eles também encontraram curtos períodos de 80, 90 anos e 11 anos.

Cronologias dos índices de espessuras dos anéis de crescimento de árvores têm sido usadas como registro das variações dos ciclos solares no passado. Os modelos das variações da espessura dos anéis de crescimento geralmente indicam a presença de longos e curtos períodos na fase de crescimento. Em alguns casos, um significativo ciclo de 11 anos é evidente, com um pequeno atraso de tempo em relação ao ciclo solar. Normalmente, qualquer sinal solar é superposto sobre outros sinais mais importantes, que são as periodicidades climáticas (não relacionadas à atividade solar), que possuem uma influência intensa nos fatores de crescimento das árvores, tornando difícil a identificação direta da atividade solar, a partir das análises do índice da espessura do anel. No início do século, Douglass (1928) observou, a partir das medidas da espessura de anel dos pinheiros do Arizona, um período de crescimento retardado, de 1660 a 1720 D. C., que poderia estar associado com o mínimo de Maunder. Ele também observou pela primeira vez um período de 11,4 anos em anéis de crescimento de árvores da Prússia (Douglass, 1936). Intensas evidências para um sinal do ciclo solar de 11 anos em séries de anéis de crescimento de árvores, para Formosa, têm sido determinadas por Mori (1981) como resultado da investigação de duas cronologias diferentes.

Com tantas evidências de uma possível influência nas variações de crescimento dos anéis de crescimento de árvores devido à atividade solar, resolveu-se fazer uma procura de periodicidades associadas à atividade solar e a possíveis eventos El Niño, em séries temporais dos anéis de crescimento de árvores para a região sul do Brasil. Este trabalho também tem por objetivo desenvolver uma metodologia de estudo de baixo custo, toda ela computacional, que identifique e meça as espessuras dos anéis de crescimento de árvores, através de imagens digitalizadas por um digitalizador de mesa, transformando-as em séries temporais. Para isso, desenvolveu-se um programa computacional interativo, no ambiente do software Interactive Data Language (IDL). As análises das séries temporais foram feitas pelos métodos da máxima entropia, devido a sua grande precisão em determinar as frequências, e da regressão iterativa, através do programa ARIST (Análise por Regressão Iterativa de Séries Temporais)(Rigozo, 1994).

O Capítulo II apresenta uma revisão bibliográfica da literatura que descreve os registros e observações da atividade solar; e como esta pode ser estudada nas séries temporais de anéis de crescimento de árvores; os métodos de estudo dos anéis de crescimento das árvores, como é feita a padronização dos anéis de crescimento para se obter o índice dos anéis de crescimento de árvores.

O Capítulo III descreve, passo a passo, os procedimentos de coleta das amostras, bem como o tratamento dado a elas. Também serão mostrados os locais escolhidos para as coletas das amostras de árvores.

O Capítulo IV mostra os procedimentos para a digitalização das imagens das amostras. Também é mostrada uma descrição do funcionamento do programa interativo desenvolvido para o tratamento das imagens, bem como sua transformação em séries das espessuras dos anéis de crescimento de árvores.

O Capítulo V apresenta os procedimentos e resultados das análises das séries temporais das espessuras dos anéis. Os procedimentos detêm-se na obtenção da melhor curva de ajuste para cada série, de modo que as tendências indesejadas sejam eliminadas, a fim de se fazer a padronização e obter-se o índice da espessura dos anéis para se fazer a análise espectral pelos métodos da máxima entropia e da regressão iterativa.

O Capítulo VI apresenta as conclusões obtidas e as observações feitas durante a realização de cada etapa deste trabalho.

O Apêndice A descreve os métodos de análises por máxima entropia e da Análise por Regressão Interativa de Séries Temporais (ARIST).

O Apêndice B apresenta as funções de ajustes utilizadas na padronização dos anéis de crescimento na obtenção dos índices das espessuras dos anéis de crescimento de árvores.

CAPÍTULO II

ATIVIDADE SOLAR E ANÉIS DE CRESCIMENTO DE ÁRVORES

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica da literatura que descreve os registros e observações da atividade solar e como esta pode ser estudada nas séries temporais de anéis de crescimento de árvores, os métodos de estudo dos anéis de crescimento das árvores e como é feita a padronização dos anéis de crescimento para se obter o índice dos anéis de crescimento de árvores

2. 1 – REGISTROS DA ATIVIDADE SOLAR

O melhor e mais sólido registro da variabilidade solar é o número de manchas solares vistas na superfície do Sol (Eddy, 1980). Estes registros históricos podem ser divididos em observações diretas (através das manchas solares ou de outra característica do próprio Sol) e observações indiretas de fenômenos que são resultados das mudanças da atividade solar (como os cosmonuclídeos ^{14}C e ^{10}Be produzidos na atmosfera da Terra).

2. 1. 1 – OBSERVAÇÕES DIRETAS

Um registro completo do número anual médio das manchas solares foi feito por Waldmeier (1961) e Eddy (1976) entre os anos de 1610 a 1979, Figura 2.1. O ciclo de 11 anos das manchas solares apresenta diferenças em sua duração e forma. As durações dos ciclos variam de um mínimo de 8 anos a um máximo de 15 anos, e a média se apresenta em 11,1 anos (Eddy, 1980). O número anual médio das manchas solares, Figura 2.1, apresenta uma tendência quase cíclica, com um mínimo por volta de 1810 e talvez em 1700. Esta regularidade é conhecida como ciclo de Gleissberg, caracterizado por um período por volta de 80 anos (Eddy, 1980).

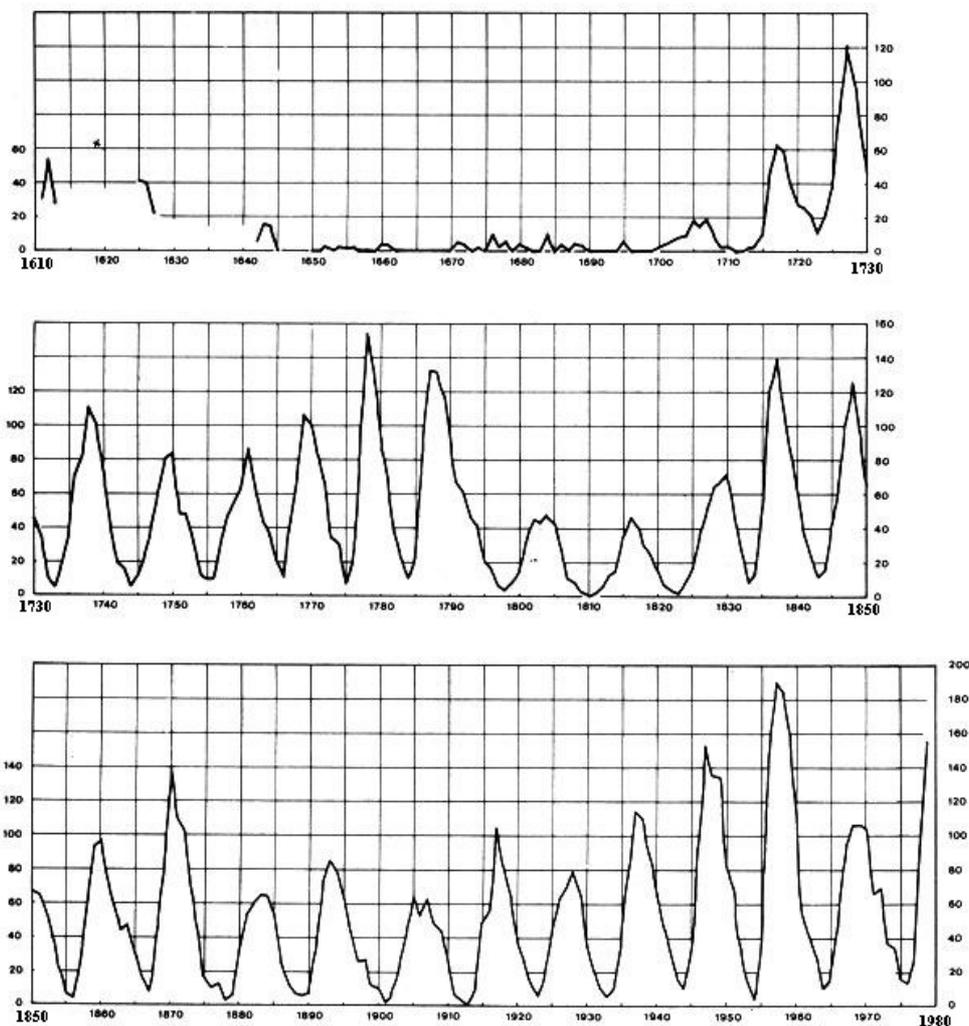


Fig. 2.1 – Média anual do número de manchas solares.
 FONTE: Eddy (1980, p.).

2. 1. 2 – OBSERVAÇÕES INDIRETAS

Através de observações e/ou dos registros indiretos tenta-se conhecer o comportamento da atividade solar no passado. Um dos períodos da história que mais intriga os cientistas está compreendido entre os anos de 1645 a 1715, conhecido como mínimo de Maunder, no qual acredita-se que a atividade solar apresentava-se muito baixa e que pode ter provocado um período de frio intenso na Europa e América do Norte, a chamada “pequena era glacial” (Eddy, 1976, 1977).

O mínimo de Maunder é claramente observado nos registros das variações na razão de produção do ^{14}C (Stuiver e Quay, 1980) e nas concentrações do ^{10}Be no gelo (McHargue e Damon, 1991; Beer et al., 1985). Nestes cosmonuclídeos observa-se uma maior produção na atmosfera da Terra para este período de baixa atividade solar (Figura 2.2).

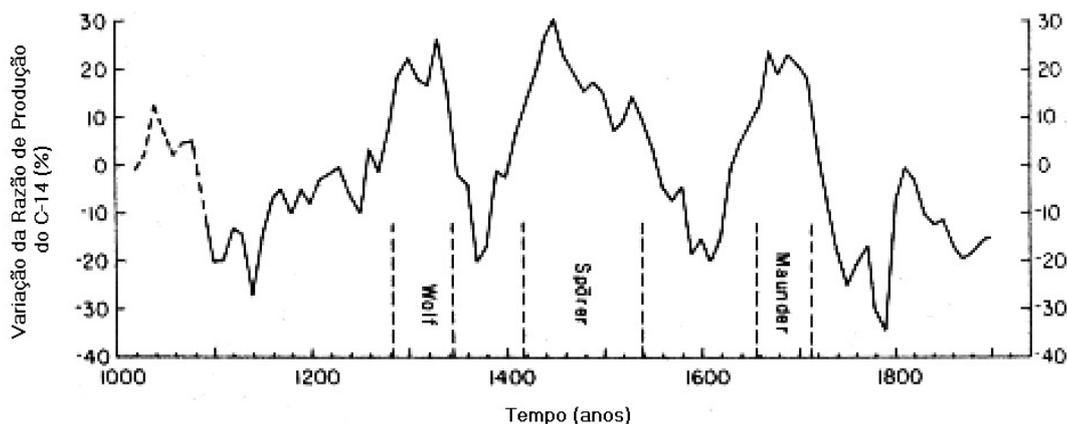


Fig. 2.2 – O mínimo de Maunder é visível entre os anos de 1645 a 1710 nas variações da razão de produção do ^{14}C .
FONTE: Stuiver e Quay (1980, p. 15).

2. 2 – FENÔMENOS GEOFÍSICOS NOS ANÉIS DE CRESCIMENTO

Os estudos dos anéis de crescimento de árvores são em sua maioria realizados para verificar ou determinar os fatores climáticos que estão atuando num local ou região, provocando variações nas espessuras de anel. Poucos estudos foram feitos para se verificar e/ou determinar os fenômenos geofísicos que possam causar variações nas espessuras de anéis de crescimento de árvores. Algumas pesquisas têm sido realizadas com o objetivo de se obter uma possível relação entre os anéis de crescimento de árvores e a atividade solar. A primeira pesquisa neste sentido foi realizada por Douglass (1936). Ele acreditava numa ligação entre as espessuras dos anéis de crescimento de árvores e o número de manchas solares. Nas Figs. 2.3 e 2.4 são mostradas duas seqüências de anéis de crescimento da espécie *Eberswalde*, da Alemanha, com os anos de máximo número de manchas solares (representado por um ponto nas imagens).

Observa-se nestas figuras que há um aumento no crescimento dos anéis para os anos de máximo no número de manchas solares, com um atraso de 2 anos aproximadamente.



Fig. 2.3 – Imagem dos anéis de crescimento de árvores da espécie *Eberswalde*, da Alemanha. A máxima no número de manchas solares (representadas por um ponto escuro nos anéis de crescimento) foram marcadas iniciando-se pelo ano de 1830 (da esquerda para a direita).
FONTE: Douglass (1936, p.).

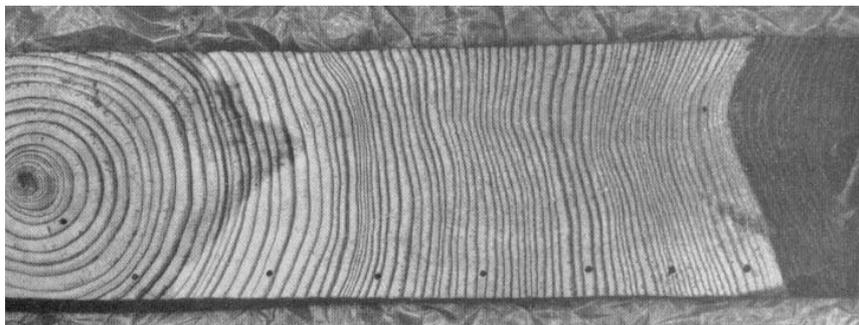


Fig. 2.4 - Imagem dos anéis de crescimento de árvores da espécie *Eberswalde*, da Alemanha. O máximo no número de manchas solares (representados por um ponto escuro nos anéis de crescimento). A árvore foi cortada em 1912 anos.
FONTE: Douglass (1936, p.).

2. 2. 1 – ATIVIDADE SOLAR

Alguns fenômenos terrestres parecem ser influenciados pelos curtos e longos períodos da variabilidade solar (Murphy, 1990). Com isso, longas cronologias das variações cíclicas da atividade solar têm sido reconstruídas a partir de uma grande variedade de fontes. Foram realizadas medidas de ^{14}C (Stuiver e Quay, 1980; Buchuladze et al., 1980; Stuiver e Braziunas, 1989; Sonett e Finney, 1990) em anéis de crescimento de árvores, cujos resultados corrigidos de seu decaimento radioativo, exibem flutuações em escalas seculares e decadal, que incluem o ciclo de 11 anos. Tais variações na atividade

solar também foram confirmadas a partir de dados do ^{10}Be em amostras de gelo (Beer et al., 1988).

Além de dados da atividade auroral, de ^{14}C e de ^{10}Be , usados para o estudo retrospectivo da atividade solar, tem-se usado medidas das espessuras de anéis de crescimento de árvores. LaMarche e Fritts (1972) empreenderam um exame sistemático de 49 cronologias, selecionadas no Canadá, Estados Unidos e México. Eles não encontraram qualquer evidência consistente de uma relação entre as manchas solares e as cronologias de anéis de crescimento de árvores. Eles concluíram que provavelmente seria improdutivo dar continuidade a estas pesquisas para associar séries temporais dos índices de anéis de crescimento de árvores com registros das manchas solares. Entretanto, Mori (1981) identificou um significativo ciclo de 11 anos, em uma série temporal das medidas de anéis de crescimento, determinada a partir de alguns raios sobre um único disco, obtido de uma árvore crescendo em um lugar de alta altitude em Formosa. As análises espectrais cruzadas com dados solares demonstraram um alto nível de coerência para uma frequência próxima de 11 anos, com um tempo de atraso de 2,8 anos.

Murphy e Veblen (1992) estudaram 25 amostras do *Picea engelmannii*, coletadas em uma altitude de 3200m e localizadas no lado oposto do rio Cache la Poudre no noroeste de Rocky Mountain Park, Colorado. Obteve-se uma cronologia entre os anos de 1588 até 1987 d. C. para o índice dos anéis de crescimento de árvores (Figura 2.5). Como curva de ajuste para a padronização foi adotada uma linha reta horizontal, passando sobre a espessura média dos anéis de crescimento.

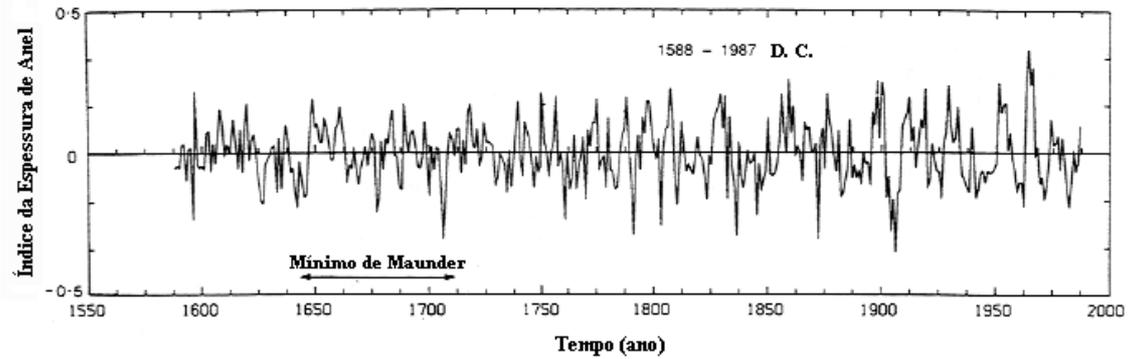


Fig. 2.5 – Cronologia do índice da espessura de anel, do *Picea engelmannii*, com média zero.

FONTE: Murphy e Veblen (1992, p. 65).

A Figura 2.6 mostra o espectro de amplitude da série temporal do índice das espessuras de anéis de crescimento, Figura 2.5. Murphy e Veblen (1992) constataram a presença de um forte sinal de 11 anos, para o período de 1700 até 1987 d.C. Mori (1981) atribuiu este tipo de sinal ao ciclo de 11 anos da atividade solar.

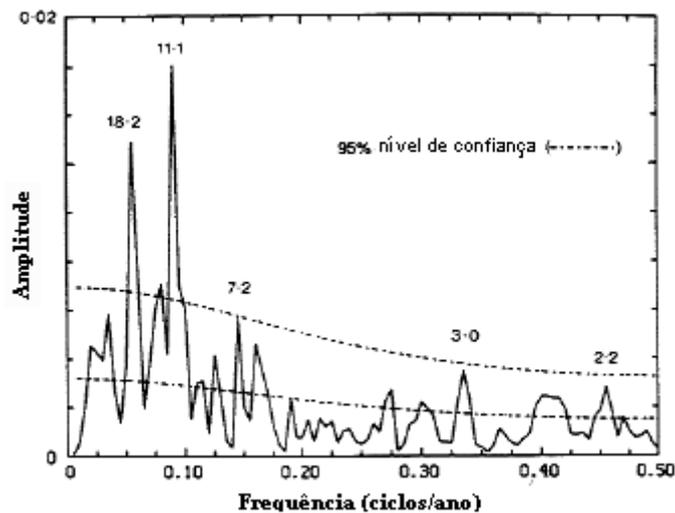


Fig. 2.6 – Densidade espectral dos dados de anéis de crescimento de árvores, do espruce Engelmann, para o período de 1700 até 1987 d. C., com um nível de confiança em 95%.

FONTE: Murphy e Veblen (1992, p. 65).

Murphy et al. (1994) estudaram outras séries dos índices da espessura dos anéis de crescimento do *Picea engelmannii*, em Ripple Creek Pass, obtendo uma cronologia

entre 1673 a 1986 anos para 32 amostras. Foi usado um ajuste polinomial na padronização das espessuras de anéis de crescimento e foi aplicado na série um filtro passa alta de 30 anos.

Eles encontraram, através das análises espectrais, fortes evidências para os ciclos de 11 anos da atividade solar e o ciclo de 22 anos – conhecido como ciclo de Hale -, também da atividade solar. A Figura 2.7 mostra os espectros de potências obtidos por eles para o intervalo de tempo entre os anos de 1673 - 1986 (a), 1700 - 1986 (b), 1800 - 1986 e para 1900 – 1986, para os limites de confiança de 50% e 95%. Na figura (b) observa-se uma contínua extensão do ciclo de 22 anos e a partir de 1880 há uma perda do ciclo, figuras (c) e (d). Também constataram que o ciclo de 11 anos é mais dominante depois de 1880, Figs. 2.7 (c) e (d).

Estudos de amostras geológicas de árvores, para um período entre 15 a 20 milhões de anos, feito por Kurths et al. (1993), também mostraram evidências de períodos pertencentes à variação solar. As árvores estudadas foram identificadas como sendo da espécie *Taxodioxylon gypsaceum*, que corresponde à recente *Sequoia sempervirens*. As amostras foram encontradas em minas de linhita em Lusatia, Alemanha. A Figura 2.8 mostra a série da espessura dos anéis de crescimento obtida nas amostras encontradas.

Kurths et al. fizeram as análises espectrais pelos métodos de Fourier (FFT) e da máxima entropia (MEM). Na série foi removida a tendência de longo período, através da subtração de uma função polinomial de quinta ordem e, logo depois, a nova série foi suavizada pelo deslocamento da média de 3 a 5 anos. Na análise espectral pelo método de Fourier, foi usado o filtro passa alta na seqüência das espessuras de anéis de crescimento, obtendo-se um forte sinal de 12,7 anos (atribuído ao ciclo solar de 11 anos) e 16,9 anos, para um nível de confiança de 99 anos. O espectro de potência obtido pelo método da máxima entropia, mostra evidências para alguns ciclos pertencentes à atividade solar, com períodos de 12,6 anos, 53 anos, 150 anos e 220 anos e um sinal em 17,1 anos .

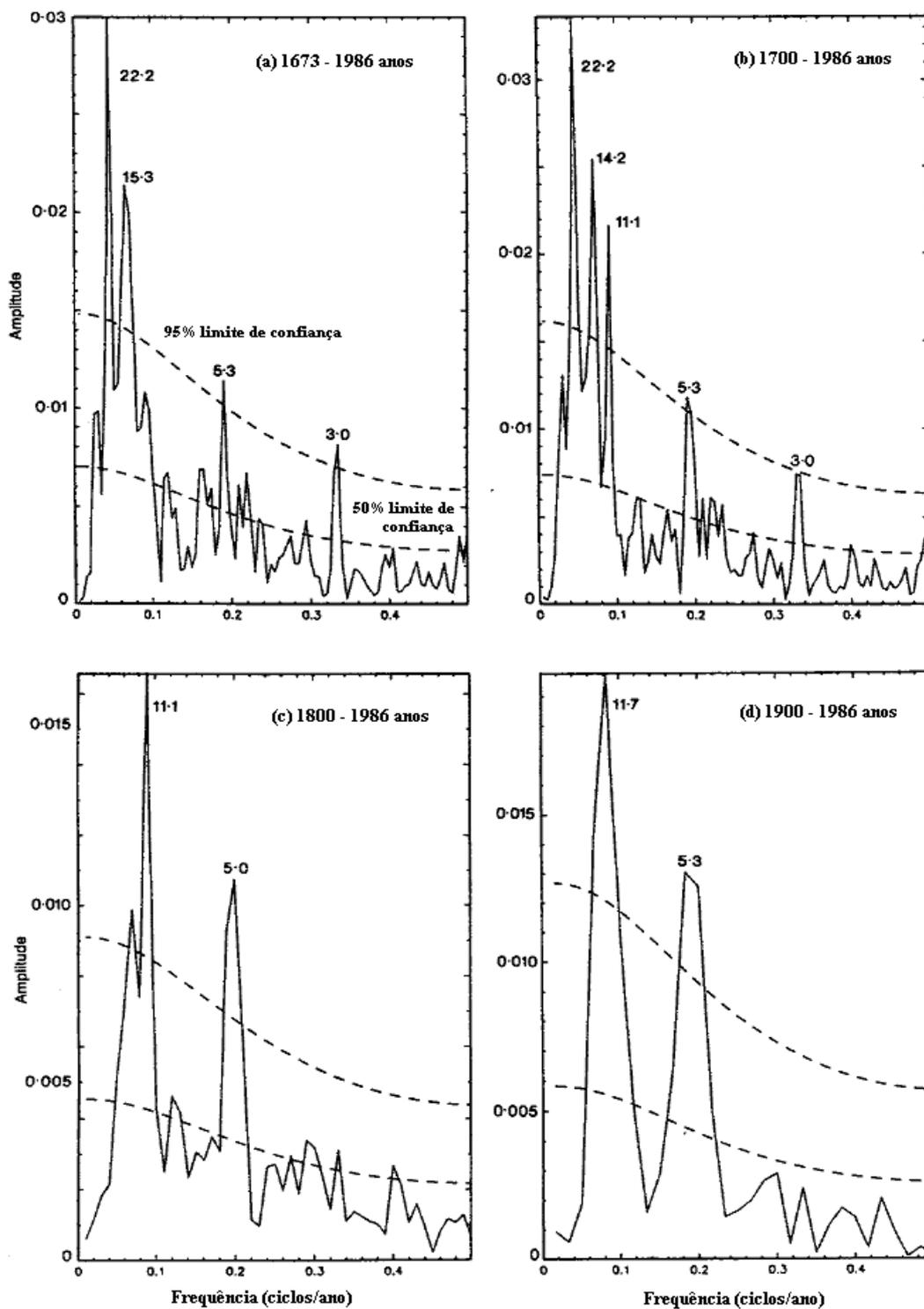


Fig. 2.7 – Espectros de potências da série do índice das espessuras de anéis de crescimento para: (a) 1673 – 1986 anos; (b) 1700 – 1986 anos; (c) 1800 – 1986 anos; (d) 1900 – 1986 anos. A linha tracejada representa os limites de confiança para 50% e 95%.

FONTE: Murphy et al. (1994, p. 160).

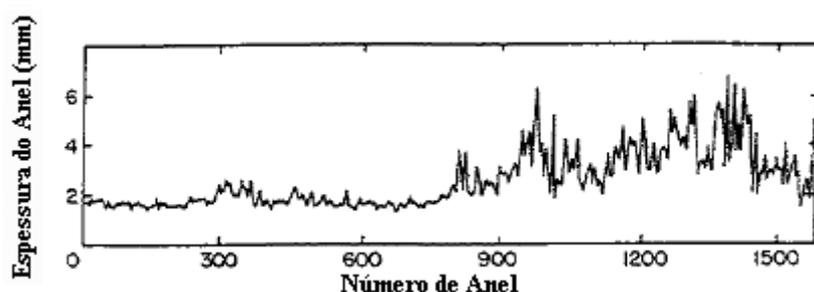


Fig. 2.8 – Série da espessura dos anéis de crescimento com média de 5 anéis de crescimento.

FONTE: Kurths et al. (1993, p. 360).

O interessante deste estudo é que a série temporal dos anéis de crescimento não passou pelo processo de padronização, no entanto apresentou excelentes resultados nas análises espectrais.

2.3 – ANÉIS DE CRESCIMENTO DE ÁRVORES

Como mostrado anteriormente, fica clara a existência de uma possível influência dos fenômenos geofísicos, como a atividade solar, nos anéis de crescimento de árvores. Assim, para se estudar estes registros da atividade solar nos anéis de crescimento é necessário conhecer alguns conceitos da dendrocronologia.

2.3.1 – ESTRUTURA INTERNA DO TRONCO DAS ÁRVORES

O tronco das árvores possui uma casca interna e uma externa. A casca externa é composta por células mortas, que protegem o tecido vivo do tronco e é chamada, na botânica, de *ritidoma*. A casca interna, ou *floema*, é composta de células vivas, através das quais vários materiais orgânicos são transportados entre o sistema tronco-raiz.

O interior do tronco é formado pelo lenho secundário e é dividido em: *alburno* (ou lenho vivo), de coloração clara, situado externamente; e *cerne* (ou lenho morto) de cor escura, localizado no centro do tronco.

A fina camada existente na interface entre a casca e o lenho do tronco é chamada de *câmbio* (Figura 2.9). Ela gera a *floema* para fora e o *xylema* (lenho) para dentro. A camada cambial consiste do tecido merismático. O crescimento de uma árvore ocorre a partir da divisão das células no tecido merismático do *câmbio*.

O lenho apresenta uma série de finos círculos concêntricos, bastante regulares, que são denominados de *anéis anuais de crescimento*. Tais anéis de crescimento são compostos de duas faixas de tecidos; uma interna, mais clara, leve e porosa, que se forma primeiro e é chamada de *lenho inicial* (earlywood); e outra externa, mais escura e densa, que se forma depois e é chamada de *lenho tardio* (latewood). O lenho inicial é formado durante a primavera, onde ocorre a maior parte do aumento de células e conseqüentemente do diâmetro da árvore, e o lenho tardio, em seguida, no final do verão (donde os nomes de lenho primaveril e outonal).

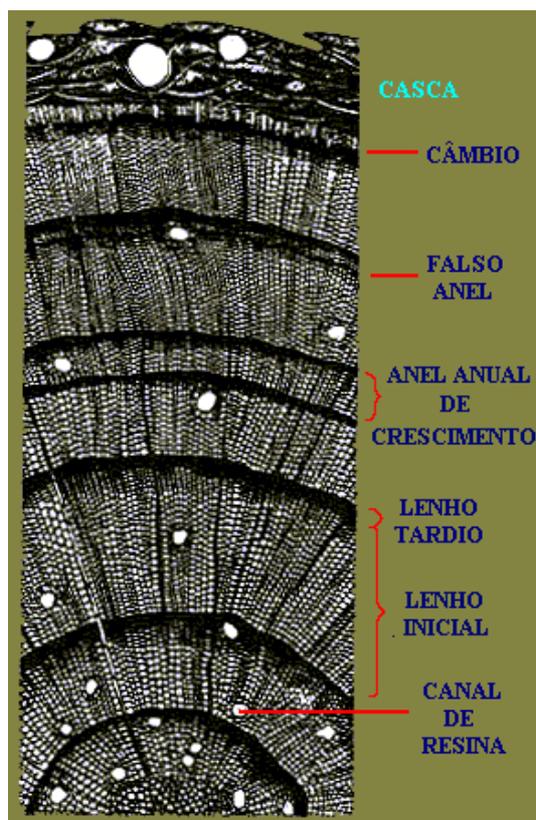


Fig. 2.9 – Imagem da estrutura interna do tronco de uma árvore, nas regiões de clima temperado.
FONTE: Fritts (1976, p. 59).

2. 3. 2 – MÉTODOS DE ESTUDOS

A obtenção de informações climáticas ou não climáticas nos anéis de crescimento de árvores está baseada entre as diferenças nas espessuras, que variam de um ano a outro. Essas mesmas informações também podem ser obtidas a partir da densidade, cujo parâmetro varia como uma função do tamanho e da espessura da membrana das células. Ambos os métodos de obtenção dessas informações apresentam as variações diárias e sazonais na razão de crescimento das árvores, que são afetadas pelas condições ambientais.

2. 3. 2. 1 – DENSIDADE DO LENHO

O desenvolvimento de métodos de medidas de densidades tem aberto um novo campo no estudo de árvores. Pesquisas têm mostrado que a densidade do lenho pode ser afetada por fatores diferentes dos que afetam a espessura dos anéis de crescimento. Em muitos casos, as variações de densidade são mais sensíveis às mudanças ambientais que as variações de espessura dos anéis de crescimento (Hugues et al., 1982).

Para o propósito da dendroclimatologia, o melhor estudo é realizado através do parâmetro da máxima densidade do *lenho tardio*. Este parâmetro representa a densidade máxima das células geradas no fim do crescimento sazonal, quando o lenho denso é formado.

Atualmente o principal método utilizado para medidas de densidades do lenho é devido aos Raios X. Esse método foi desenvolvido por Polge (1963, 1966) e melhorado por Parker e Hensch (1971) e Lenz, et al. (1976). Ele é aplicado praticamente em todos os campos de pesquisa da madeira. A técnica dos raios X tem ajudado os cientistas a estudar amostras de madeiras das regiões boreais e temperadas, especialmente a madeira da espécie *conífera*. No Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA) é utilizado o método da absorção gama, para medir as densidades do lenho (Martins et al., 1993).

2. 3. 2. 2 – ESPESSURA DO ANEL DE CRESCIMENTO

Medidas da espessura de anéis de crescimento geralmente não apresentam problemas. O aumento anual do crescimento radial é facilmente medido pelo exame da espessura dos anéis de crescimento, o que ajuda a conhecer onde e como o anel foi formado. Mede-se o crescimento que ocorreu num intervalo de tempo, durante o crescimento sazonal. Isto pode ser avaliado desde o centro da madeira, tempo inicial, até à casca, tempo final. Este intervalo de tempo, mediante o número de anéis de crescimento contido nele, também representa a idade da amostra da árvore. Assim, o número de anéis de crescimento que uma árvore possui representa a idade da árvore.

Ao datar uma árvore deve-se tomar alguns cuidados com os falsos anéis de crescimento (Figura 2.9) e/ou com a ausência de alguns anéis de crescimento, para se evitar atribuir uma idade falsa aos anéis de crescimento da árvore. Isto também levaria a uma falsa informação sobre as condições ambientais, às quais a árvore esteja sujeita. Para evitar estes problemas, os anéis de crescimento devem estar bem visíveis e de fácil exame. Isto é obtido após um processo de preparação ou tratamento da amostra.

2. 3. 3 – FATORES LIMITANTES

A bem conhecida lei biológica ou princípio de fatores limitantes é conhecida como: um processo biológico tal como o crescimento pode ocorrer tão rápido quanto for permitido pelo fator que for mais limitante (Fritts, 1976) (Figura 2.10). O grau e a duração de seus efeitos variam de um ano para o outro. Se um fator mudar, de tal forma que ele não seja mais limitante, a razão de processos da planta deve aumentar até que algum outro fator se torne limitante.

Onde as Condições são Limitadas:



Fig. 2.10 – A figura mostra onde as condições são limitadas nos anéis de crescimento, devido a um ou mais fatores limitantes do crescimento da árvore.

Este princípio é importante para a dendrocronologia, porque as espessuras de anéis de crescimento podem ser usadas na datação cruzada somente se um ou mais fatores ambientais tornarem-se criticamente limitantes, persistindo por um longo tempo e atuando sobre uma larga área geográfica, causando variações nas espessuras dos anéis de crescimento ou em outras características de algumas árvores.

Esse princípio sugere que os anéis de crescimento estreitos dão uma informação mais precisa sobre as condições climáticas limitantes do que os anéis de crescimento largos. Durante os anos, nos quais os anéis de crescimento são geralmente largos, os fatores podem se tornar limitantes com diferentes graus de intensidade em cada árvore. Isto depende do local e de uma grande variedade de fatores não climáticos. Disto resulta uma considerável variação no modelo de crescimento de árvore para árvore.

2.3.4 – SELEÇÃO DO LOCAL

Para identificar e selecionar as árvores que foram aptas a produzir séries de anéis de crescimento sensíveis à variável ou às variáveis ambientais que se deseja examinar (Hughes, 1982). A Figura 2.11B mostra uma árvore crescendo num local de difícil disponibilidade de água. Como o fator limitante para esse local é a água, os anéis de crescimento apresentam variações visíveis nas suas espessuras. Neste caso, diz-se que os anéis de crescimento apresentam uma *sensitividade* a mudanças no ambiente. Já a Figura 2.11A mostra uma árvore num local favorável ao crescimento, ou seja, onde não

existe nenhum fator limitante. Portanto, os anéis de crescimento, para essa árvore, não apresentam nenhuma variação de espessura. Nesse caso eles são *complacentes* com o ambiente.

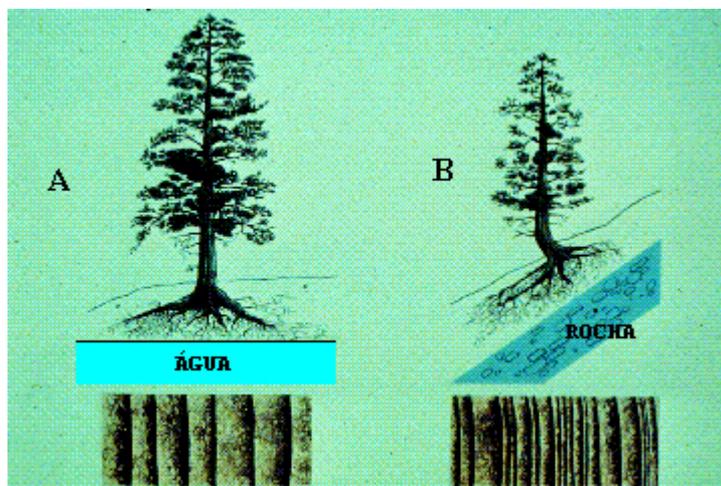


Fig. 2.11 – Em (A) têm-se os anéis de crescimento *complacentes* com o ambiente. Em (B) os anéis de crescimento apresentam uma *sensitividade* a mudanças do ambiente.

FONTE: Grissino-Mayer (1996, internet).

2.3.5 – DATAÇÃO CRUZADA

A datação cruzada significa igualar os modelos de anéis de crescimento anuais largos e estreitos de uma árvore com modelos correspondentes em outras árvores, permitindo a identificação exata do ano em que cada anel de árvore foi formado. Ela permite a identificação de falsos anéis de crescimento e a constatação da ausência de anéis de crescimento em uma árvore ou em espécies de árvores (Fritts, 1976). A datação cruzada é possível devido às mesmas (ou similares) condições ambientais terem limitado as espessuras de anéis de crescimento em um grande número de árvores. Isto também possibilita estender para o passado uma cronologia e datar amostras de árvores de idades desconhecidas (Figura 2.12).

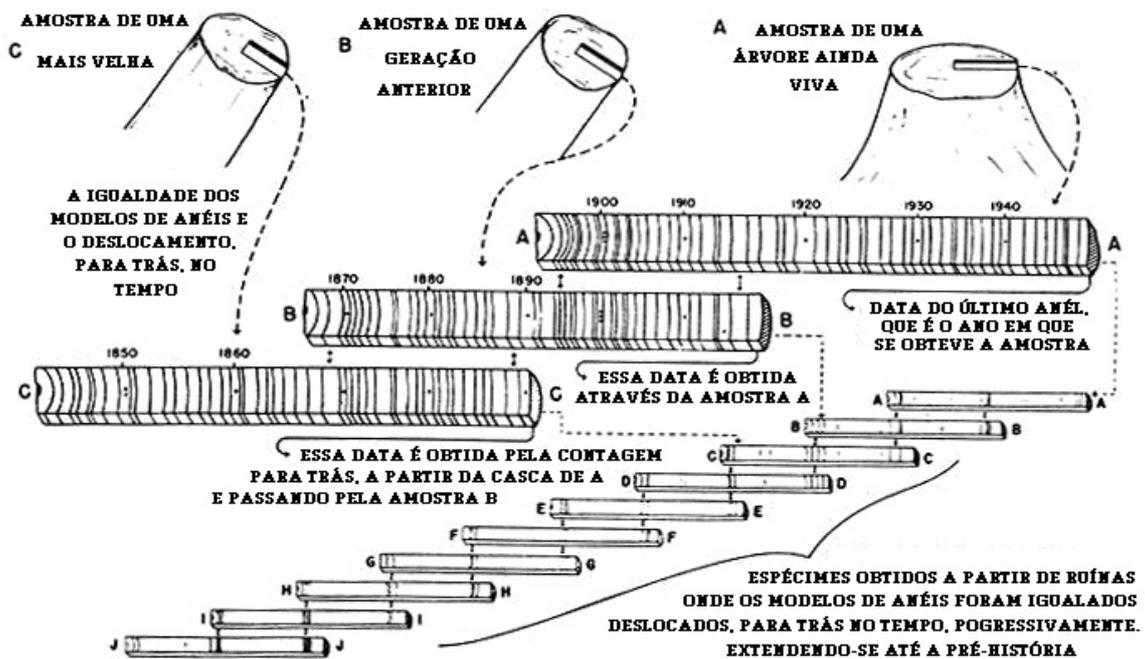


Fig. 2.12 –Esquema de como é feita a datação cruzada e como se estende uma cronologia no passado.
 FONTE: Fritts (1976, p. 3).

2. 3. 6 – AGREGAÇÃO NO CRESCIMENTO DA ÁRVORE

Qualquer série de crescimento de uma árvore pode ser decomposta em um agregado de fatores ambientais que podem afetar o modelo de crescimento da árvore com o tempo. Assim sendo, o crescimento do anel de crescimento da árvore para qualquer ano é uma função de diversos fatores como:

1. a tendência de crescimento (chamada de ritmo de crescimento) da árvore com a idade;
2. os fatores climáticos;
3. os que estão dentro de uma floresta. Exemplo: derrubada de árvores;
4. os que se localizam dentro e/ou fora da floresta. Exemplo: fogo, insetos;

5. os processos aleatórios (ruídos).

Os fatores agregados listados acima podem ser expressos pela equação:

$$CA_t = A_t + B_t + C_t + D_t + E_t \quad (2.1)$$

Onde: CA_t é o crescimento de anel em um ano (t) qualquer, sendo função de: A , tendência de crescimento com a idade da árvore; B , o clima; C , processos de distúrbios dentro da floresta; D , a processos de distúrbios fora da floresta; E , processos aleatórios (ou ruídos).

2.3.7 – RÉPLICA

É o processo no qual se maximiza o sinal ambiental que se deseja estudar, minimizando a quantidade de ruído através da aquisição de mais de uma amostra por árvore e mais de uma árvore por lugar (Baillie, 1982). Quando se obtém mais de uma amostra por árvore, reduz-se a quantidade do sinal ambiental peculiar a uma única árvore. Enquanto que a obtenção de mais de uma árvore por local, ou região, reduz a quantidade de ruído de fatores ambientais indesejados, característicos do lugar. Assim, a média de medidas das réplicas – a partir de um grande número de árvores – fornece a melhor estimativa dos fatores ambientais que se deseja estudar.

2.3.8 - PADRONIZAÇÃO

A padronização efetua a remoção dos sinais não climáticos em uma série: sinais que incluam qualquer tendência de crescimento biológico (A), sinais perturbados da árvore (C e D), ou ambos (Eq. 2.1). Isto é feito por um ajuste de curva.

Decisões sobre o tipo de curva para o ajuste de uma série nem sempre é simples. Necessita-se ter o máximo de informações possíveis sobre as amostras coletadas; posição na história, características do lugar e características das espécies utilizadas. Um

dilema comum esta em se decidir quais características de crescimento nas séries representam fatores climáticos ou não climáticos. Este tipo de decisão se obtém através de uma comparação com várias árvores da mesma espécie, ou entre diferentes espécies (princípio da réplica, item 2.4.7). Esta comparação entre árvores se faz para o mesmo local ou até região onde as características de crescimento são comuns.

Uma variedade de funções que representam o crescimento biológico tem sido usada para o processo de ajuste de curva, como funções parabólicas, hiperbólicas, logarítmicas, polinomiais, exponenciais e média móvel.

2. 3. 9 – ÍNDICE DA ESPESSURA DO ANEL DE CRESCIMENTO

Após determinada a melhor curva de ajuste para as mudanças de crescimento, que estão associadas ao aumento da idade da árvore, as medidas das espessuras dos anéis de crescimento (CA_t), Figura 2.8, são convertidas no índice de espessura do anel padronizado (I_t), Figura 2.9. Isto é feito através da divisão de cada espessura de anel, para um ano t , pela tendência de crescimento (Y_t)(Schweingruber, 1988), como mostra a equação:

$$I(t) = \frac{CA(t)}{Y(t)} \quad (2.9)$$

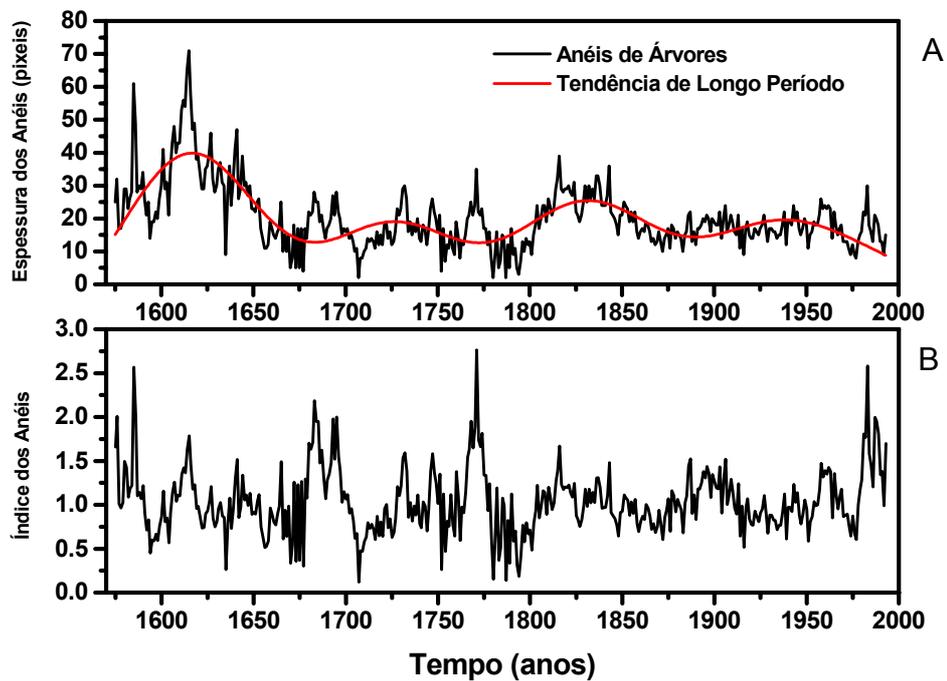


Fig. 2.13 – (A) Exemplo de uma série temporal da espessura dos anéis de crescimento (CA) e a sua função de ajuste (curva em vermelho). (B) Série temporal do índice da espessura dos anéis de crescimento(I_t).

CAPÍTULO III

COLETA E TRATAMENTO DAS AMOSTRAS

Este capítulo tem por objetivo descrever passo a passo os procedimentos da coleta das amostras, bem como o tratamento dado a elas. Também serão mostradas as vantagens e desvantagens de cada procedimento aplicado, desde a coleta até o tratamento das amostras.

3.1 - COLETA DAS AMOSTRAS

Na coleta das amostras dos anéis de crescimento de árvores foram obtidas amostras de árvores no formato de disco do tronco. Adotou-se duas maneiras de obtenção das amostras: 1- obtenção da amostra diretamente do tronco derrubado (Figura 3.1) e o 2- obtenção da amostra do restante do tronco, que ficou enraizado no solo (Figura 3.2).

Os discos cortados possuem diâmetros com tamanhos variados e as espessuras com aproximadamente 5 cm de altura no máximo. Todas as amostras coletadas foram cortadas com uma moto-serra.



Fig. 3.1 – Obtenção de amostras diretamente do tronco de árvore derrubado.



Fig. 3.2 – Obtenção de amostra do restante do tronco que ficou enraizado.

3.2 – LOCAIS DAS COLETAS

Na escolha dos locais de coletas, levou-se em conta as espécies de árvores propícias para este tipo de estudo, regiões que apresentassem claramente as variações climáticas e a disponibilidade do município ou do Estado, dependendo do lugar de coleta das amostras. Assim, os lugares escolhidos estão localizados na região sul do Brasil: no município de Concórdia, no Estado de Santa Catarina, os municípios de Nova Petrópolis, Canela, São Francisco de Paula e São Martinho da Serra, no Estado do Rio Grande do Sul. Também obteve-se uma amostra do sul do Chile. A Figura 3.3 mostra um mapa com as localizações aproximadas das cidades no sul do Brasil. A tabela 3.1 mostra a altitude, latitude e longitude dos locais.



Fig. 3.3 – Cidades escolhidas para as coletas das amostras de árvores.

TABELA 3.1 – INFORMAÇÕES SOBRE A ALTITUDE, LATITUDE E LONGITUDE DOS LOCAIS DE COLETAS

Cidades	Altitude (m)	Latitude (S)	Longitude (O)
Concórdia	640	27° 11'	51° 59'
Canela	790	29° 18'	50° 51'
Nova Petrópolis	579	29° 20'	51° 10'
São Francisco de Paula	930	29° 25'	50° 24'
São Martinho da Serra	484	29° 30'	53° 53'
Cordilheira da Costa de Osorno - Chile	800-1200	41° 00'	73° 50'

3.3 – ESPÉCIES E NÚMEROS DE AMOSTRAS COLETADAS

Foram feitos levantamentos para determinar as espécies de árvores que poderiam ser utilizadas neste estudo. Nesses levantamentos ficou claro que as melhores espécies são o *Pinus elliottii*, *Pinus taeda* e a *Araucaria angustifolias*(Grissino-Mayer, 1993), pois elas apresentam claramente os anéis de crescimento. Estas espécies são encontradas, na

sua maioria, na região sul do Brasil. A amostra obtida no Chile é da espécie *Fitzroya cupressoides* (Veblen et al., 1995). A tabela 3.2 mostra as espécies de árvores e a quantidade de amostra obtida por árvore e por local.

Nas amostras da espécie *Araucaria angustifolias*, em Canela, aparecem duas datas de corte. Isto porque duas amostras foram cortadas em 1996 e as outras em 1997. Para São Francisco de Paula, também 7 amostras da espécie *Araucaria angustifolias* foram cortadas em 1996 e as outras em 1997.

TABELA 3.2 – INFORMAÇÕES SOBRE AS AMOSTRAS COLETADAS EM CADA CIDADE

Local	Nº de Amostras por Lugar	Nº de Amostras por Árvore	Espécie	Ano de Corte
Concórdia	12	1	<i>Araucaria angustifolias</i>	1997
Canela	1	1	<i>Pinus taeda</i>	1997
	5	1	<i>Araucaria angustifolias</i>	1996 - 1997
	3	1	<i>Pinus elliottii</i>	1997
Nova Petrópolis	1	1	<i>Araucaria angustifolias</i>	1997
São Francisco de Paula	12	1	<i>Araucaria angustifolias</i>	1996 - 1997
	2	1	<i>Pinus taeda</i>	1997
São Martinho da Serra	2	1	<i>Araucaria angustifolias</i>	1996
		1	<i>Pinus elliottii</i>	1996
Cordilheira da Costa de Osorno-Chile	1	1	<i>Fitzroya cupressoides</i>	1993

3.3.1 – AMOSTRAS DE CONCÓRDIA

Como mostra a tabela 3.2, foram coletadas 12 amostras de árvores do tipo disco. Os locais de coleta são mostrados no mapa do município de Concórdia (Figura 3.4).

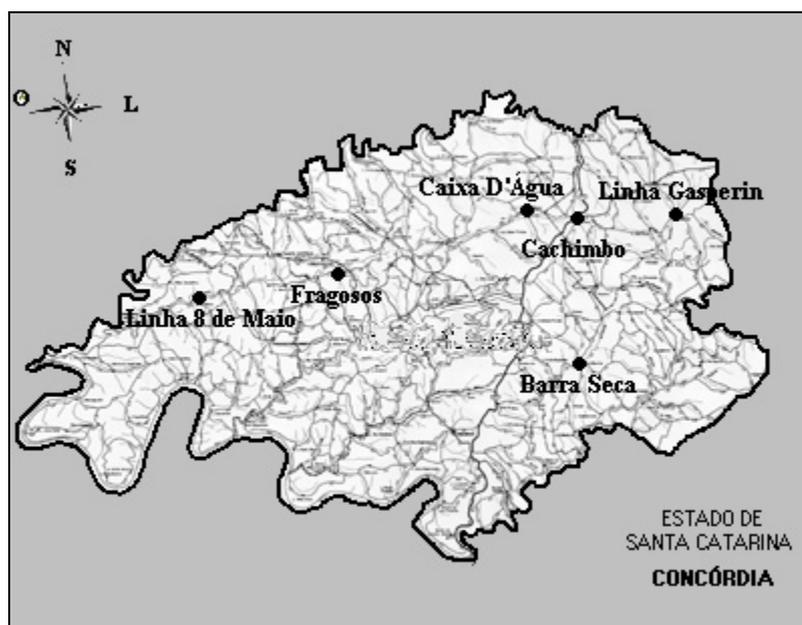


Fig. 3.4 – Mapa do Município de Concórdia mostrando os locais de coleta.

A distribuição do número de amostras para estas localidades é apresentada na tabela 3.3.

TABELA 3.3 – DISTRIBUIÇÃO DO NÚMERO DE AMOSTRAS COLETADAS NO MUNICÍPIO DE CONCÓRDIA

Local	Nº de Amostras por Local	Nº de Amostras por Árvore	Espécie
Caixa D'Água	03	01	Araucaria angustifolias
Linha Gasperin	02	01	Araucaria angustifolias
Barra Seca	03	01	Araucaria angustifolias
Linha 8 de Maio	04	01	Araucaria angustifolias

3.3.2 – AMOSTRAS DE CANELA

Em Canela foram coletadas 9 amostras (tabela 3.2), todas do tipo disco de tronco. O mapa do município mostra os locais de coletas (Figura 3.5).

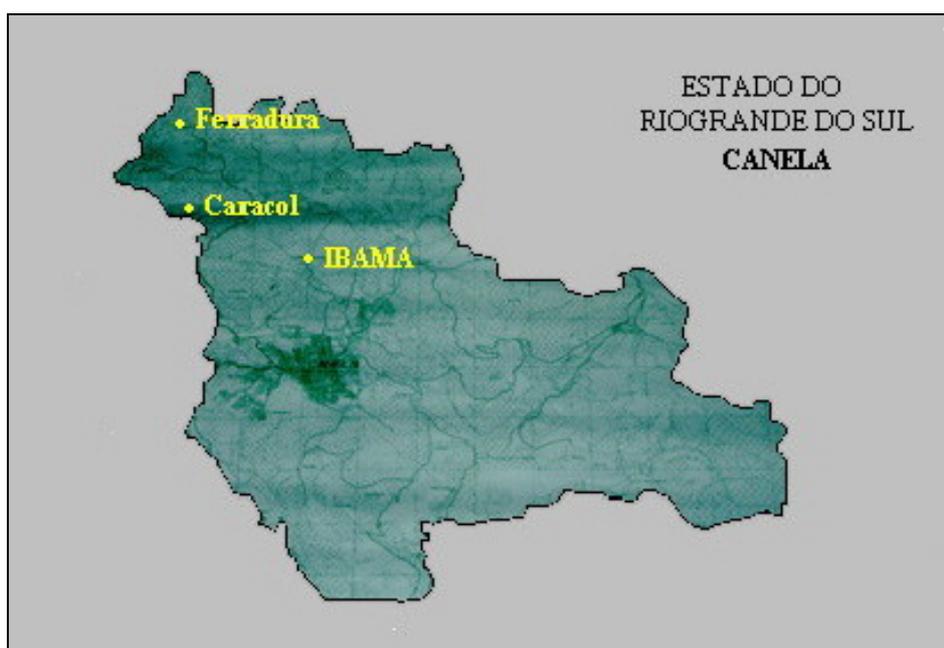


Fig. 3.5 – Mapa do Município de Canela com os locais de coletas.

A tabela 3.4 mostra a distribuição do número de amostras em cada local de coleta.

TABELA 3.4 – DISTRIBUIÇÃO DO NÚMERO DE AMOSTRAS COLETADAS NO MUNICÍPIO DE CANELA

Local	Nº de Amostras	Nº de Amostras por Árvore	Espécie
Caracol	03	01	Araucaria angustifolias
Ferradura	03	01	Pinus eliotti
IBAMA – Área 01	02	01	Araucaria angustifolias
IBAMA – Área 11	01	01	Pinus taeda

3. 3. 3 – AMOSTRAS DE SÃO FRANCISCO DE PAULA

As amostras obtidas no Município de São Francisco de Paula são todas provenientes da Floresta Nacional do IBAMA de São Francisco de Paula, cuja extensão é de 1650 m². A tabela 3.5 mostra a distribuição do número de amostras em cada local de coleta.

TABELA 3. 5 – DISTRIBUIÇÃO DO NÚMERO DE AMOSTRAS COLETADAS NA FLORESTA NACIONAL DO IBAMA DE SÃO FRANCISCO DE PAULA

Local	Nº de Amostras	Nº de Amostras por Árvore	Espécie
Área 07	05	01	Araucaria angustifolias
Área 16	06	01	Araucaria angustifolias
Área 19	02	01	Pinus Taeda
Sede	01	01	Araucaria angustifolias

3. 3. 4 – AMOSTRAS DE NOVA PETRÓPOLIS E SÃO MARTINHO DA SERRA

Em Nova Petrópolis, foi coletada uma amostra num local próximo à cidade. Enquanto que, em São Martinho da Serra, foram coletadas duas amostras na região de Campos Negrinhos (Tabela 3.2).

3. 4 – TRATAMENTO DAS AMOSTRAS

O tratamento consiste em tornar as amostras coletadas adequadas para o estudo ótico dos anéis de crescimento. Para isso, as amostras passam por alguns processos físicos e químicos, tais como:

a) SECAGEM: Este é o primeiro processo ao qual as amostras foram submetidas. Elas foram secas à temperatura ambiente - a secagem foi feita em torno de 6 meses. Na secagem, deve-se tomar o cuidado para que as amostras não fiquem numa temperatura muito elevada e não sejam colocadas ao sol, pois, apresentariam rachaduras e seriam inutilizadas para estudos.

b) POLIMENTO: Este processo vem logo após a secagem das amostras. Ele não deve ser feito antes da secagem, pois não se conseguirá fazer o lixamento da amostra, devido a umidade da amostra. Este processo é importante, pois removerá sujeiras que se acumulam nas amostras, assim como as imperfeições de suas superfícies, deixando os anéis de crescimento visíveis e adequados para o estudo ótico.

c) CONSERVAÇÃO: Este processo é químico. Passa-se um produto para salientar a coloração natural dos anéis, tornando-os mais visíveis (o produto utilizado foi o selador). Este processo também tem por objetivo conservar as amostras para outros tipos de estudo no futuro. Em alguns casos, este procedimento pode ser aplicado antes da secagem para evitar o mofo e/ou fungos, o que vai depender das condições em que se encontra a amostra. Já em outros casos, este processo pode até ser descartado. O que ocorre, por exemplo, quando a amostra está em excelentes condições.

A Figura 3.6 mostra a imagem de uma amostra, coletada em Concórdia, antes de passar pelos processos de tratamento. Enquanto que a Figura 3.7 mostra a imagem da mesma amostra depois do tratamento. Observa-se uma melhora na visualização dos anéis da amostra em praticamente 100%.



Fig. 3.6 – Imagem de uma amostra antes de receber o tratamento.

Todas as amostras do tipo disco coletadas em Concórdia passaram pelos três processos de tratamento. As outras amostras coletadas não necessitaram passar pelo processo de tratamento de conservação.



Fig. 3.7 – Imagem da amostra após o tratamento

CAPÍTULO IV

DIGITALIZAÇÃO E TRATAMENTO DAS IMAGENS

Neste capítulo são mostrados os procedimentos para a digitalização das amostras em imagens do tipo bitmap (bmp). Também é mostrado o tratamento ao qual as imagens foram submetidas, bem como a transformação em séries temporais da espessura dos anéis de crescimento de árvores.

4.1 – INTRODUÇÃO

Desde sua criação, no início do século, por Andrew E. Douglass, a dendrocronologia vem ganhando importância nos estudos paleoclimáticos (Kumagai, 1995) e climáticos (Feng e Epstein, 1996) no mundo. Ela vem ocupando espaços, a cada dia, nos estudos de fenômenos associados a: vulcões (Brantley et al., 1986; Scuderi, 1990; Yamaguchi e Lawrence, 1993), terremotos (Jacoby, 1997), estudo do gelo (Luckman, 1993; Luckman, 1997), cosmonuclídeos (Stuiver e Quay, 1980; Becker e Kromer, 1993; Attolini et al., 1993; Jirikowic e Damon, 1994), atividade solar (Murphy et al., 1996), ciclo das marés lunares (Currie, 1996), entre outros. Mas ela não fica só nisso. Muitos foram e são os métodos desenvolvidos para identificar e estudar os anéis de crescimento de árvores. Existem duas maneiras principais para o estudo dos anéis de crescimento de árvores: pela espessura e pela densidade (através do lenho precoce ou lenho tardio) do anel de crescimento (como visto no Capítulo II).

A densidade do lenho, especialmente a densidade do lenho tardio, tem sido usada em estudos dendroclimáticos (Briffa et al., 1990; Briffa et al., 1992) através de medidas obtidas por densímetro de raios-X. Poucos dendrocronologistas têm acesso a um sistema desse tipo, pois é considerado difícil de operar e de custo muito elevado (Parker e Meleski, 1970; Schweingruber, 1990). O método da espessura do anel de crescimento ainda é considerado como sendo simples e não necessita de aparelhos tão sofisticados e de custo elevado.

Com o avanço da tecnologia digital, muitos métodos novos estão sendo empregados nos estudos dos anéis de crescimento de árvores. Dentro da dendrocronologia alguns estudos têm aplicado técnicas de análises por imagens de vídeo para as espécies de lenho duro (Amparo et al., 1990; Sass e Eckstein, 1992; Dustin et al., 1994; Vollenweider et al., 1994) e as coníferas (Jagels e Telewski, 1990; Thetford et al., 1991). A aplicação da análise da imagem de vídeo necessita que a densidade varie uniformemente com o brilho, dentro do lenho da conífera (Clason e Wilson, 1991). Isso é verdadeiro dentro dos anéis de crescimento: o lenho tardio é denso, com coloração escura e de baixo brilho; o lenho inicial é menos denso, com coloração clara e de alto brilho (Figura 4.1).

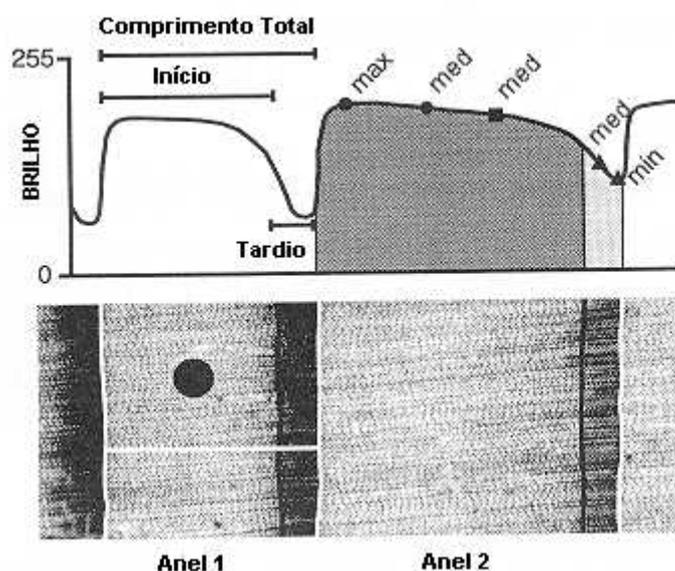


Fig. 4.1 – Imagem de dois anéis de crescimento (base da figura) e de suas curvas de brilho (topo da figura). Na imagem dos anéis de crescimento, a linha branca vertical marca os contornos, e as faixas escuras verticais marcam a transição dos lenhos inicial – tardio. A linha branca horizontal marca a espessura do Anel 1. A mancha escura no Anel 1 é um canal de resina. Na parte superior da figura está representada a espessura total do Anel 1, bem como a espessura do lenho inicial e tardio. Também é apresentada o brilho máximo e médio do lenho inicial (símbolo ●), brilho médio e mínimo do lenho tardio (símbolo ▲), brilho médio total (símbolo ■). Áreas de tons de cinza escuro representam a transição do lenho inicial, e claro para o lenho tardio, para o Anel 2.

FONTE: Sheppard e Graumlich (1996, p. 880).

A variação da densidade e do brilho também está presente nos anéis de crescimento. O lenho tardio em um anel de crescimento denso (Figura 4.1: ANEL 1) possui menos brilho que o lenho tardio em um anel de crescimento menos denso (Figura 4.1: ANEL 2). De fato, o brilho na maioria das vezes difere entre os anéis de crescimento o suficiente para ajudar na datação cruzada dos anéis de crescimento de árvores coletados (Delwaide et al., 1991; Yamaguchi et al., 1993). Usando a vantagem da tecnologia de análise de imagens de vídeo e da variação de densidade e brilho nos anéis de crescimento das coníferas, Sheppard e Graumlich (1996) mediram e analisaram o brilho no lugar da densidade, através dos tons de cinza das imagens.

Partindo da idéia de aproveitamento da tecnologia digital, da facilidade do seu uso e do seu baixo custo, resolveu-se desenvolver uma metodologia computacional simples, usando um computador, um digitalizador de imagens de mesa e um software de programação como o IDL 5.0 (Interactive Data Language), que permite identificar e analisar as imagens de anéis de crescimento de árvores, no caso deste trabalho, coletadas na região sul do Brasil. Assim, segue neste capítulo a descrição dos procedimentos para a obtenção e tratamento das imagens dos anéis de crescimento de árvores. Também é feita a descrição do programa desenvolvido no ambiente IDL 5.0 para tratar as imagens e medir a espessura dos anéis de crescimento, transformando-os em séries temporais para estudos.

4.2 – DIGITALIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

A digitalização das amostras é dividida em dois procedimentos. O primeiro consiste na digitalização das imagens dos anéis de crescimento de árvores. O segundo no tratamento aplicado nas imagens para a sua transformação em séries temporais da espessura de anéis de crescimento de árvores.

4. 2. 1 – OBTENÇÃO DAS IMAGENS

As imagens das amostras foram obtidas num digitalizador de mesa de alta resolução, e imagens das amostras foram feitas com quatro resoluções diferentes: 500, 700, 900 e 1200 dpi (pixel por polegada).

As digitalizações de cada disco de tronco foram feitas de tal forma que se obteve várias imagens por disco. Assim, conseguiu-se várias amostras, que correspondem a raios diferentes num único disco de tronco, para o estudo dos anéis de crescimento. Tomou-se o cuidado, na hora de digitalizar as imagens, em seleccionar regiões no disco de tronco, que não apresentassem qualquer defeito – tais como, pequenas rachaduras, manchas causadas por alguma doença na árvore etc. – que impossibilitassem determinar com exatidão os anéis de crescimento e suas respectivas espessuras.

Na obtenção dessas imagens tomou-se um disco e fez-se a digitalização de uma pequena região seleccionada, obtendo-se a primeira imagem. Após isso, girou-se o disco do tronco, de 10° aproximadamente, e fez-se a digitalização da nova região seleccionada. Em caso de amostra do tronco ser circular, marcava-se a posição inicial e girava-se a amostra - fazendo-se a digitalização de cada nova região seleccionada - até ela completar os 360°. Nos casos em que os discos não eram circulares, diminuía-se o ângulo de giro a fim de obter-se o máximo de imagens possíveis.

Algumas amostras eram maiores que a área de obtenção de imagens do digitalizador. Nesses casos, e nos casos em que as regiões das amostras não eram boas para a visualização dos anéis de crescimento. Assim, adotou-se o procedimento da digitalização de pequenas regiões da amostra, até conseguir-se obter as imagens de todos os anéis de crescimento da amostra.

4. 2. 2. – RESOLUÇÃO DAS IMAGENS

A digitalização das imagens foi feita em quatro resoluções diferentes, 500, 700, 900 e 1200 dpi. As resoluções de 500 e 700 dpi foram usadas em amostras, cujos anéis de crescimento estavam mais distantes uns dos outros, facilitando a identificação dos mesmos. Enquanto que nas amostras, cujos anéis de crescimento se apresentavam mais próximos, dificultando a identificação, foram utilizadas altas resoluções na obtenção das imagens, 900 e 1200 dpi. A tabela 4.1 mostra o código utilizado no nome dos arquivos das imagens para identificar as resoluções de cada imagem.

TABELA 4.1 – CÓDIGO ADOTADO PARA IDENTIFICAR A RESOLUÇÃO DE CADA IMAGEM

Arquivo de Imagem	Resolução (dpi)
Arv001a.bmp	500
Arv001b.bmp	700
Arv001c.bmp	900
Arv001d.bmp	1200

Em relação às cores, preferiu-se trabalhar com imagens em tons de cinza. As imagens coloridas tornavam os arquivos muito grandes, ocupando memória em excesso e dificultando a leitura pelo computador. Além do que imagens em tons de cinza são simples de serem trabalhadas, pois dispensa a identificação dos códigos de cada cor.

4. 3 – TRATAMENTO DAS IMAGENS

Após ter obtido as imagens dos anéis de crescimento de árvores (como explicado no item 4.2), passou-se ao segundo procedimento, o tratamento das imagens. Para isso

criou-se um programa original no ambiente IDL 5.0 de tratamento e digitalização das imagens dos anéis de crescimento de árvores. Esse programa foi denominado como Tratamento Interativo de Imagens dos Anéis de crescimento de árvores (TIIAA). Os comandos que foram utilizados são descritos no Guia do Usuário do IDL 5.0 (1996).

O TIIAA lê uma imagem no formato bmp, em tons de cinza, para qualquer resolução, e a digitaliza em uma série temporal da espessura dos anéis de crescimento de árvores. A Fig. 4.2 mostra a tela de apresentação do programa TIIAA.

Para iniciar o processo de tratamento de uma imagem, clica-se no botão “Tratamento” do programa. Com isso se abre uma janela de leitura de arquivos no formato *.bmp; essa leitura é feita pela função do IDL, *READ_BMP*. A imagem que será mostrada numa nova janela tem seu tamanho reduzido. Faz-se essa redução pela função *CONGRID*, que permite alterar as dimensões originais da imagem.

Escolhida a imagem que será lida, o programa passa para outra janela (Figura 4.3). Nessa janela será feito o tratamento da imagem. Este tratamento consiste em fazer, primeiramente, uma suavização na imagem – isto é feito pela função *SMOOTH*. Ela varia de 2 até o valor máximo de tons de cinza – este valor máximo é obtido pela função *MAX*. O segundo passo fez-se uma variação no brilho da imagem suavizada – o brilho é feito pelo comando “*TVSCL* imagem < valor”, onde valor representa a variação dos valores mínimo até o máximo, em tons de cinza (obtem-se o valor mínimo através da função *MIN*). Neste procedimento salientam-se os tons de cinza mais claro. No terceiro passo faz-se uma variação inversa do brilho, ou seja, os tons de cinza mais escuro são salientados – isto é feito pelo comando “*TVSCL* imagem > valor” -, Figura 4.4. O quarto passo é o botão “Seleção”, uma nova janela se abrirá (Figura 4.5).

Nesta nova janela, a imagem tratada aparece nas suas dimensões originais. Como a imagem possui dimensões muito grande, devido à resolução, necessitou-se de uma barra de rolagem, ou seja um "scroll", na imagem – essa barra de rolagem é criada pelas opções *X_SCROLL_SIZE*, *Y_SCROLL_SIZE*, *SCR_XSIZE* e *SCR_YSIZE*, na função

WIDGET_DRAW. Nessa nova janela será feita a seleção da região de interesse da imagem. A seleção é feita com o “mouse”: escolhe-se a altura inicial posicionando o cursor numa altura y_i qualquer e clica-se uma vez. Depois escolhe-se a altura final, a espessura inicial e a espessura final, todos pelo mesmo procedimento do “mouse” – a altura da imagem conta-se de baixo para cima na tela. A função *CURSOR* controla a obtenção da posição de clique do “mouse”. Terminada a seleção, toda a imagem da janela desaparece, ficando apenas a região da imagem selecionada, que será digitalizada (Figura 4.6).

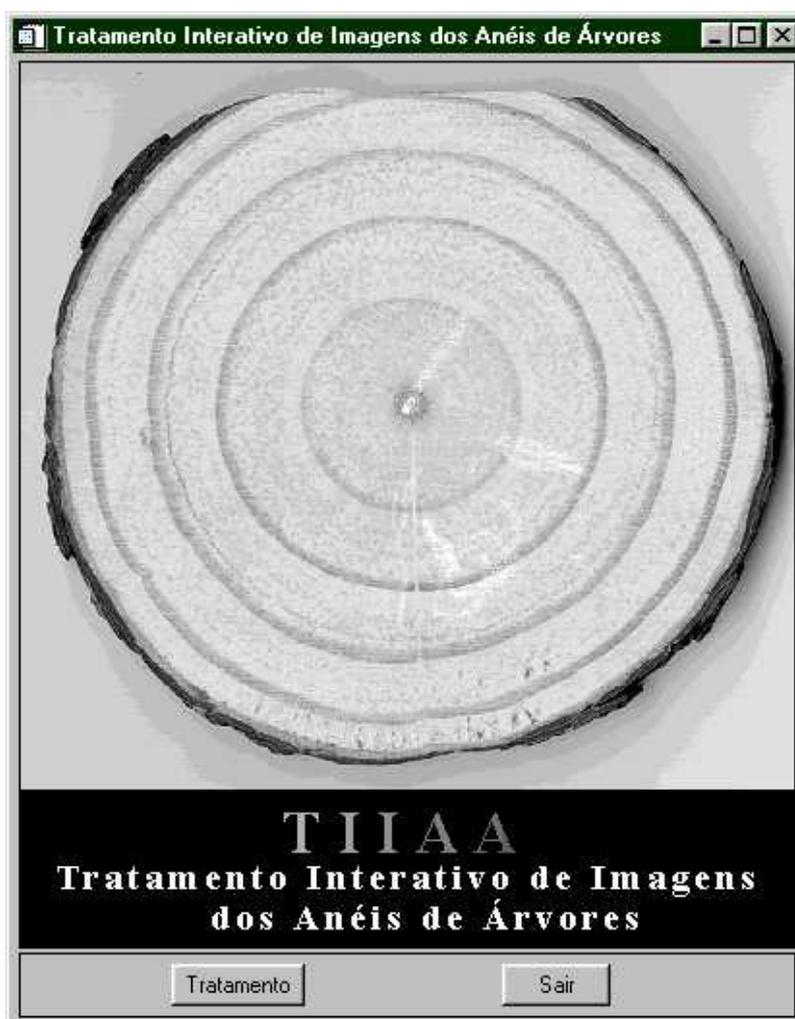


Fig. 4.2 – Apresentação do programa TIIAA.

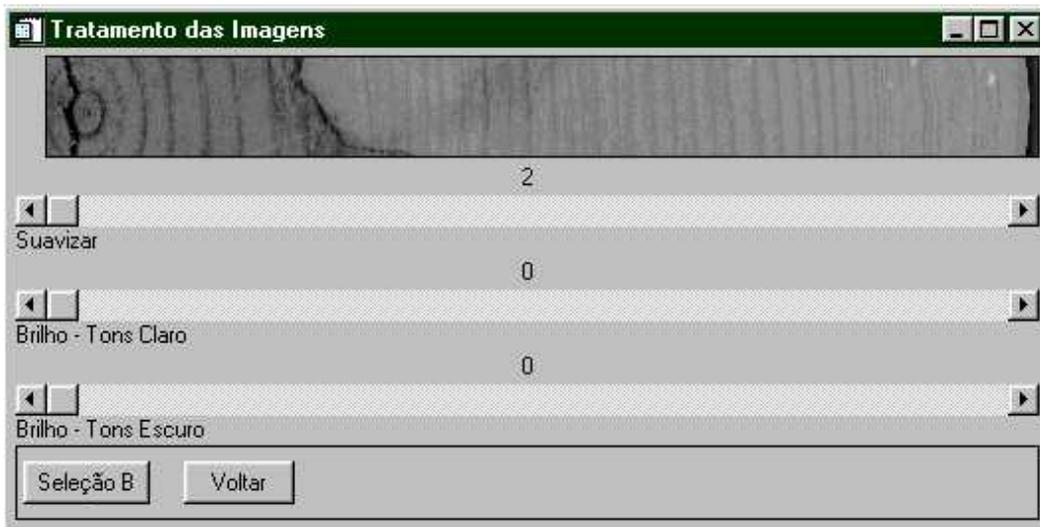


Fig. 4.3 – Os processos de tratamento da imagem.

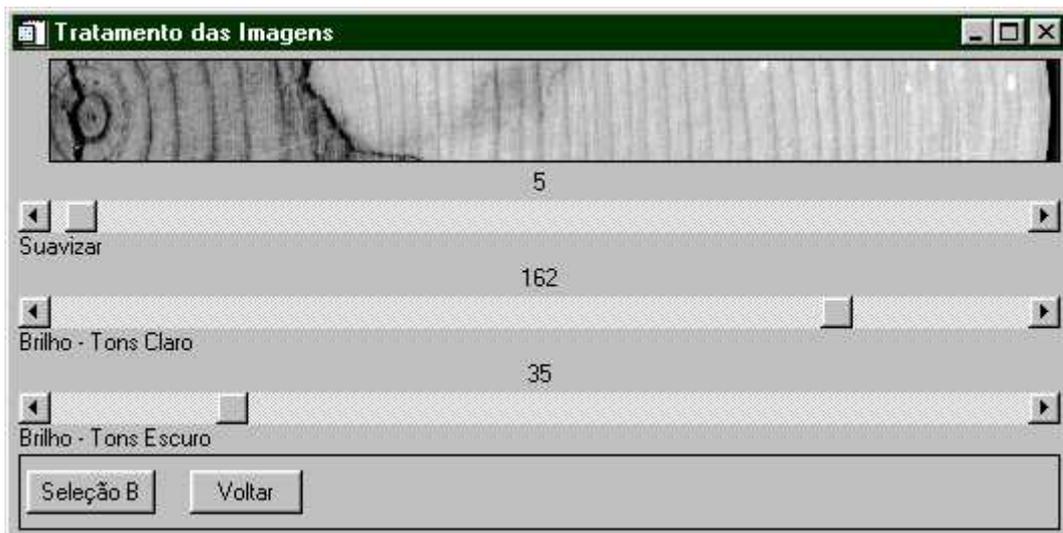


Fig. 4.4 – Imagem após os processos de tratamento.

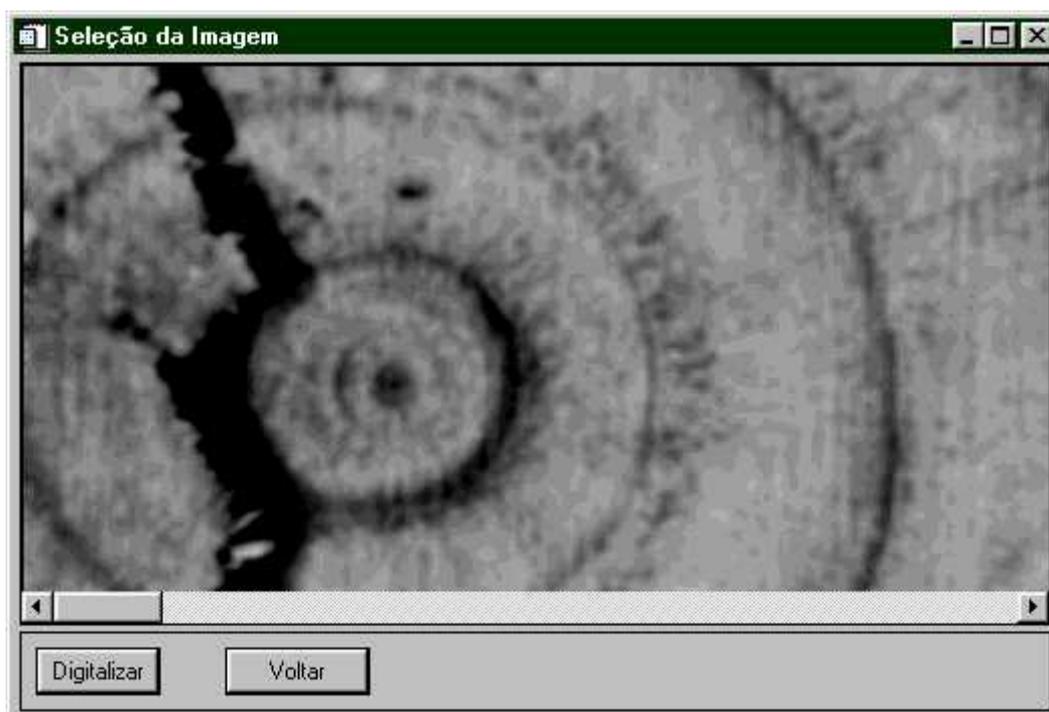


Fig. 4.5 – Imagem na qual será selecionada uma região de interesse.



Fig. 4.6 – Região selecionada para digitalização dentro da imagem.

Obtida a região da imagem de interesse, efetua-se o processo de digitalização dessa nova imagem, o que a transforma numa série temporal da espessura dos anéis de crescimento de árvores. Para isso, clica-se no botão “Digitalizar” e uma nova janela se abre.

Esta janela (Figura 4.7) é dividida em duas pequenas janelas internas, que apresentam barras de rolagem. Na janela superior aparece a região de interesse selecionada (parte mais clara) sobre a imagem original (parte mais escura). A digitalização da região mais clara é feita com o cursor do “mouse”. Para isso, criou-se um laço na função *CURSOR*, a fim de obter-se as posições, no eixo x, para cada anel de crescimento. A primeira posição a ser digitalizada deve ser o centro da árvore. Para isso coloca-se o cursor no centro, na parte mais escura, e clica-se uma vez para determinar sua posição. A próxima posição a ser digitalizada será a do primeiro anel de crescimento. Assim, coloca-se o cursor sobre o anel de crescimento – na parte escura – e clica-se uma vez, determinando sua posição. Efetua-se então este procedimento para todos os anéis de crescimento até digitalizar a última posição, para o último anel de crescimento. Para sair do laço da digitalização, deve-se clicar uma vez no final, ou bem próximo do final da imagem. Os dados são armazenados num vetor chamado posicao. A altura do cursor, na hora de digitalizar um anel de crescimento, deve estar dentro da região selecionada da imagem (parte mais clara). Caso contrário o programa não efetuará a digitalização corretamente.

As posições dos anéis de crescimento, obtidas via “mouse”, são usadas como referências. Elas ajudarão na determinação das posições da média dos tons de cinza dos anéis de crescimento da região selecionada. A média dos tons de cinza dessa região é determinada fazendo-se um laço da função *MOMENT*. Com isso obtém-se uma série de tons de cinza por posição (dada em pixel), os quais são armazenados num vetor chamado media. A determinação das posições dos anéis de crescimento desta série é feita através de um laço, no qual se toma a posição correspondente do primeiro anel de crescimento, do vetor posicao, faz-se uma comparação entre os tons de cinza do vetor media, no intervalo $posicao[1]-3$ até $posicao[1]+3$. A posição do maior valor de tom de cinza, encontrado neste intervalo para o vetor media, é a posição do primeiro anel de

crescimento e armazenada em outro vetor. Para a determinação da posição do segundo anel de crescimento no vetor media, adota-se a mesma comparação, observando-se o intervalo: $posicao[2]-3$ até $posicao[2]+3$. Armazena-se o valor da posição do maior valor de tom de cinza. O laço é executado até encontrar a última posição para o maior valor de tom de cinza, no vetor media, para o intervalo $posicao[n]-3$ até $posicao[n]+3$. A determinação da posição do centro da árvore no vetor media é feita num laço separado. Com um intervalo de 0 até 12 pixels, onde se determina a posição do maior valor de tom de cinza.

Agora, clicando-se no botão “Gráfico”, visualiza-se um gráfico da série dos valores médios de tons de cinza em função da posição na imagem da região selecionada, parte inferior da Figura 4.7. O gráfico mostra também a posição digitalizada dos anéis de crescimento (símbolo “*”). Por fim, mostra a posição dos anéis de crescimento na série espacial dos valores médios de tons de cinza (símbolo “◇”). Observa-se no gráfico que os picos da série dos valores médios de tons de cinza representam os anéis de crescimento. Observa-se que a determinação das posições dos anéis de crescimento, na série espacial média, através das posições digitalizadas dos anéis de crescimento, mostra-se extremamente precisa.

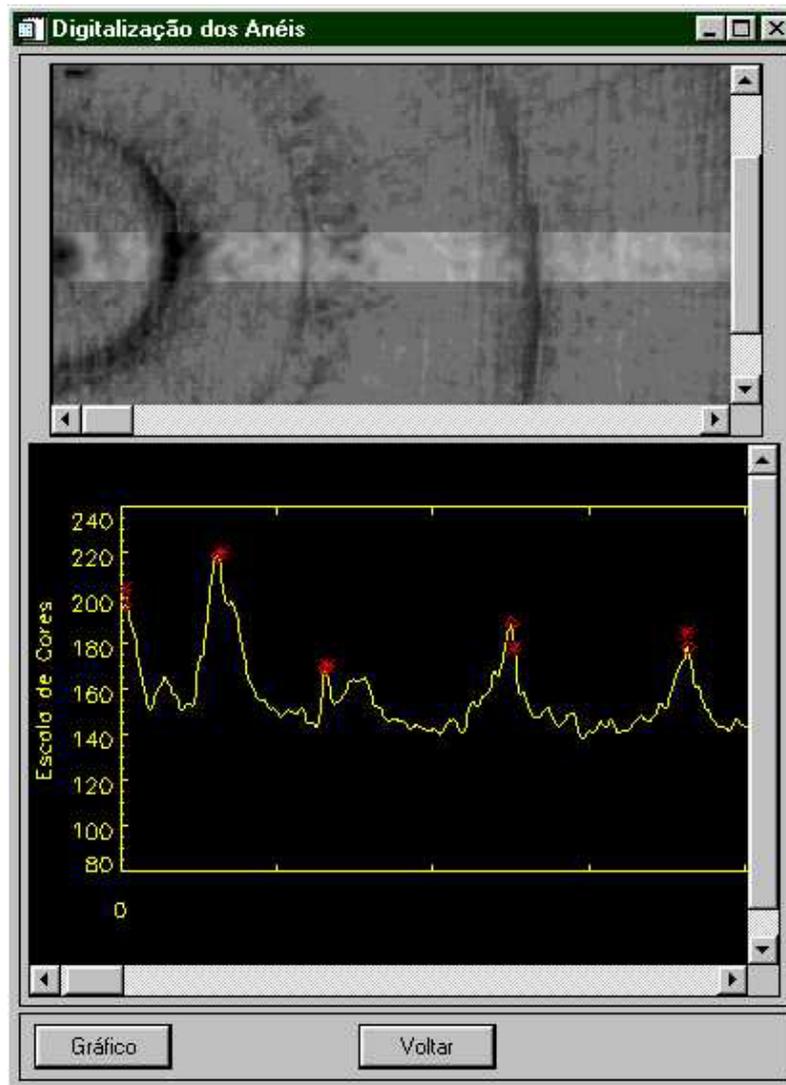


Fig. 4.7 – A janela mostra a região selecionada da digitalização, junto com a imagem original (parte superior), e um gráfico dos tons de cinza em função do número de pixels (parte inferior).

Tendo determinado todas as posições dos anéis de crescimento no vetor media, efetua-se uma subtração entre elas para obter a espessura de cada anel de crescimento. Para isso, cria-se um laço tomando-se a posição do primeiro anel de crescimento e subtraindo-se da posição do centro da árvore, obtêm-se, assim, a espessura do primeiro anel de crescimento. Depois toma-se a posição do segundo anel de crescimento e subtrai-se a posição do primeiro anel de crescimento, o que resulta na espessura do segundo anel de crescimento. Assim, o laço efetua esta operação até obter a espessura

do último anel de crescimento. Todos os dados da espessura dos anéis de crescimento em pixels são convertidos para centímetros e milímetros. Estes dados de espessuras, em pixels, centímetros e milímetros, são armazenados num arquivo *.dat.

Através do gráfico da Figura 4.7 (parte inferior), para todas as imagens digitalizadas, ficou confirmada a excelente precisão na determinação das posições dos anéis de crescimento para a série espacial dos valores médios de tons de cinza, na imagem digitalizada, bem como da determinação da espessura dos anéis de crescimento. Com isso, conseguiu-se atingir o objetivo com o programa TIIAA: a determinação da espessura dos anéis de crescimento de árvores através da digitalização de imagens das amostras de árvores.

4. 4 – SÉRIE TEMPORAL DA ESPESSURA DE ANÉIS DE CRESCIMENTO

A série temporal média da espessura de anéis de crescimento, obtida para cada árvore, foi determinada através da média da espessura de anéis de crescimento de cada imagem da árvore tratada pelo programa TIIAA.

Nas amostras de cada árvore foram feitas as correlações entre os anéis de crescimento de cada imagem, para que se identificasse corretamente a posição temporal de cada anel de crescimento na árvore. Assim, conseguiu-se determinar a cronologia de cada árvore. As correlações entre os anéis de crescimento para cada imagem de árvore apresentam-se próximas de 1, para um lag (atraso) igual a 0 anos. Em algumas árvores as correlações se mostram abaixo de 0,80. Isso se deve ao formato assimétrico de algumas amostras, acarretando uma variação da espessura do anel de crescimento em todas as imagens. Os resultados da correlação entre os anéis de crescimento das imagens mostraram que a posição de cada anel de crescimento, determinada numa imagem, apresenta a mesma posição na outra imagem. Assim, faz-se a média dos anéis de crescimento (com cada anel de crescimento na sua devida posição) entre as imagens, obtendo-se a série temporal média das espessuras dos anéis de crescimento. este resultado ainda nos mostra uma alta confiabilidade na determinação da idade das árvores. A Figura 4.8

mostra, como exemplo, as séries das espessuras dos anéis de crescimento para cada imagem obtida da amostra de Cdia02 (curvas em preto) e a série representativa desta amostra, obtida através da média entre as espessuras de cada imagem (curva em vermelho).

Observa-se que, para algumas imagens dos anéis de crescimento de árvores da Figura 4.8, não há nenhum valor de espessura, como por exemplo a Arv001, que não formou nenhum anel de crescimento para os anos de 1984 a 1987. Isso ocorre quando não há produção de revestimento do *xylema*. Outro exemplo interessante da ausência de anéis de crescimento em algumas regiões das amostras se deve ao formato não circular de seus troncos. Este fenômeno ocorreu em muitas amostras de árvores coletadas principalmente no município de Concórdia, região composta por morros.

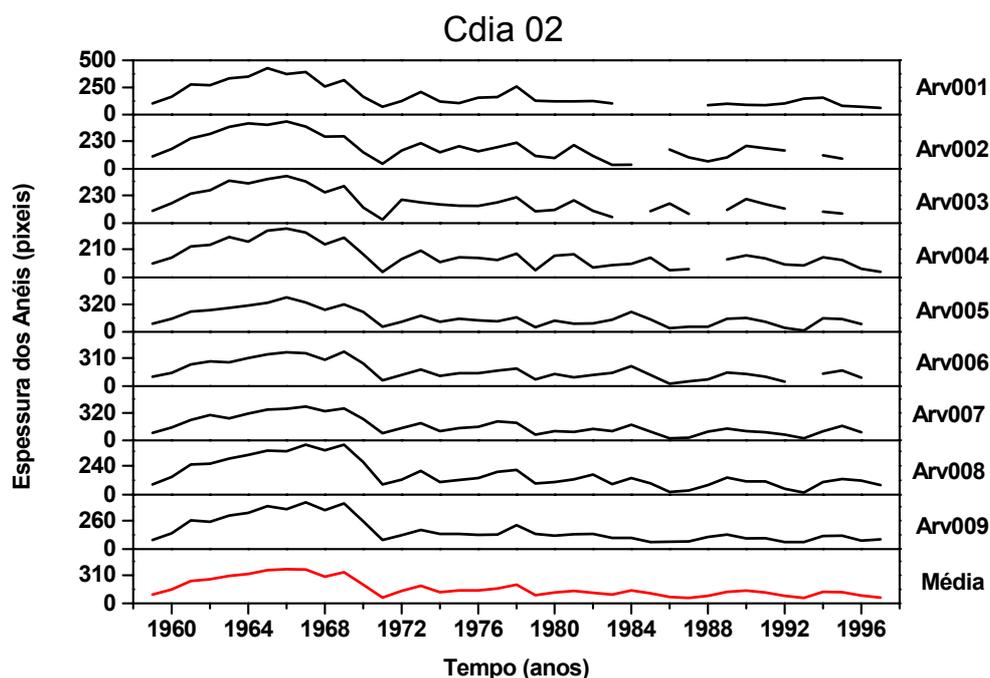


Fig. 4.8 – As curvas em preto representam as espessuras dos anéis de crescimento (dado em pixels) em função do tempo para as imagens arv001, arv002, arv003, arv004, arv005, arv006, arv007, arv008, arv009. A curva em vermelho é a série média da espessura dos anéis de crescimento em função do tempo.

CAPÍTULO V

ANÁLISE E RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos de análise das séries temporais da espessura dos anéis de crescimento. Os procedimentos detêm-se na obtenção da melhor curva de ajuste para cada série, de modo que as tendências indesejadas sejam eliminadas, a fim de se fazer a padronização e obter-se o índice de espessura dos anéis de crescimento para se fazer a análise espectral pelo método da máxima entropia e pela Análise por Regressão Iterativa de Séries Temporais (ARIST).

5.1 – SÉRIE TEMPORAL DAS AMOSTRAS DE ÁRVORES

As séries temporais das espessuras dos anéis de crescimento são arranjadas num único gráfico, para cada local de coleta. Isto facilita a obtenção, após a padronização de cada série, da série temporal média das espessuras dos anéis de crescimento de árvores representativa de cada local.

Para Concórdia - SC, as séries temporais das espessuras dos anéis de crescimento de árvores obtidas nas 12 amostras coletadas são mostradas na Figura 5.1. As séries temporais obtidas em 9 amostras de Canela - RS são mostradas na Figura 5.2. A Figura 5.3 apresenta as séries temporais de 14 amostras de árvores coletadas em São Francisco de Paula - RS. A Figura 5.4 apresenta a série temporal obtida em uma amostra de árvore em Nova Petrópolis - RS. Na Figura 5.5 são mostradas as séries temporais para os anéis de crescimento de árvores de duas amostras coletadas em São Martinho da Serra - RS. Na Figura 5.6 mostra-se a série temporal das espessuras dos anéis de crescimento para uma amostra proveniente da Cordilheira da Costa de Osorno, no Chile. Nos respectivos gráficos, o último ano com valor de espessura de anel representa o último ano de vida com crescimento das árvores, antes de serem derrubadas (morte da árvore).

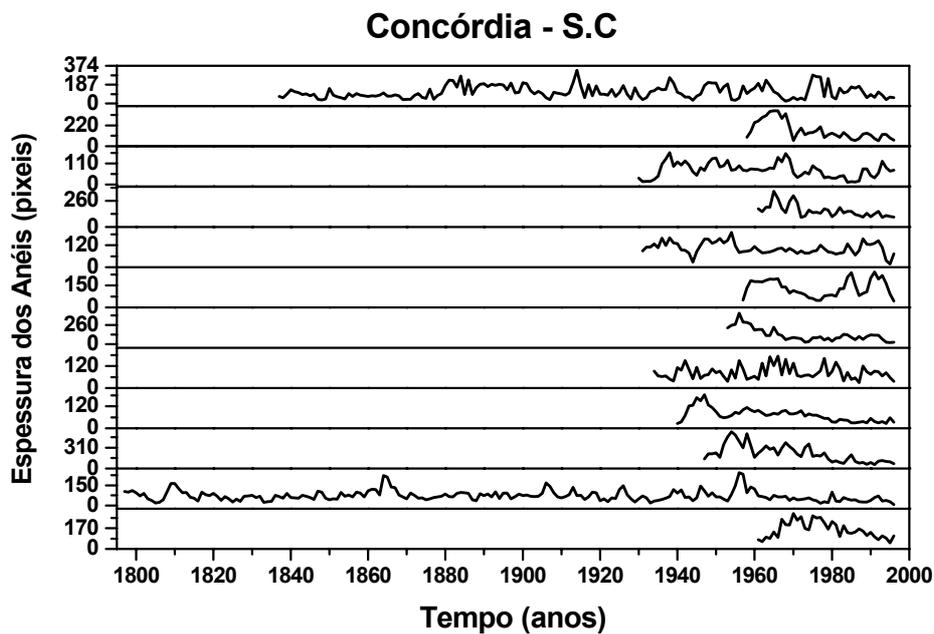


Fig. 5.1 – Séries temporais da espessura dos anéis de crescimento das 12 amostras de árvores coletadas em Concórdia – S. C.

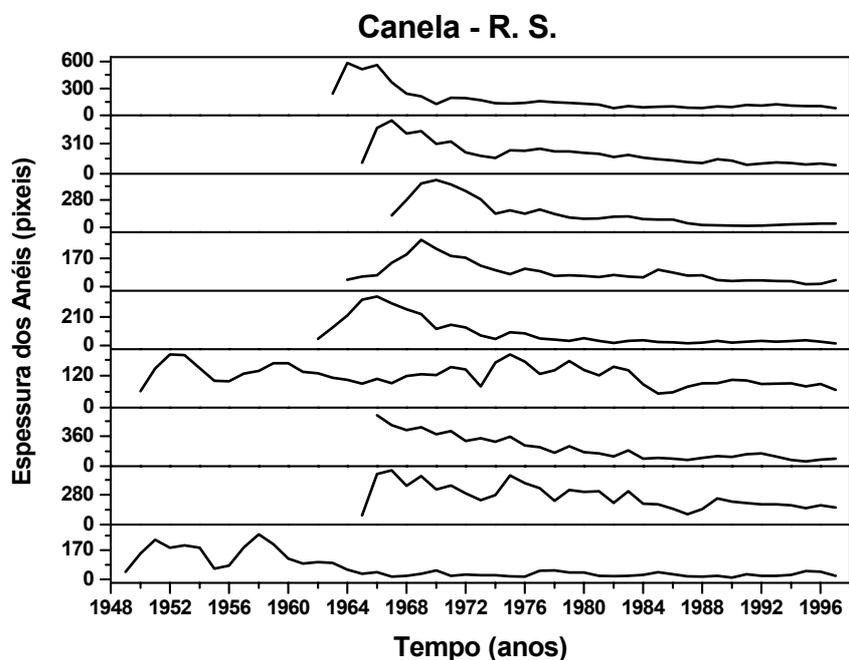


Fig. 5.2 - Séries temporais da espessura dos anéis de crescimento de 9 amostras de árvores coletadas em Canela – R. S.

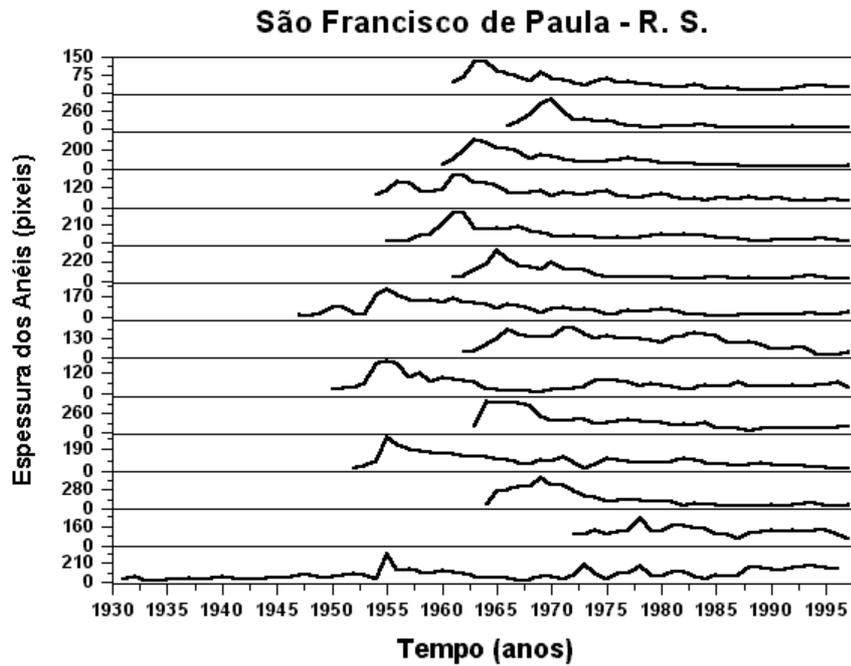


Fig. 5.3 - Séries temporais da espessura dos anéis de crescimento de 14 amostras de árvores coletadas em São Francisco de Paula – R. S.

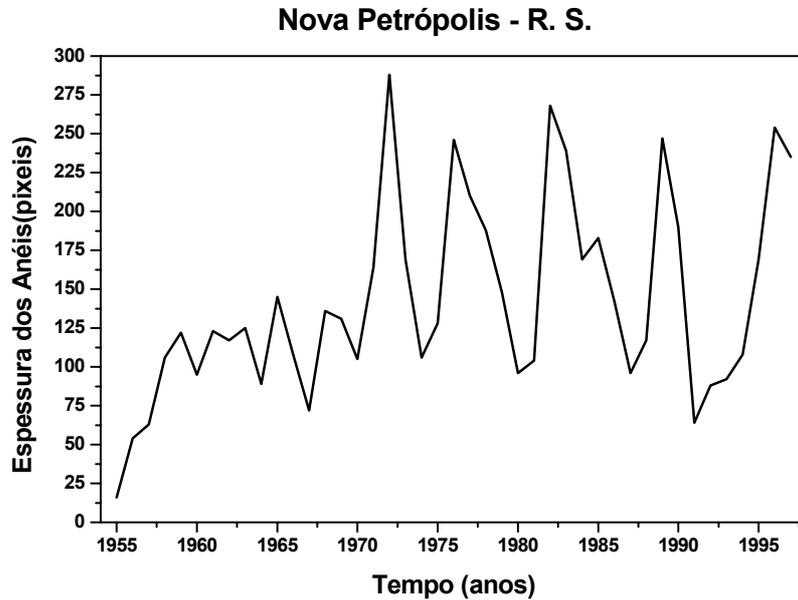


Fig. 5.4 - Série temporal da espessura dos anéis de crescimento obtida em uma amostra de árvore em Nova Petrópolis – R. S.

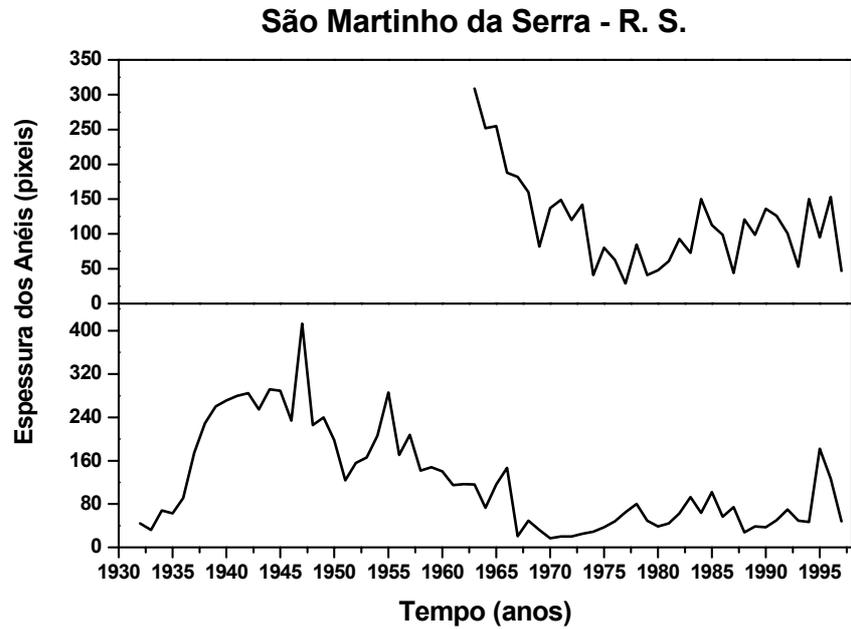


Fig. 5.5 - Séries temporais da espessura dos anéis de crescimento de 2 amostras de árvores coletadas em São Martinho da Serra – R. S.

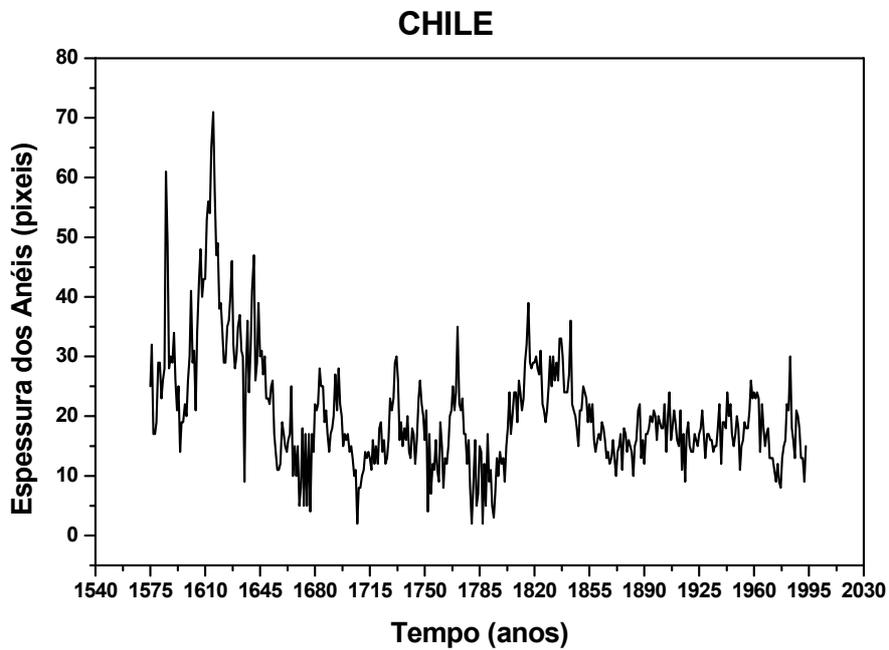


Fig. 5.6 - Série temporal da espessura dos anéis de crescimento de árvores para uma amostra proveniente do Chile.

5.2 – CURVAS DE AJUSTES

Uma vez obtidas as séries temporais da espessura dos anéis de crescimento para cada árvore, tenta-se determinar a melhor curva de ajuste que represente as tendências indesejadas (para a aplicação dos métodos de determinação de periodicidades), como o crescimento biológico de cada árvore, anomalias e/ou danos que podem ter ocorrido em alguma árvore, ou algum outro fenômeno indesejado que tenha ocorrido (como visto no Capítulo II – Agregação no Crescimento da Árvore). Para cada amostra, foi adotada uma curva para o ajuste dos dados, que melhor represente as tendências em cada série temporal. As funções de ajustes utilizadas são mostradas no Apêndice B.

5.3 – PADRONIZAÇÃO DOS ANÉIS DE CRESCIMENTO DE ÁRVORES

Uma vez determinadas as curvas de ajuste que melhor representem as tendências indesejadas, efetua-se o processo de padronização para eliminar estas tendências dos dados. O processo de padronização de uma série temporal dos anéis de crescimento de árvores é expresso pela Eq. 2.9. Dividindo-se os dados medidos pela tendência encontrada, bitem-se o índice padronizado da espessura de anel, ou simplesmente Índice da Espessura de Anel (IEA) (Schweingruber, 1988).

Nos estudos da espessura ou densidade dos anéis de crescimento de árvores, deve-se obter uma cronologia média para um local ou região. Esta cronologia média é obtida através da média dos índices das espessuras ou densidades dos anéis de crescimento entre algumas árvores (Fritts, 1972) para aquele local, calculando-se a média entre os anéis de crescimento correspondentes a um dado ano. Assim, mostra-se nas Figs. 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 o IEA para as amostras de Concórdia, Canela, São Francisco de Paula, Nova Petrópolis, São Martinho da Serra e do Chile, respectivamente (curvas em preto), juntamente com a série temporal média representativa de cada local (curvas em vermelho). Para Nova Petrópolis e o Chile, a própria série temporal das espessuras dos anéis de crescimento é a série temporal representativa destes locais, visto que se dispõe apenas de uma amostra de cada lugar.

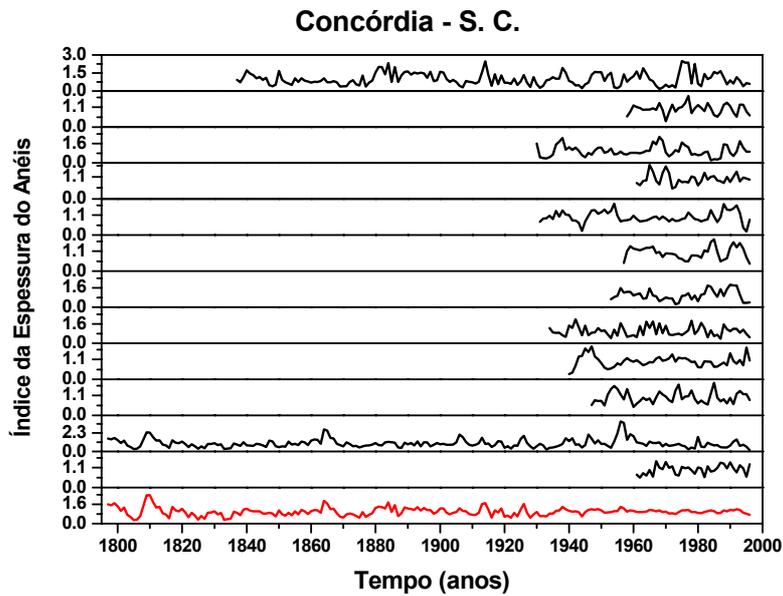


Fig. 5.7 – Séries temporais do Índice da Espessura dos Anéis de Crescimento (IEAC) das amostras de árvores de Concórdia (curvas em preto) e a série temporal média da espessura dos anéis de crescimento, com 200 anos, representativa do local (curva em vermelho).

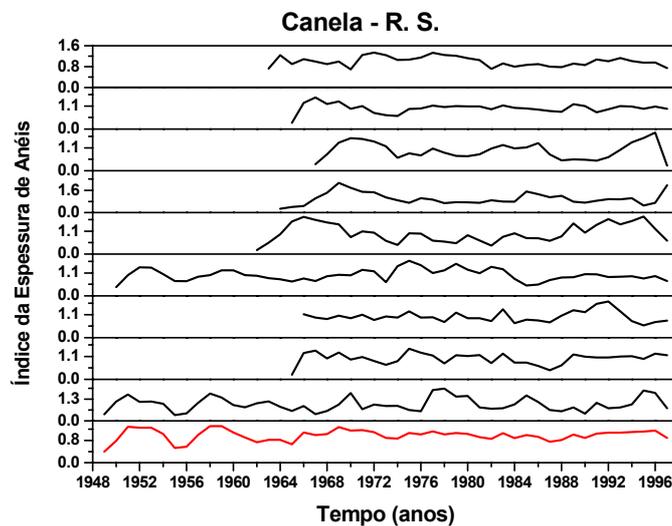


Fig. 5.8 – Séries temporais do Índice da Espessura dos Anéis de Crescimento (IEAC) das amostras de árvores de Canela (curvas em preto) e a série temporal média da espessura dos anéis de crescimento, com 49 anos, representativa do local (curva em vermelho).

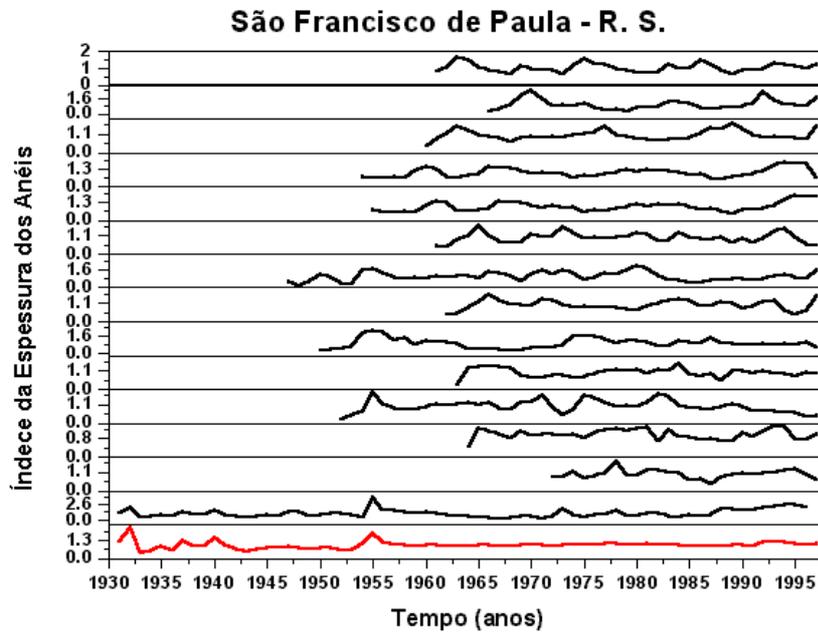


Fig. 5.9 – Séries temporais do Índice da Espessura dos Anéis de Crescimento (IEAC) das amostras de árvores de São Francisco de Paula (curvas em preto) e a série temporal média da espessura dos anéis de crescimento, com 67 anos, representativa do local (curva em vermelho).

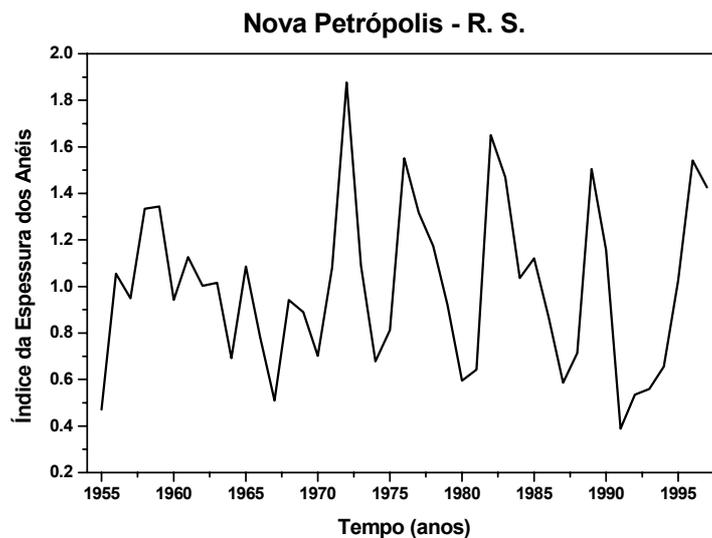


Fig. 5.10 – Série temporal do Índice da Espessura dos Anéis de Crescimento (IEAC) da amostra de árvore de Nova Petrópolis, com 43 anos.

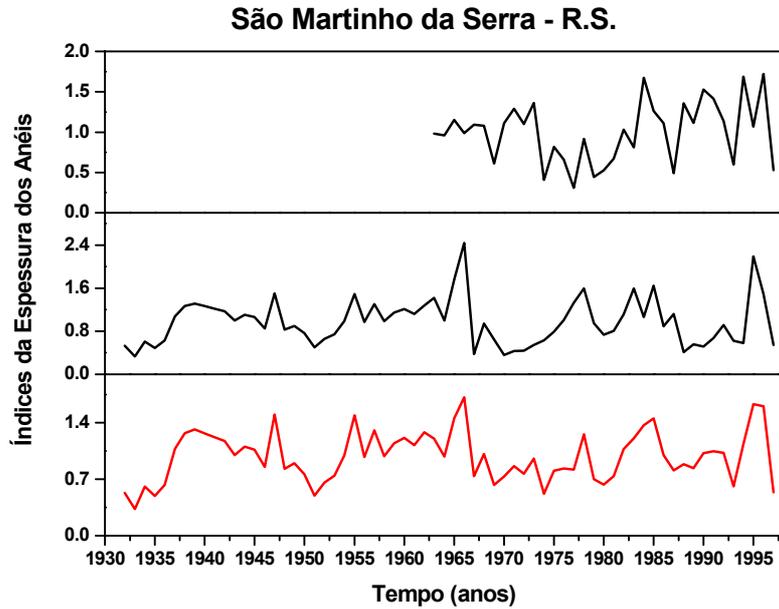


Fig. 5.11 – Séries temporais do Índice da Espessura dos Anéis de Crescimento (IEAC) das amostras de árvores de São Martinho da Serra (curvas em preto) e a série temporal média da espessura dos anéis de crescimento, com 66 anos, representativa do local (curva em vermelho).

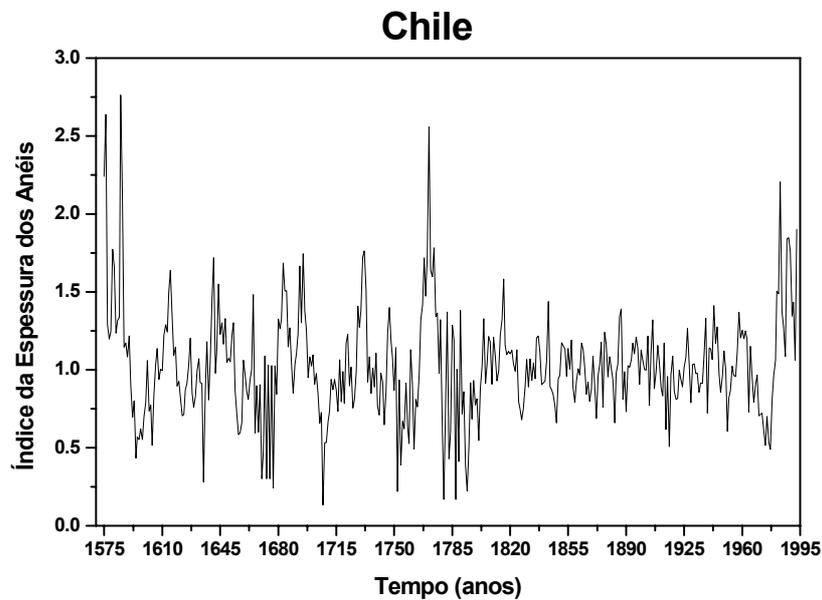


Fig. 5.12 – Série temporal do Índice da Espessura dos Anéis de Crescimento (IEAC) para a amostra de árvore do Chile, com 419 anos.

5.4 – ANÁLISE ESPECTRAL DOS ANÉIS DE CRESCIMENTO DE ÁRVORES

Uma vez obtidos os índices das espessuras dos anéis de crescimento representativos de cada local, faz-se a análise espectral de cada série, a fim de se determinar os sinais que estão influenciando o desenvolvimento dos anéis de crescimento de árvores. As análises espectrais foram feitas pelos métodos da máxima entropia e pelo ARIST. Antes de efetuar as análises, faz-se a subtração da média zero nas séries, deslocando o ponto médio para zero, o que não interfere nos resultados e facilita as análises.

O método da máxima entropia apresenta uma excelente precisão na determinação das frequências nas séries temporais com poucos dados (Kane, 1996). No entanto, o método não estima as amplitudes (Kane e Trivedi, 1982) e também não fornece o erro das periodicidades. O número de pólos (número de coeficientes da predição linear ou ordem da aproximação da máxima entropia) adotado para cada análise foi aproximadamente 50% do comprimento dos dados. A princípio não existe um critério na escolha do número de coeficientes da predição linear (Kane e Gobbi, 1992), no entanto, Ulrych e Bishop (1975) recomendam usar um número de aproximadamente 50% do comprimento dos dados. Kane (1977, 1979) em suas pesquisas também sugere um número de coeficientes de predição linear em torno de 50% do comprimento dos dados. As rotinas utilizadas foram implementadas em C e obtidas em Press et al (1992).

O método ARIST também foi adotado na determinação das periodicidades nas séries temporais, para determinar a amplitude de cada frequência e o desvio padrão sobre cada amplitude determinada, além de fornecer o desvio de cada periodicidade encontrada (Wolberg, 1967; Nordemann, 1992; Rigozo, 1994).

A série temporal dos anéis de crescimento de árvores de 419 anos do Chile foi dividida em duas séries – de 1575 a 1796 e de 1797 a 1993. Este procedimento foi adotado obter-se uma comparação mais efetiva com a série temporal dos anéis de crescimento de árvores no Brasil, no caso a cronologia de 200 anos de Concórdia – SC, que vai de 1797 a 1996.

5.5 – RESULTADOS DAS ANÁLISES ESPECTRAIS

Fazendo-se as análises espectrais dos anéis de crescimento de árvores pelo método da máxima entropia, obtém-se os espectros da densidade de potência para Concórdia (Figura 5.13), Canela (Figura 5.14), São Francisco de Paula (Figura 5.15), Nova Petrópolis (Figura 5.16), São Martinho da Serra (Figura 5.17) e Chile, para a série temporal de 1797 a 1993, (Figura 5.18).

Os picos de períodos mais dominantes no espectro da densidade de potência dos anéis de crescimento de árvores em Concórdia (Figura 5.13), estão em 2,2, 6,9, 10,6, 24,6, 46,0 e 85 anos. Em Canela os períodos dominantes no espectro são 3,2, 4,4, 6,2, 8,1, 11,2 e 21,8 anos (Figura 5.14). Para São Francisco de Paula, observa-se períodos mais dominantes em 2,5, 2,9, 3,8, 4,7, 5,7, 7,6, 13,4, 21,5 e 62,6 anos no espectro (Figura 5.15). Já no espectro da densidade de potência dos anéis de crescimento de Nova Petrópolis se encontram-se os períodos de 3,4, 4,2, 6,5, 12,8 e 23,4 anos, além de uma fraca densidade de potência no período de 5,3 anos (Figura 5.16). Os picos de períodos mais dominantes no espectro dos anéis de crescimento de São Martinho da Serra se apresentam em 2,3, 2,5, 3,3, 5,8, 9,3, 19,2 e 35,5 anos (Figura 5.17). Enquanto que para os anéis de crescimento de árvores do Chile, de 1797 a 1993, os baixos períodos são os mais dominantes. Destes períodos podemos destacar que os mais importantes são 2,4, 3,5, 4,4, 6,3, 11,8, 22, 28,3 e 44 anos, além de uma fraca periodicidade em 5,0 anos (Figura 5.18).

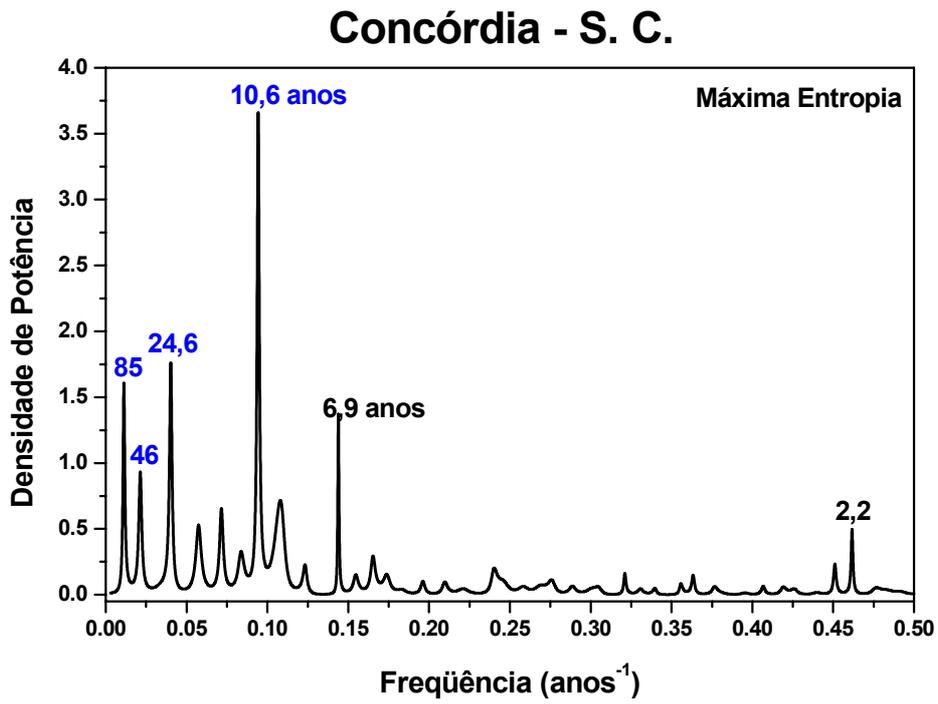


Fig. 5.13 – Espectro da densidade de potência da cronologia média de Concórdia.

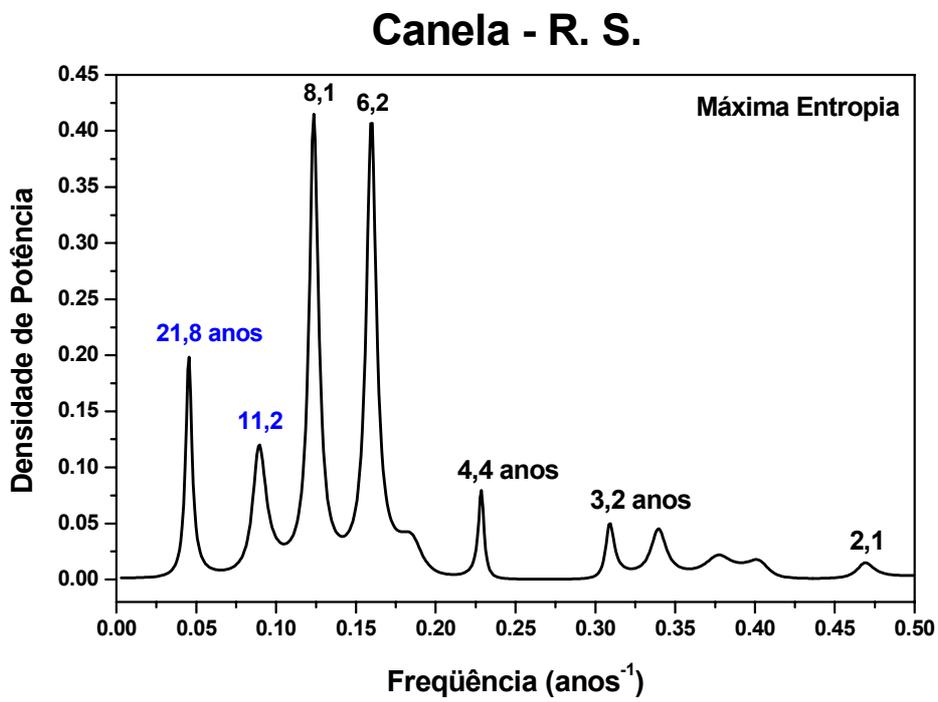


Fig. 5.14 – Espectro da densidade de potência da cronologia média de Canela.

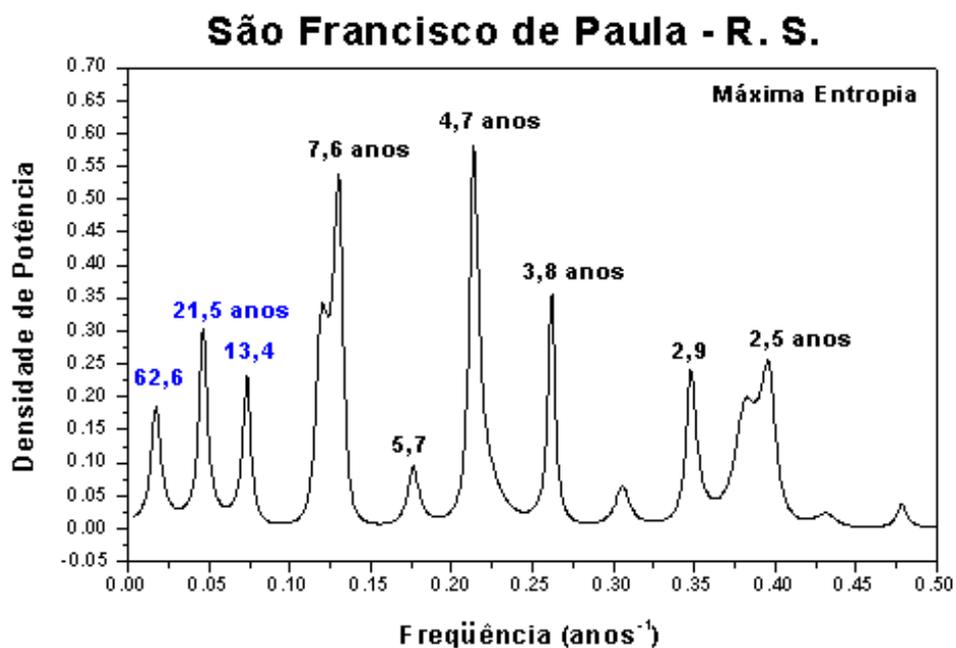


Fig. 5.15 – Espectro da densidade de potência da cronologia média de São Francisco de Paula.

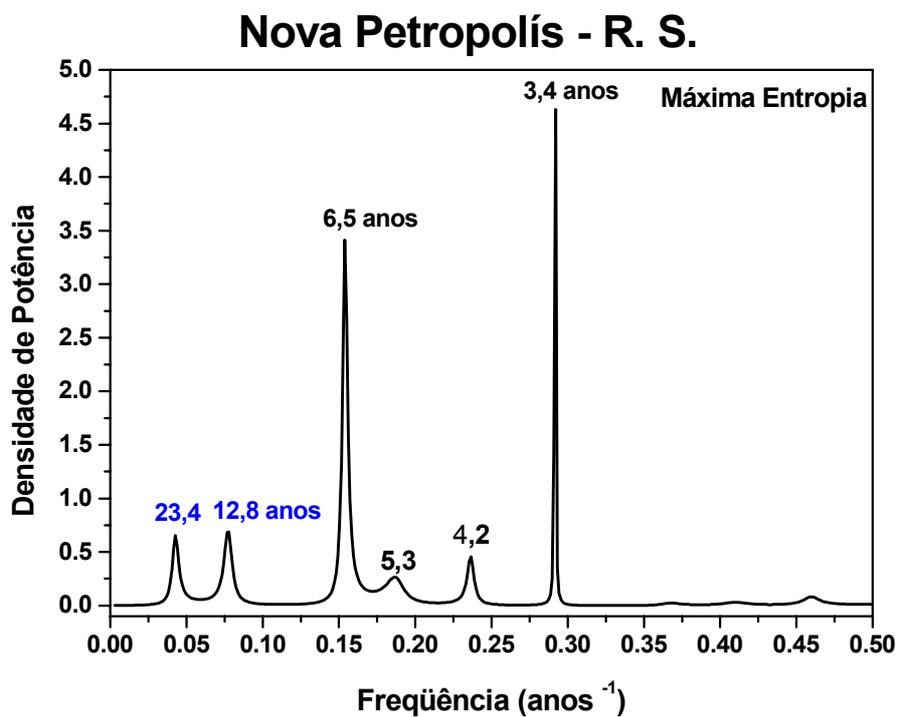


Fig. 5.16 – Espectro da densidade de potência da cronologia de Nova Petrópolis.

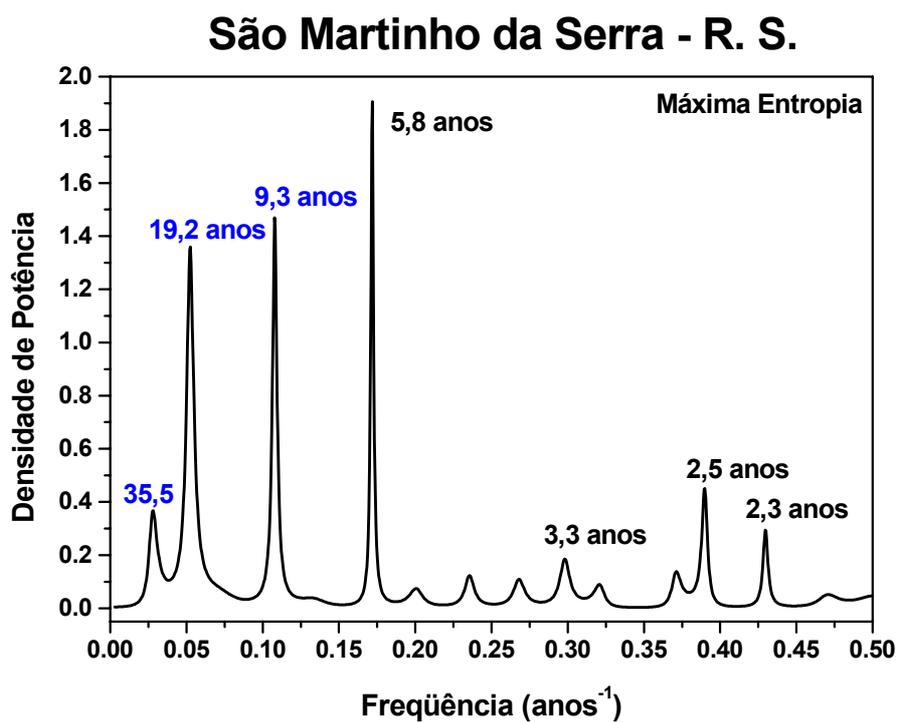


Fig. 5.17 – Espectro da densidade de potência da cronologia média de São Martinho da Serra.

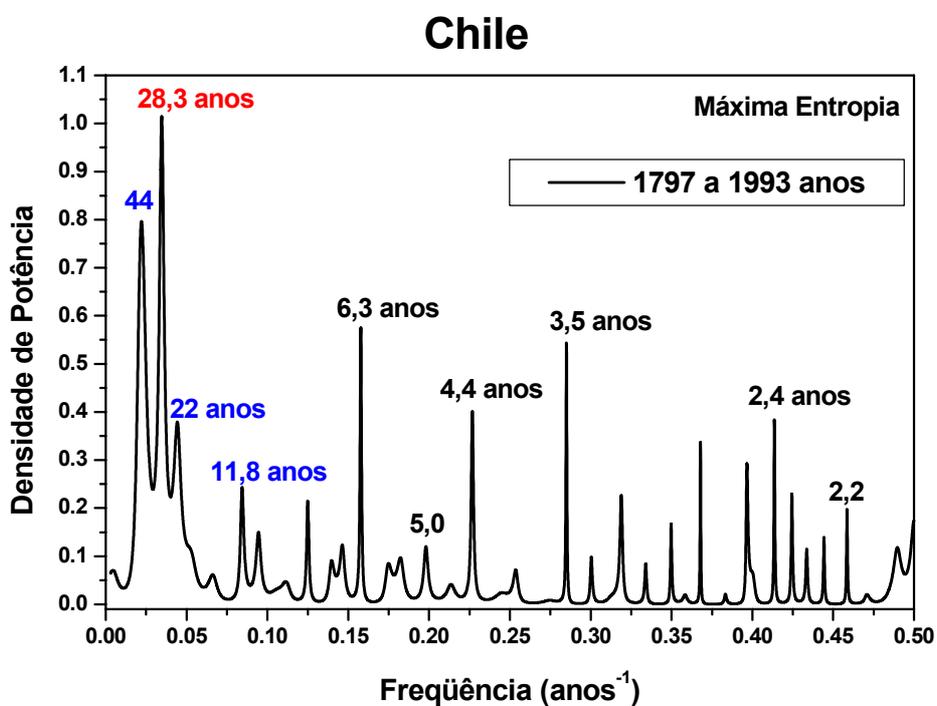


Fig. 5.18 – Espectro da densidade de potência da cronologia do Chile.

A análise espectral dos anéis de crescimento de árvores pelo método ARIST fornece os espectros de amplitude para Concórdia (Figura 5.19), Canela (Figura 5.20), São Francisco de Paula (Figura 5.21), Nova Petrópolis (Figura 5.22), São Martinho da Serra (Figura 5.23) e Chile, para a série temporal de 1797 a 1993, (Figura 5.24).

Os períodos obtidos no espectro de amplitude para os anéis de crescimento de árvores de Concórdia (Figura 5.19), são $2,2 \pm 0,0$, $3,6 \pm 0,0$, $4,1 \pm 0,0$, $5,8 \pm 0,0$, $6,0 \pm 0,0$, $6,9 \pm 0,0$, $8,2 \pm 0,1$, $10,6 \pm 0,0$, $24,6 \pm 0,4$, $50,0 \pm 2,0$ e $84,2 \pm 5,0$ anos. Em Canela os períodos obtidos no espectro são $2,7 \pm 0,0$, $8,4 \pm 0,2$, $12,3 \pm 0,9$ e $19,6 \pm 2,0$ anos (Figura 5.20). Os períodos observados em São Francisco de Paula foram $5,7 \pm 0,2$, $13,0 \pm 0,6$, $20,0 \pm 1,6$ e $38,0 \pm 5,2$ anos (Figura 5.21). Em Nova Petrópolis se encontram os períodos de $3,4 \pm 0,0$, $4,8 \pm 0,2$, $6,2 \pm 0,1$, $12,5 \pm 0,7$ e $21,0 \pm 3,0$ anos (Figura 5.22). Os períodos obtidos no espectro dos anéis de crescimento de São Martinho da Serra são $2,3 \pm 0,0$, $2,5 \pm 0,0$, $3,2 \pm 0,0$, $5,9 \pm 0,0$, $9,4 \pm 0,2$ e $19,6 \pm 0,8$ anos (Figura 5.23). Foram encontrados, para os anéis de crescimento de árvores do Chile, de 1797 a 1993, os períodos de $2,4 \pm 0,0$, $3,5 \pm 0,0$, $4,4 \pm 0,0$, $8,7 \pm 0,2$, $11,7 \pm 0,2$ e $78,5 \pm 2,4$ anos (Figura 5.24).

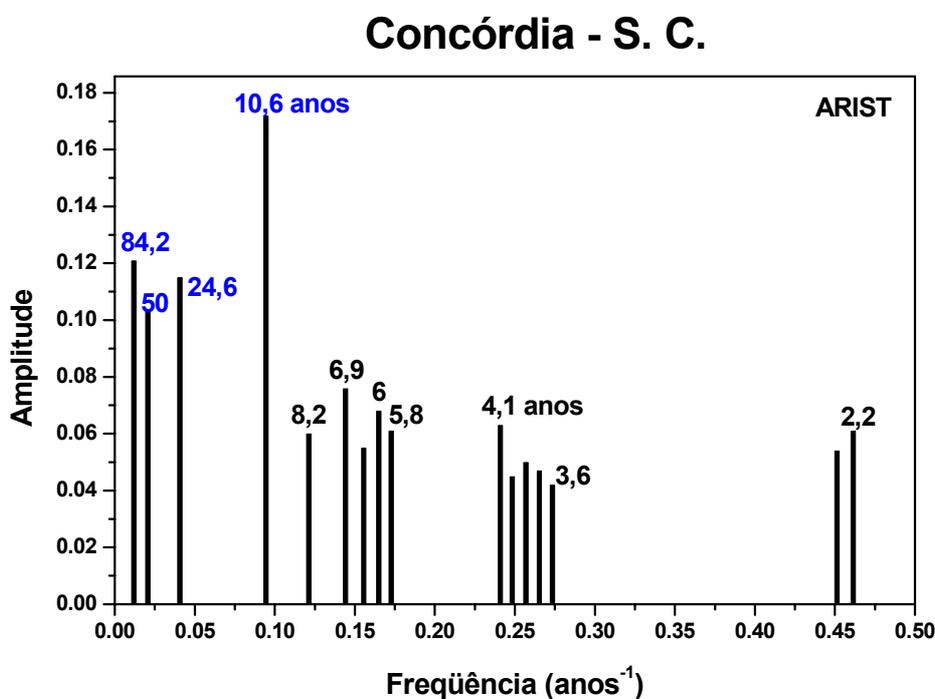


Fig. 5.19 – Espectro de amplitude da cronologia média de Concórdia.

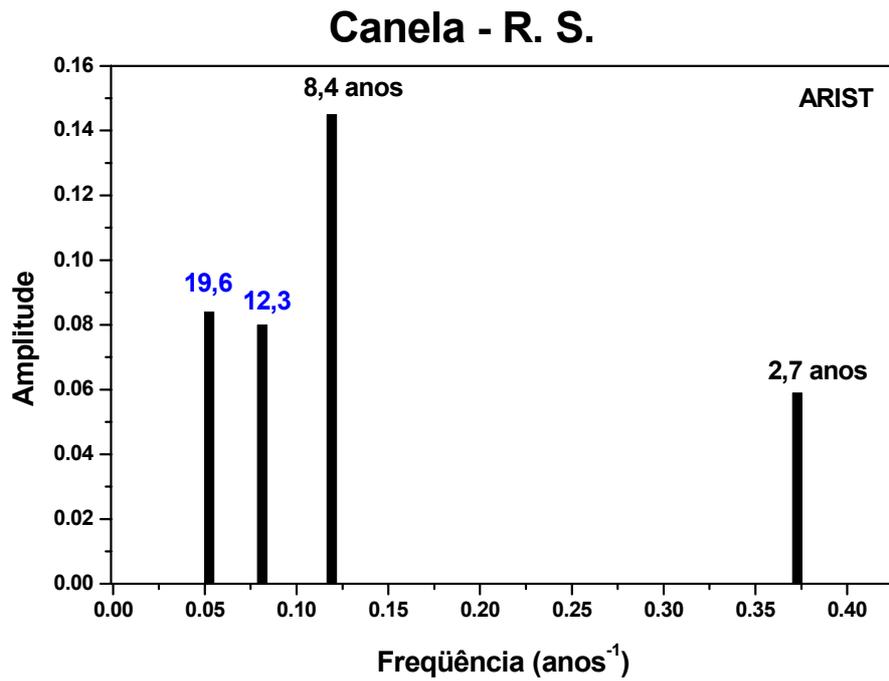


Fig. 5.20 – Espectro de amplitude da cronologia média de Canela.

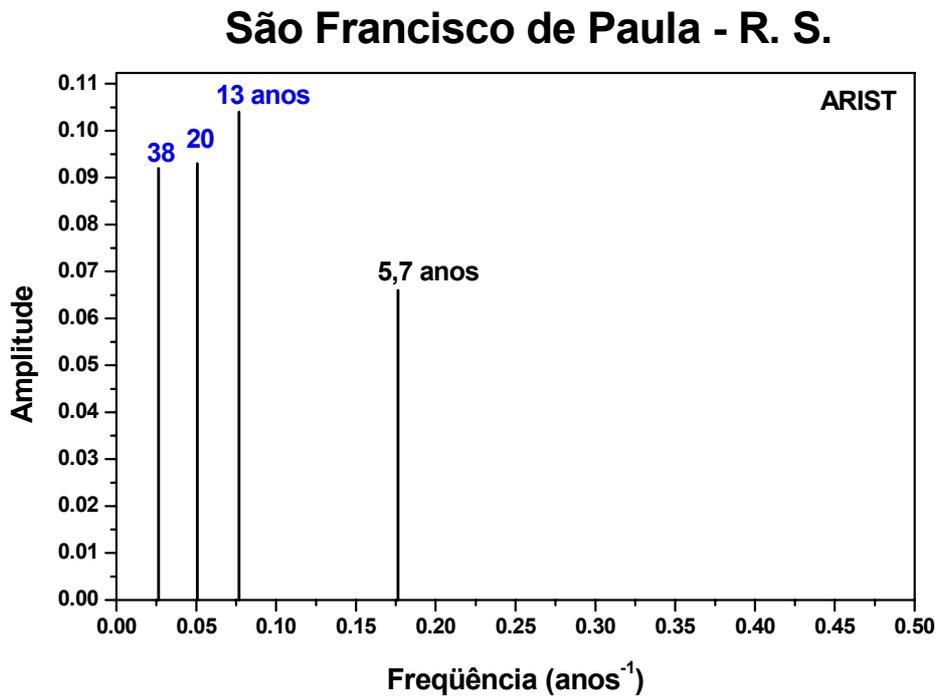


Fig. 5.21 – Espectro de amplitude da cronologia média de São Francisco de Paula.

Nova Petrópolis - R. S.

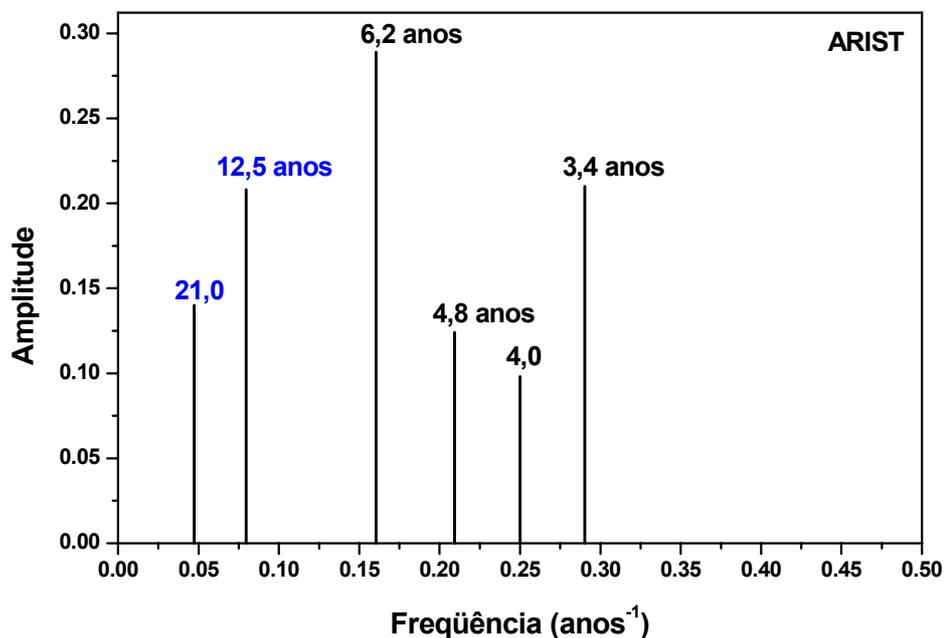


Fig. 5.22 – Espectro de amplitude da cronologia de Nova Petrópolis.

São Martinho da Serra - R. S.

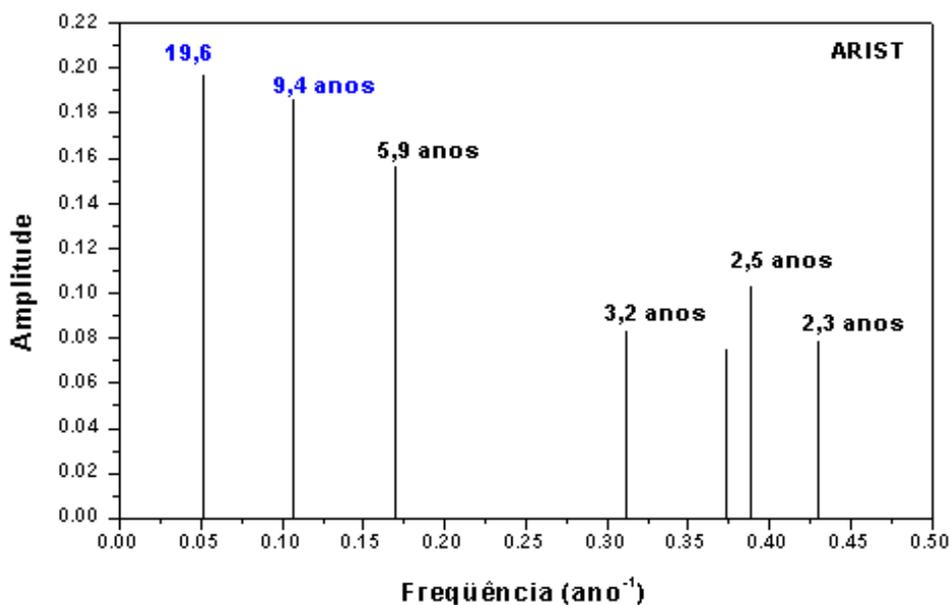


Fig. 5.23 – Espectro de amplitude da cronologia média de São Martinho da Serra.

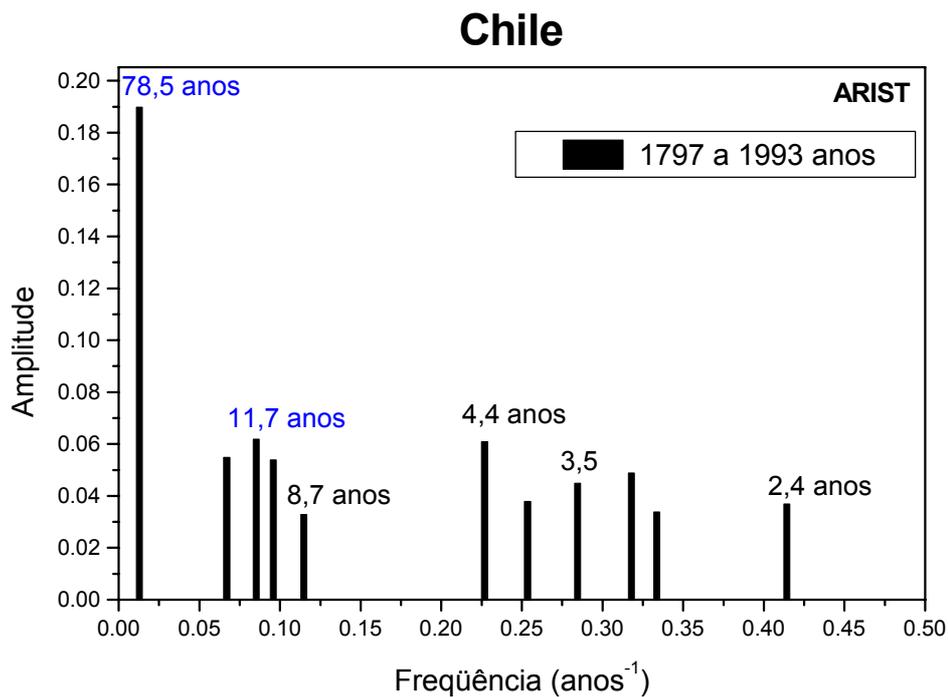


Fig. 5.24 – Espectro de amplitude da cronologia do Chile.

Em relação aos espectros obtidos pelos dois métodos, observa-se que apenas alguns períodos diferem de um para o outro, enquanto que a maioria dos períodos se apresentam de acordo com os dois métodos de análises.

5.6 – ATIVIDADE SOLAR OBSERVADA NOS ANÉIS DE CRESCIMENTO

Como mencionado no Capítulo 2, o período mais característico da atividade solar é o chamado ciclo dos 11 anos, observado no número das manchas solares. Este período de 11 anos ocorre devido à inversão do campo magnético do Sol, o que causa uma maior atividade solar e um maior número de manchas solares (Stuiver e Quay, 1980; Eddy, 1980).

Essa mesma periodicidade foi observada nos anéis de crescimento das amostras de árvores coletadas em Concórdia – SC, com um período médio de 10,6 anos (Figs. 5.13 e 5.19), em Canela – RS com um período em torno de 11,2 anos (para a máxima entropia, Figura 5.14) e 12,3 anos (para o ARIST, Figura 5.20), em São Francisco de Paula – RS com um período em torno de 13 anos (Figs. 5.15 e 5.21), em Nova Petrópolis – RS com

um período aproximado de 12 anos (Figs. 5.16 e 5.22), em São Martinho da Serra – RS com um período médio de 9,4 anos (Figs. 5.17 e 5.23) e da amostra obtida no Chile com um período de médio de 11,7 anos (Figs. 5.18, 5.24), para a série temporal de 1797 a 1993.

A atividade solar ainda expressa um comportamento cíclico de aproximadamente 22 anos. Este comportamento é representado pela reversão dos pólos magnético do Sol, ou seja, o campo magnético volta ao seu sentido original. Esta periodicidade é conhecida como ciclo solar de Hale de 22 anos (Mitchell et al., 1979).

Periodicidades próximas ao ciclo de Hale também foram encontradas nos anéis de crescimento das árvores de Concórdia (período médio de 24,6 anos), de Canela (períodos de 21,8 anos, para máxima entropia, e 19,6 anos, para o ARIST), de São Francisco de Paula (período de 21,5 anos, para máxima entropia, e 20 anos, para o ARIST), de Nova Petrópolis (período de 23,4 anos, para máxima entropia, e 21 anos, para o ARIST), de São Martinho da Serra (período médio de 19,4 anos) e do Chile (período de 22 anos, apenas para máxima entropia).

Existe um comportamento da atividade solar em torno dos 52 anos, conhecido como o quarto harmônico do ciclo de Suess de 208 anos (Damon e Jirikowic, 1992). Este ciclo não é claro nas séries dos anéis de crescimento de árvores das amostras coletadas. Em Concórdia observou-se periodicidades de 46 anos, para a máxima entropia (Figura 5.13), e 50 anos, para o ARIST (Figura 5.19), e a amostra do Chile mostrou uma periodicidade de 44 anos, apenas para máxima entropia (Figura 5.18). Estas periodicidades podem estar relacionadas ao ciclo de 52 anos. Já o período de 62,6 anos observado em São Francisco de Paula (Figura 5.15) pode ser uma indicação do ciclo de 52 anos e/ou uma possível tendência para o ciclo de solar de Gleissberg, de 80 anos, visto que a série temporal dos anéis de crescimento possui apenas 67 anos de comprimento. Esta periodicidade não é confiável, pois apresenta somente um ciclo de 62 anos.

No número das manchas solares foi observada uma repetição da atividade solar em torno de 80 anos, conhecida como ciclo solar de Gleissberg (Eddy, 1980). Este ciclo da

atividade solar foi encontrado apenas nas árvores de Concórdia, com uma periodicidade em torno de 84–85 anos (Figs. 5.13, 5.19) e no Chile, com um período de 78,5 anos para o ARIST (Figura 5.18).

Existem indicações recentes a partir de dados do número de manchas solares e climáticos sobre um período de 5,5 anos da atividade solar (Vitinsky et al., 1986), conhecido como segundo harmônico do ciclo de 11 anos (Damon and Jirikowic, 1992). Este ciclo também foi observado nas árvores de Concórdia, com um período de 5,8 anos (para o ARIST, apenas) (Figura 5.19), em São Francisco de Paula, com um período médio de 5,7 anos (Figs. 5.15, 5.21), em Nova Petrópolis, com um período médio de 5 anos (Figs. 5.16, 5.22), em São Martinho da Serra, com um período médio de 5,8 anos (Figs. 5.17, 5.23), e no Chile, com um período de 5 anos (somente para a máxima entropia) (Figura 5.18).

5.7 – OUTROS FENÔMENOS NOS ANÉIS DE CRESCIMENTO DE ÁRVORES

Nas altas frequências, baixos períodos, observa-se uma boa semelhança entre os espectros das densidades de potências e de amplitude. Isto indica que as árvores estão possivelmente respondendo a algum fenômeno comum, provavelmente climático e ambiental. No entanto os períodos em torno de 4 anos (Figs. 5.14 e 5.15) e 7-8 anos (Figs. 5.14, 5.15 e 5.20), para Canela e São Francisco de Paula, podem representar a época em que é feita uma intervenção pelo homem, mais conhecida como desbaste. O desbaste é a derrubada das árvores maiores que apresentam alguma anomalia de crescimento, defeito ou doença, para que as árvores menores e mais novas, que se apresentam em bom estado, possam se desenvolver melhor. Consequentemente, as árvores mantidas vivas apresentam um crescimento maior a cada 4 e 8 anos.

No entanto, observou-se períodos próximos a 4 anos nas séries dos anéis de crescimento de árvores de Concórdia, Nova Petrópolis, São Martinho e Chile e em torno de 8 anos em Concórdia e Chile., sendo que nestes locais não foi feito nenhum desbaste. Assim, acredita-se que exista uma provável ampliação nos sinais da densidade de potência e amplitude para estes períodos observados em Canela e São Francisco de Paula, ou seja,

além da intervenção do homem é possível que esteja, também, atuando algum fenômeno climático e/ou ambiental.

Um fenômeno climático/geofísico bem conhecido constitui-se pelos eventos El Niño. O que caracteriza a ocorrência do El Niño é o aquecimento acima do normal das águas do Pacífico tropical, da costa do Peru e Equador até o meio do oceano. Este fenômeno, aparentemente, apresenta uma periodicidade entre 3 a 7 anos (Gray et al.,1992). Nos espectros dos anéis de crescimento de árvores de Concórdia foram encontradas essas periodicidades, sendo que os picos mais dominantes se encontram em 6,9, 6,0 e 4,1 anos. Nova Pretópolis apresentou fortes picos nos períodos de 3,4, 4,8 e 6,3 anos, aproximadamente. São Martinho apresentou período de 3,2 anos. Os anéis de crescimento de árvores da amostra do Chile apresentaram intensos picos em 3,5, 4,4, 6,3 anos. Para Canela observaram-se periodicidades em 3,2, 4,4 e 6,2 anos (Figs. 5.14 e 5.20) e em São Francisco de Paula os anéis de crescimento de árvores apresentam periodicidades em 3,8 e 4,7 anos (Figura 5.15). Estes períodos mostram que os anéis de crescimento de árvores para estes lugares estão respondendo igualmente a um mesmo fenômeno, que pode ser devido aos eventos El Niño. Nota-se que em Canela e São Francisco de Paula o período em torno de 4 anos além do desbaste pode existir uma possível influência dos fenômenos de El Niño.

5.8 – CRONOLOGIA DOS ANÉIS DE CRESCIMENTO ANTES DE 1797

Como mencionado no item 5.4, as análises dos anéis de crescimento de árvores da amostra do Chile foram divididas em duas partes, uma para os anos de 1797 a 1993 (como visto anteriormente) e outra entre os anos de 1575 a 1796. Isto foi feito para que se pudesse ter uma comparação com a cronologia do sul do Brasil, de 1797 a 1996 anos, em Concórdia – SC. A série da espessura dos anéis de crescimento da amostra de árvore do Chile (Figura 5.6) foi padronizada por uma função de ajuste obtida por um filtro passa baixa, onde foi obtido o índice da espessura dos anéis de crescimento (Figura 5.12). A análise espectral pelo método da máxima entropia é mostrada na Figura 5.25, e pelo ARIST é mostrada na Figura 5.26.

Chile

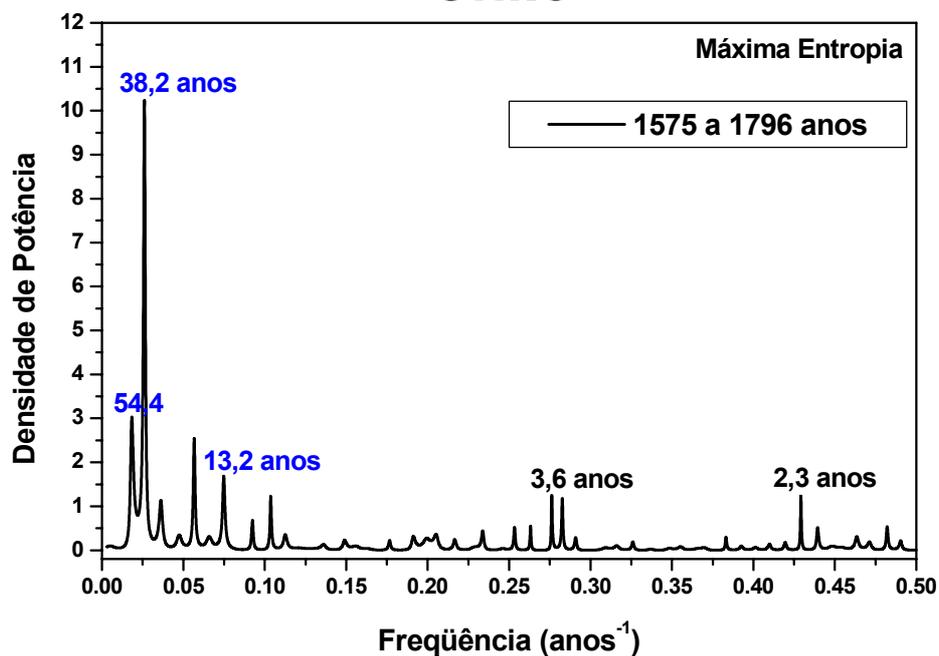


Fig. 5.25 - Espectro da densidade de potência da cronologia do Chile para os anos de 1575 a 1796.

Chile

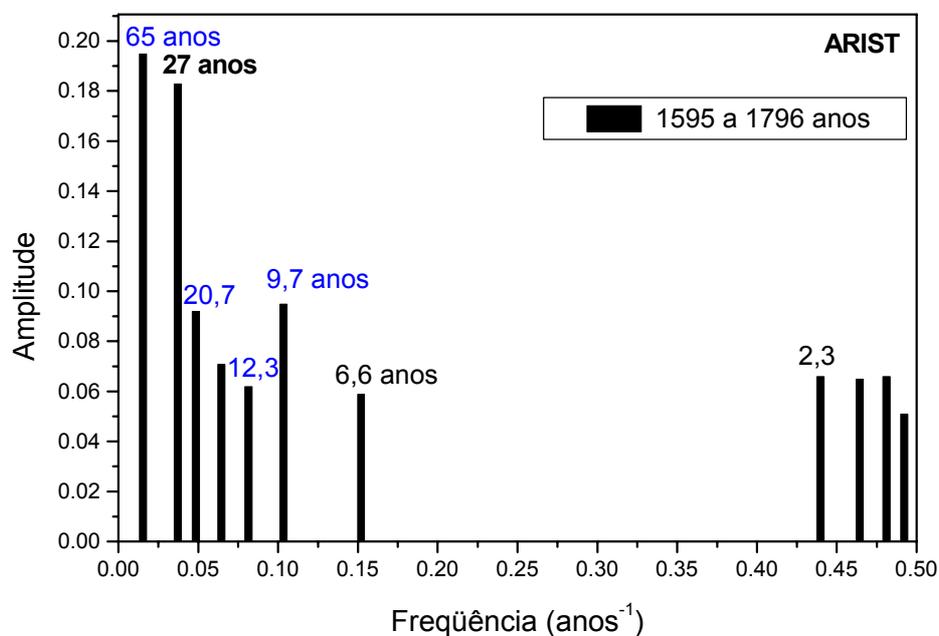


Fig. 5.26 - Espectro de amplitude da cronologia do Chile, para os anos de 1575 a 1796.

Observa-se nos espectros de ambos os métodos a presença das periodicidades de 13,2, 54,4 anos, para a máxima entropia, e $9,7 \pm 0,1$ a $12,3 \pm 0,2$ e $20,7 \pm 0,4$ anos, para o ARIST, pertencentes aos ciclos da atividade solar dos 11 anos; ciclo de Hale dos 22 anos e o quarto harmônico do ciclo de Suess - item 5.6. É interessante observar ciclos da atividade solar neste período devido à presença da época do mínimo de Maunder, de 1645 a 1715. A Figura 5.29 mostra a série temporal das espessuras dos anéis de crescimento do Chile com as suas tendências de crescimento. Isso revela que na época do mínimo de Maunder, os anéis de crescimento de árvores apresentavam uma tendência de diminuição das espessuras dos anéis de crescimento, com uma pequena tendência de crescimento para o fim da época do mínimo Maunder. Assim, os períodos do ciclo solar de 11 anos observado nos anéis de crescimento de árvores nos anos de 1575 a 1796 provavelmente pertencem à época anterior ao mínimo de Maunder, no qual os anéis de crescimento de árvores apresentavam uma tendência de crescimento de suas respectivas espessuras.

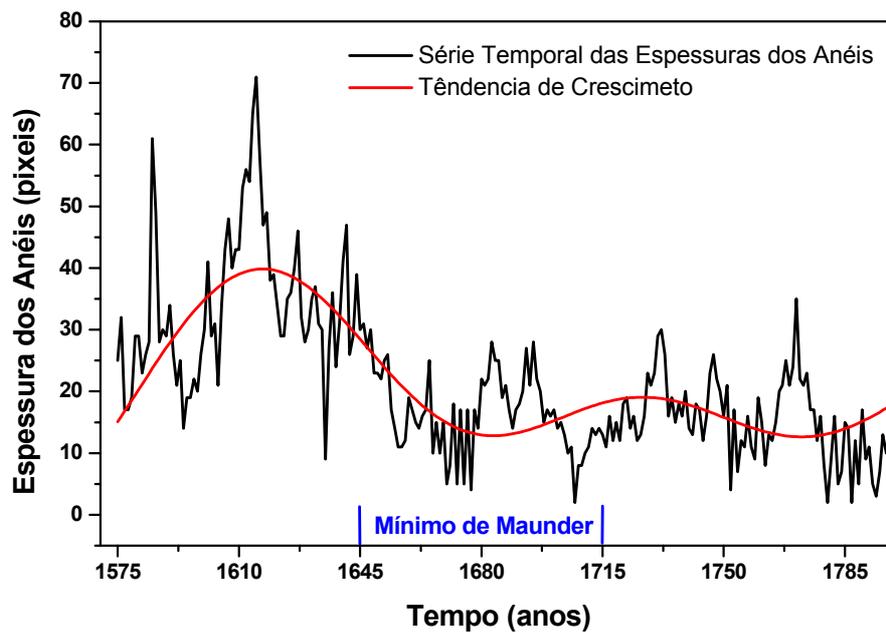


Fig. 5.27 – Série temporal dos anéis de crescimento de árvores (curva em preto) e a sua tendência de crescimento (curva em vermelho), juntamente com a indicação da época do mínimo de Maunder, em 1645 a 1715.

5.9 – RESULTADOS DAS PERIODICIDADES

As tabelas 5.1 e 5.2 apresentam as periodicidades atribuídas à atividade solar e aos eventos de El Niño, obtidas pelos métodos da máxima entropia e ARIST, respectivamente. Isto para as séries temporais médias dos anéis de crescimento de árvores representativas de cada lugar. As tabelas 5.1 e 5.2 ainda apresentam uma indicação dos fenômenos geofísicos para as periodicidades médias encontradas, que estão influenciando o crescimento dos anéis de crescimento de árvores.

TABELA 5.1 – APRESENTAÇÃO DAS PERIODICIDADES DOS FENÔMENOS GEOFÍSICOS OBTIDAS PELO MÉTODO DE MÁXIMA ENTROPIA PARA CADA LOCALIDADE

Lugares	Períodos (anos)						
	Concórdia	85,0	46,0	24,6	10,6	6,9	
Canela			21,8	11,2	6,2		4,4
São Francisco de Paula			21,5	13,4		5,7	4,7
Nova Petrópolis			23,4	12,8	6,5	5,3	4,2
São Martinho da Serra			19,2	9,3		5,8	3,3
Chile		44,0	22,0	11,8	6,3	5,0	4,4
Média	85,0	45,0	22,0	11,5	6,4	5,4	4,2
Faixas de Freqüências	0,0118	0,0217 a 0,0227	0,0407 a 0,0520	0,0746 a 0,1075	0,1449 a 0,1612	0,1724 a 0,2000	0,2128 a 0,3030
Fenômenos Geofísicos	Ciclo de Gleissberg	Quarto harmônico de Suess	Ciclo de Hale	Ciclo de 11 anos	El Niño	Segundo harmônico de 11 anos	El Niño

TABELA 5.2 – APRESENTAÇÃO DAS PERIODICIDADES DOS FENÔMENOS GEOFÍSICOS OBTIDAS PELO ARIST PARA CADA LOCALIDADE

Lugares	Períodos (anos)						
	Concórdia	84,2	48,3	24,6	10,6	6,9	5,8
Canela			19,1	12,3			
São Francisco de Paula			19,7	13,0		5,7	
Nova Petrópolis			21,2	12,6	6,2	4,8	4,0
São Martinho da Serra			19,7	9,3		5,9	3,2
Chile	78,5			11,7			4,4
Média	81,4 ± 5,0	48,3 ± 2,0	20,9 ± 2,0	11,6 ± 1,3	6,6 ± 0,1	5,6 ± 0,3	4,0 ± 0,2
Faixas de Freqüências	0,0119 a 0,0127	0,0207	0,0407 a 0,0524	0,0769 a 0,1075	0,1449 a 0,1612	0,1694 a 0,2083	0,2272 a 0,3125
Fenômenos Geofísicos	Ciclo de Gleissberg	Quarto harmônico de Suess	Ciclo de Hale	Ciclo de 11 anos	El Niño	Segundo harmônico de 11 anos	El Niño

5.10 – COMPARAÇÕES COM OUTROS REGISTROS NATURAIS

Os ciclos da atividade solar são observados indiretamente em muitos registros geofísicos (como apresentado no Capítulo II). Assim, resolveu-se fazer uma comparação entre os resultados obtidos neste trabalho, apresentados no Capítulo V, com os resultados obtidos nas séries temporais do cosmonuclídeo ^{14}C , dados de Attolini et al. (1993), e nos índices dos anéis de crescimento de árvores do Colorado, dados de Murphy e Veblen (1992). Os resultados ainda são comparados com os resultados das medidas dos níveis do Rio Paraguai em Ladário – MS. As Figs. 5.28, 5.29 e 5.30, que mostram as séries temporais do ^{14}C , o índice dos anéis de crescimento de árvores e o nível do Rio Paraguai, respectivamente. Nas Figs. 5.28 e 5.30 também são mostradas as tendências de longo período de cada curva (curva em vermelho).

As análises espectrais das séries temporais das Figs. 5.28 e 5.29 são divididas em duas, a primeira para os anos de 1797 a 1940, para o ^{14}C , e 1797 a 1987, para os anéis de crescimento de árvores; a segunda é para os anos de 1600 a 1796, no ^{14}C , e 1588 a 1796 nos anéis de crescimento de árvores. Isto é feito para que se possa ter uma comparação com a série temporal de 200 anos de Concórdia – SC.

Assim, eliminam-se as tendências de longo período das séries temporais, Figs. 5.28 e 5.30. Efetuam-se as análises espectrais pelos métodos da máxima entropia e ARIST. Os espectros das densidades de potências obtidos pelo método da máxima entropia para o intervalo de tempo entre os anos de 1797 a 1997 são apresentados na Figura 5.31; e os espectros das amplitudes obtidos pelo ARIST, para o mesmo intervalo, são mostrados na Figura 5.32. Enquanto que os espectros de densidade de potência e amplitude obtidos pelos métodos da máxima entropia e ARIST, para o intervalo antes do ano de 1797, são mostrados nas Figs. 5.33 e 5.34, respectivamente.

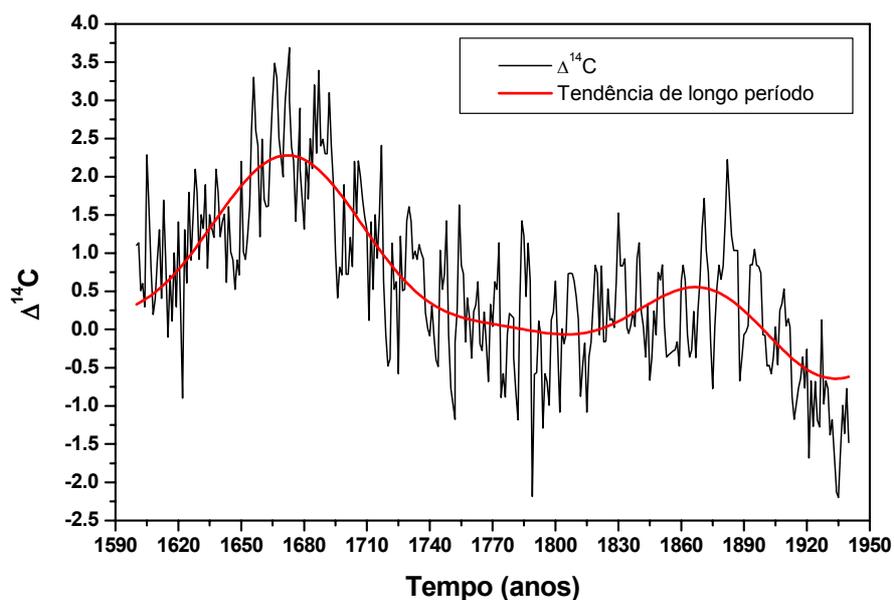


Fig. 5.28 – Variações do ^{14}C em anéis de crescimento de árvores de 1600 a 1940 (curva em preto) e a sua tendência de longo período (curva em vermelho).
 FONTE: Attolini et al., 1993.

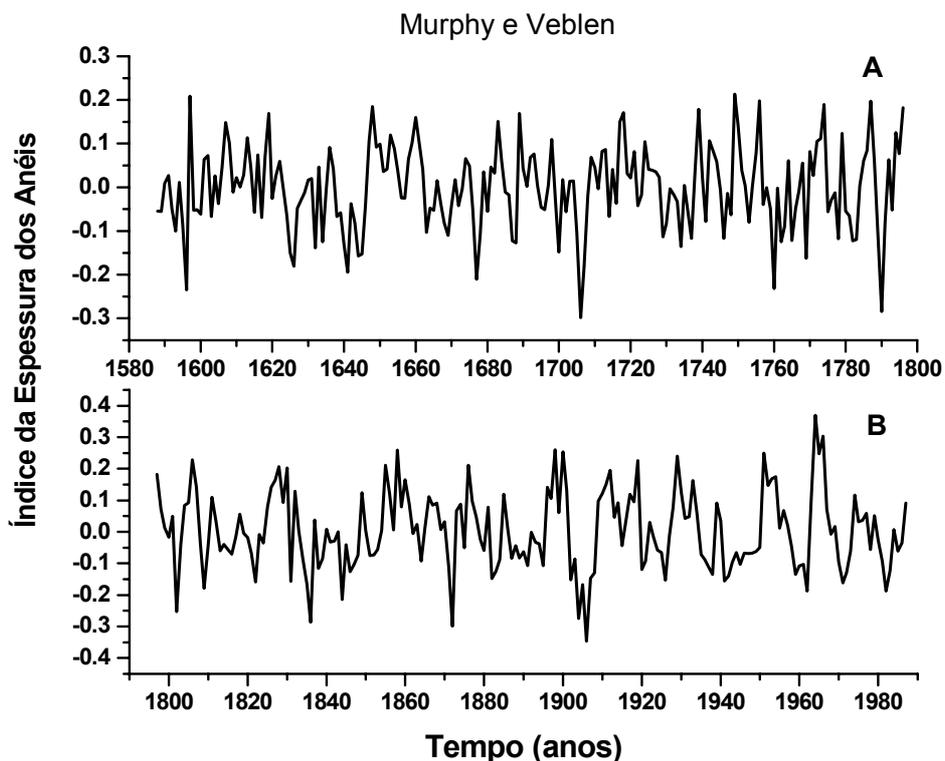


Fig. 5.29 – Índice das espessuras dos anéis de crescimento do Colorado, de 1588 a 1987.
 FONTE: Murphy e Veblen ,1992.

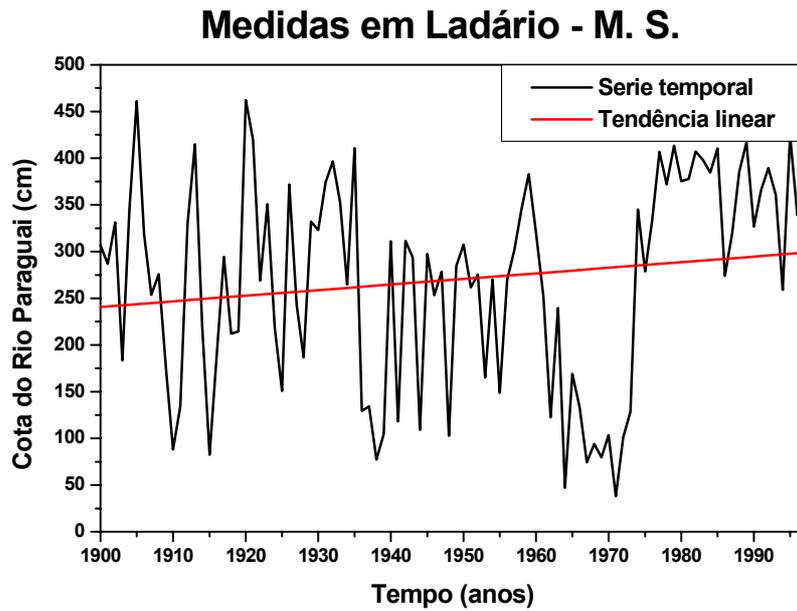


Fig. 5.30 – Série temporal do nível do Rio Paraguai em Ladário – MS, de 1900 a 1997 (curva em preto) e a sua tendência de longo período (curva em vermelho).

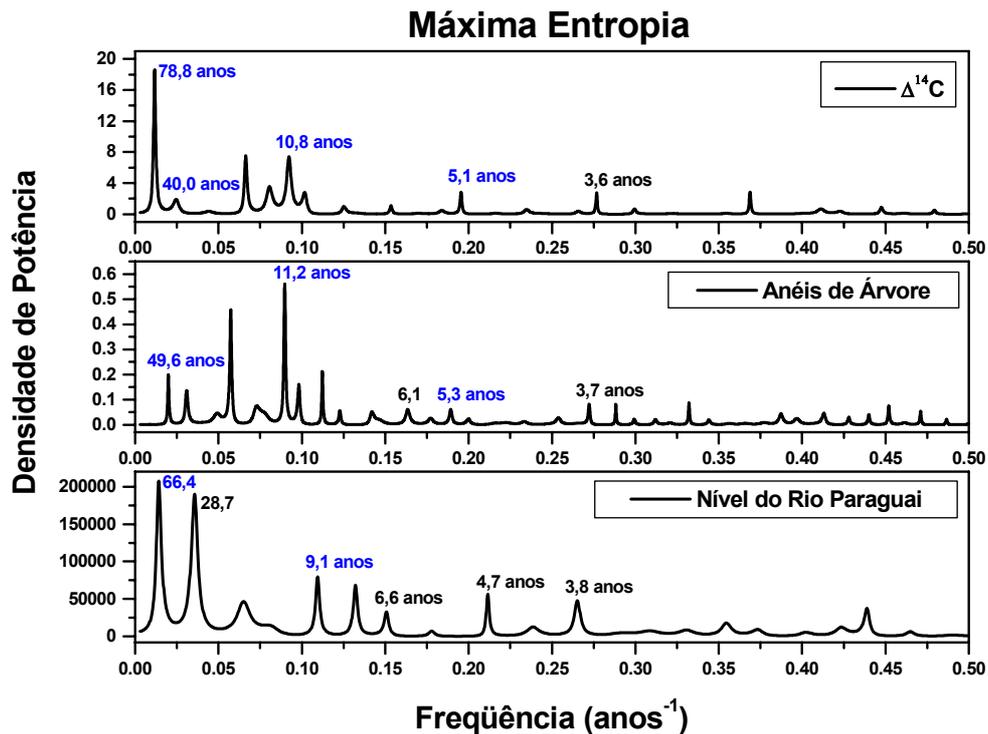


Fig. 5.31 – Espectros da densidade de potência das séries temporais do $\Delta^{14}\text{C}$ (para os anos de 1797 a 1940), anéis de crescimento de árvores (para os anos de 1797 a 1987) e do nível do Rio Paraguai.

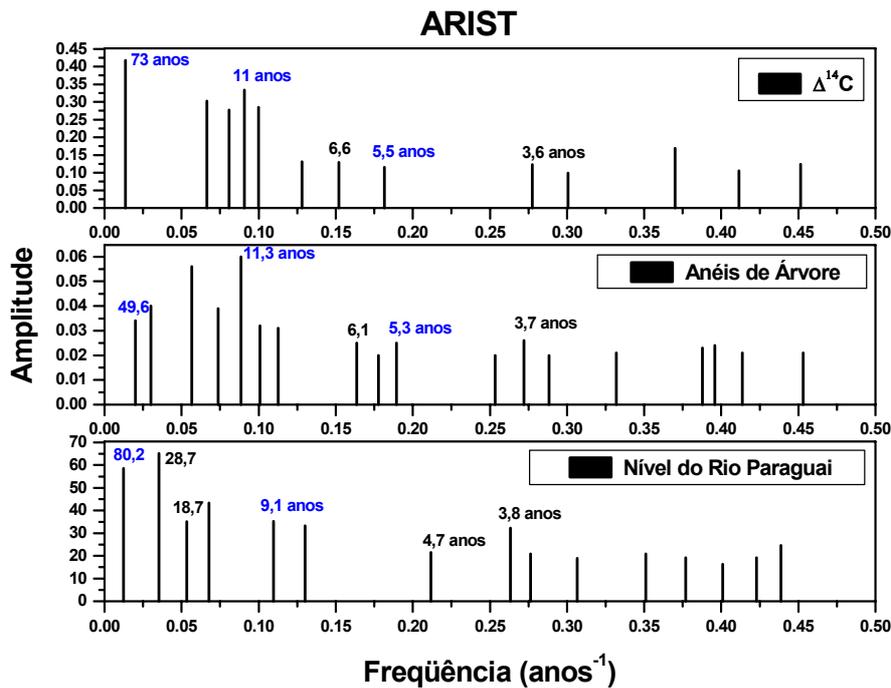


Fig. 5.32 – Espectros de amplitude das séries temporais do $\Delta^{14}\text{C}$ (para os anos de 1797 a 1940), anéis de crescimento de árvores (para os anos de 1797 a 1987) e nível do Rio Paraguai.

As periodicidades relacionadas com os ciclos solares obtidas pelo método da máxima entropia, para o $\Delta^{14}\text{C}$, foram 78,8, 10,8 e 5,1 anos e para o ARIST foram $73,0 \pm 3,4$, $11,0 \pm 0,1$ e $5,5 \pm 0,0$ anos. Attolini et al. (1993) encontraram períodos em torno de 64,0, 23,8 e 11,0 anos, isto para o intervalo de 1780 a 1940. O período de 64,0 anos pode representar uma tendência para o ciclo de Gleissberg, de 80 anos, encontrado pela análise da máxima entropia e ARIST (Figs. 5.31 e 5.32). No entanto não foi observado o ciclo de Hale dos 22 anos em nenhum dos dois métodos de análise para o intervalo de 1797 a 1940.

Já os anéis de crescimento de árvores apresentaram as periodicidades em torno de 49,6, 11,2 e 5,3 anos para a máxima entropia, e $49,6 \pm 2,6$, $11,3 \pm 0,0$ e $5,3 \pm 0,0$ anos para o ARIST. Murphy e Veblen (1992) observaram periodicidades de 11,1 anos pertencentes ao ciclo solar dos 11 anos, período de 22,2 anos do ciclo de Hale e o período de 5,3 anos, que representa o segundo harmônico do ciclo solar de 11 anos.

A periodicidade do nível do Rio Paraguai de 9,1 anos para máxima entropia e $9,1 \pm 0,2$ anos para o ARIST pode ser relacionada ao ciclo solar dos 11 anos. Nordemann (1998), em seu estudo da série do Rio Paraguai, não encontrou vestígios de uma possível influência do ciclo solar dos 11 anos. Assim, este período pode ser de algum fenômeno hidrológico e não solar. O período de 66,4 anos, para máxima entropia, pode representar uma tendência ao ciclo de Gleissberg de 80 anos; o que é visto pelo período de $80,2 \pm 9,4$ anos para o ARIST. Mas, como a série do nível do Rio Paraguai tem apenas 97 anos de dados, isto representa apenas um ciclo e não é nada conclusivo.

O resultado obtido na série temporal do $\Delta^{14}\text{C}$ para o ciclo solar de Gleissberg é semelhante aos resultados obtidos nos anéis de crescimento de árvores de Concórdia – SC. e do Chile (tabelas 5.1 e 5.2). Entretanto, não foi observado nos anéis de crescimento de árvores do Colorado. Attolini et al. (1993) encontraram o ciclo de Hale de 22 anos no $\Delta^{14}\text{C}$; Murphy e Veblen (1992) também encontraram o ciclo de Hale nos anéis de crescimento de árvores, no Colorado. Este ciclo também foi encontrado nos anéis de crescimento de árvores da região sul do Brasil e numa amostra de árvore do Chile (tabelas 5.1 e 5.2). Nos anéis de crescimento de árvores do Colorado foi observado um período de 49,6 anos (Figs. 5.31 e 5.32) que Murphy e Veblen não acharam. Este mesmo período foi achado nos anéis de crescimento de árvores de Concórdia e do Chile (tabelas 5.1 e 5.2). A série temporal do $\Delta^{14}\text{C}$ de Attolini et al. (1993) também apresenta o ciclo solar dos 11 anos, fortemente encontrado nos anéis de crescimento de árvores do sul do Brasil e no Chile (tabelas 5.1 e 5.2). O $\Delta^{14}\text{C}$ apresentou um período de 5,5 anos que Attolini et al. (1993) não acharam. No entanto, as análises espectrais mostraram este período na série (Figs. 5.31 e 5.32), no qual foi achado nos anéis de crescimento de árvores do Colorado por Murphy e Veblen (1992) e nos anéis de crescimento de árvores no sul do Brasil e no Chile (tabelas 5.1 e 5.2) e um período de 4,7 anos no nível do Rio Paraguai por Nordemann (1998).

As periodicidades médias em torno de 6,4 anos e 4,0 anos (tabelas 5.1 e 5.2) pertencentes, provavelmente ao El Niño, também foram encontradas nas séries do $\Delta^{14}\text{C}$, nos anéis de crescimento de árvores do Colorado e no nível do Rio Paraguai (Figs. 5.31 e 5.32). Nordemann (1998) também encontrou efeitos do El Niño no nível do Rio

Paraguai para os períodos próximos a 3,8 e 6,6 anos. Murphy e Veblen apresentam um período de 3,0 anos nos anéis de crescimento de árvores do Colorado.

Os espectros do $\Delta^{14}\text{C}$ (Figs. 5.33 e 5.34) apresentam periodicidades de 73,0, 20,0 e 10,0 anos, para a máxima entropia; e $70,0 \pm 5,1$, $20,0 \pm 0,3$, $13,0 \pm 0,1$ e $5,4 \pm 0,0$ anos, para o ARIST. Esses períodos representam respectivamente os ciclos solares de Gleissberg, de Hale, de 11 anos e o segundo harmônico de 11 anos. Nos espectros dos anéis de crescimento de árvores do Colorado (Figs. 5.33 e 5.34) observaram-se os períodos de 10,3 e 5,7-6,0 anos, para a máxima entropia, e $20,0 \pm 0,5$, $12,5 \pm 0,2$ e $5,0-6,0 \pm 0,0$ anos, para o ARIST, da atividade solar. O ciclo de Hale encontrado por Attolini et al. (1993), na série temporal do $\Delta^{14}\text{C}$, e por Murphy e Veblen (1992), nos anéis de crescimento de árvores, apareceu apenas nas séries temporais antes do ano de 1797, Figs. 5.33 e 5.34. As periodicidades referentes aos eventos El Niño encontradas no $\Delta^{14}\text{C}$ (Figs. 5.33 e 5.34) foram 6,2 e 3,0 anos, para a máxima entropia, e $6,2 \pm 0,0$ e $3,5 - 4,0 \pm 0,0$ anos, para o ARIST. Nos anéis de crescimento de árvores do Colorado foram observados os períodos de 6,3-6,9 e 3,6 anos, para a máxima entropia, e $6,3 \pm 0,0$ e $3,0 - 4,3 \pm 0,0$ anos, para o ARIST. Apenas Murphy e Veblen (1992) apresentaram uma periodicidade em torno de 3,0 anos em suas análises. Isto não quer dizer que eles não tenham encontrado períodos relacionados aos eventos El Niño, pois estavam procurando apenas períodos relacionados aos ciclos solares, não lhes interessava os possíveis eventos de El Niño em suas pesquisas.

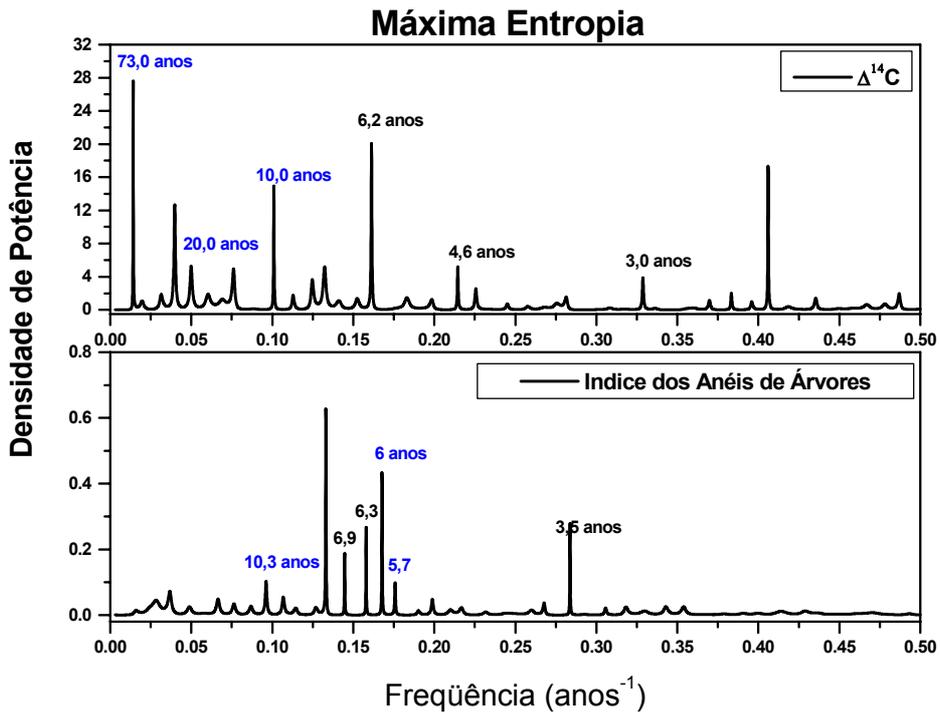


Fig. 5.33 – Espectros da densidade de potência das séries temporais do $\Delta^{14}\text{C}$ (para os anos de 1600 a 1796), anéis de crescimento de árvores (para os anos de 1588 a 1796).

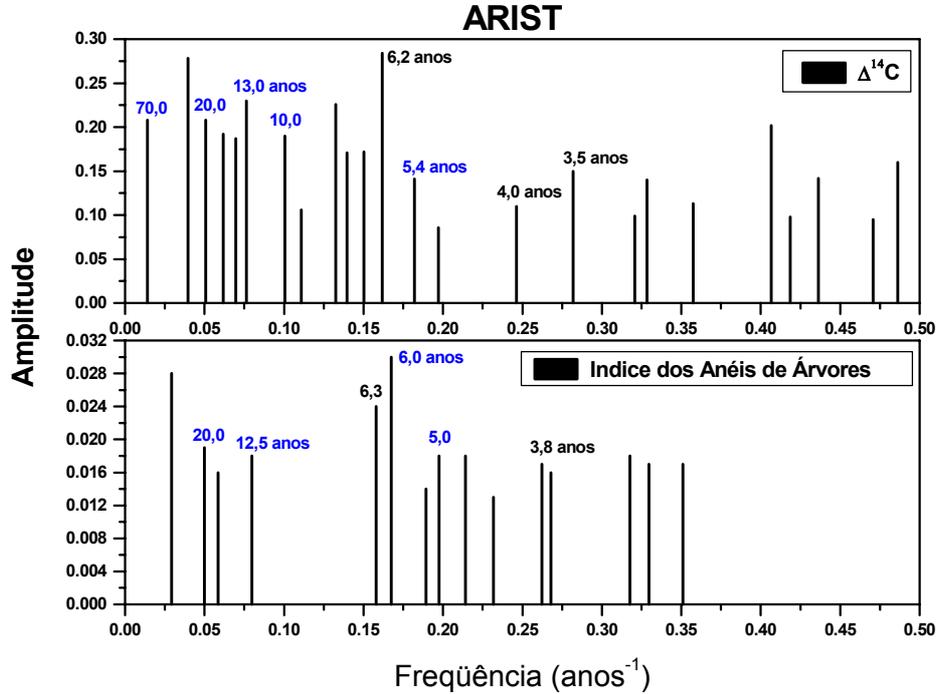


Fig. 5.34 – Espectros de amplitude das séries temporais do $\Delta^{14}\text{C}$ (para os anos de 1600 a 1796), anéis de crescimento de árvores (para os anos de 1588 a 1796).

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as conclusões obtidas e as observações feitas durante cada etapa deste trabalho, desde a coleta das amostras até a obtenção dos resultados a partir das análises efetuadas nas amostras. Também são feitas comparações dos resultados de periodicidade nos anéis de crescimento de árvores obtidos neste trabalho com os resultados obtidos por outros pesquisadores que utilizaram amostras de outras regiões do mundo.

6.1 – METODOLOGIA

A metodologia empregada para o estudo das amostras de árvores compreende a coleta dos dados, o tratamento físico aplicado nelas, a digitalização dos anéis em imagens e o programa TIIAA desenvolvido para a obtenção de séries temporais das espessuras dos anéis de crescimento.

6.1.1 – COLETA E TRATAMENTO DAS AMOSTRAS

Evidenciou-se a necessidade das amostras passarem por processos de tratamento (como os descritos no item 3.2) que possibilitassem uma melhor identificação e visualização dos anéis e dos falsos anéis de crescimento de árvores.

6.1.2 – DIGITALIZAÇÃO E TRATAMENTO DAS IMAGENS

Para a resolução adotada nas digitalizações das imagens dos anéis de crescimento de árvores, tomou-se como base a distância entre os anéis de uma amostra. Quando uma amostra apresenta anéis muito próximos uns dos outros, torna-se necessário digitalizar a amostra com uma resolução alta, de aproximadamente 900 a 1200 dpi. Entretanto, quando a amostra apresenta anéis mais distantes uns dos outros, faz-se a digitalização com uma resolução menor, de 500 a 700 dpi. Não existe uma resolução específica para

a digitalização de todas as amostras. O único inconveniente, em se adotar uma resolução alta na digitalização das amostras, é a quantidade de memória que a imagem ocupa no computador.

Desenvolveu-se e utilizou-se uma metodologia original para o estudo das amostras de árvores coletadas, através das imagens dos anéis de crescimento de árvores. Esta metodologia, representada pelo programa TIIAA, consiste em transformar as imagens dos anéis de crescimento de árvores em séries temporais de espessuras dos anéis de crescimento que possibilita a identificação de periodicidades e eventos. O programa TIIAA determina perfeitamente a espessura dos anéis das árvores.

6.1.3 – CURVAS DE AJUSTES

Não se conseguiu obter uma única curva de ajuste padrão para todas as amostras de árvores, que pudesse representar as tendências de longos períodos. Isto se deve, principalmente, às anomalias no crescimento apresentadas por cada árvore. Tornou-se necessário adotar uma determinada curva de ajuste para cada amostra de árvore, para as diferentes espécies. Isto foi feito de tal forma que se pudesse eliminar as tendências dos longos períodos no crescimento das amostras.

6.2 – PERIODICIDADES OBSERVADAS EM ANÉIS DE CRESCIMENTO

6.2.1 – CICLO SOLAR DE 11 ANOS

Nas espessuras dos anéis das árvores do sul do Brasil e do Chile foi encontrada uma periodicidade média de 11,5 anos, no método da máxima entropia, e $11,6 \pm 1,3$ anos, no método da regressão iterativa. Estas periodicidades são características do ciclo solar de 11 anos (tabelas 5.1 e 5.2). Este ciclo solar tem sido observado em anéis de crescimento de árvores por muitos cientistas para diferentes lugares do mundo.

Murphy (1990) observou periodicidades entre 9,3 a 13,3 anos em anéis de crescimento de árvores da Austrália, no qual que atribuiu ao ciclo solar de 11 anos. Murphy (1991)

analisando uma cronologia de 516 anos nos anéis de crescimento de árvores de Taiwan, encontrou períodos de 11,1 e 13,6 anos. Também foram encontradas periodicidades de 9,3 a 13,3 anos nos anéis de crescimento de árvores do Marrocos por Dutilleul e Till (1992). Kurths et al. (1993) encontraram um período de 12,4 anos, com o método de análise por Fourier, e de 12,8 anos, com o método da máxima entropia, nos anéis de crescimento de árvores da Alemanha. Murphy et al. (1996), a partir das análises dos anéis de árvore em que encontraram o ciclo solar de 11 anos, reconstruíram a variação anual do número das manchas solares. Mori (1981) achou evidências do ciclo solar de 11 anos nos anéis de crescimento de árvores de Formosa. Ammons et al. (1983), analisando os anéis de crescimento de árvores de 12 amostras do Yellowstone National Park, EUA, encontraram períodos em torno de 12 anos.

O ciclo solar de 11 anos também é observado em outros registros naturais ou observacionais, como nas concentrações de ^{10}Be no gelo da Groenlândia medidas por Beer et al. (1985), que encontraram uma periodicidade de 9,7 anos. Currie (1996) encontrou um período de 10,5 anos em dados observacionais da precipitação na Austrália. Currie (1995a), também encontrou um período de 10,5 anos nos índices de seca e umidade na China. Sylwan (1989) detectou um período de 10,5 anos, estudando os sedimentos depositados no fundo de lagos, devido ao degelo das geleiras na primavera, no Sul da Argentina. Currie (1995b), também estudando os sedimentos depositados no lago de Lake Saki, encontrou um período de 10,7 anos. Lawrence e Ruzmaikin (1998), analisando dados de temperatura média dos hemisférios norte e sul, encontraram indícios do ciclo solar de 11 anos. Kocharov et al. (1995), analisando os conteúdos do $\Delta^{14}\text{C}$ nos anéis de crescimento de árvores de Bashkiria, Rússia, encontraram períodos de 9,4-9,6 anos, com a análise de Fourier, e períodos entre 9,7 a 13,5 anos, com a análise de máxima entropia. Damon et al. (1998), analisando uma série temporal do $\Delta^{14}\text{C}$ em anéis de crescimento de árvores para o intervalo de tempo entre 1065 a 1250, encontraram períodos de 9,8 e 13,9 anos, os quais atribuíram ao ciclo solar de 11 anos.

6.2.2 – CICLO SOLAR DE 22 ANOS

As espessuras dos anéis de crescimento de árvores do sul do Brasil e da amostra do Chile ainda apresentaram um período médio de 22 anos, com a análise da máxima entropia, e $20,9 \pm 2,0$ anos, com o ARIST, que representa o ciclo solar de Hale dos 22 anos (tabelas 5.1 e 5.2). Este ciclo solar também tem sido encontrado em séries temporais dos anéis de crescimento de árvores em diferentes locais do mundo, como visto no Capítulo V para a série temporal de Murphy e Veblen (1992).

Murphy (1990) também encontrou o ciclo de Hale nos anéis de árvore do Colorado, com períodos entre 20 a 25 anos. Murphy (1991), ainda verificou a presença indícios do ciclo de Hale nos anéis de crescimento de árvores de Taiwan, com um período em torno de 25 anos. Ammons et al. (1983) em suas análises de 12 amostras de árvores encontraram períodos de 20 a 25 anos, correspondentes ao ciclo de Hale. Guiot (1987), em seus estudos dos anéis de crescimento de árvores e das temperaturas reconstruídas por dados meteorológicos observou o ciclo de Hale. Mitchell et al. (1979) acharam evidências de um ciclo de 22 anos nas secas do Oeste dos Estados Unidos, as quais relacionaram com o ciclo de Hale. Stockton e Meko (1983) também encontraram épocas repetidas de seca na região central de Iowa (EUA) que exibiam uma periodicidade em torno de 22 anos.

O ciclo de Hale também está presente no cosmonuclídeo ^{14}C . Attolini et al.(1993) encontraram um período de 23,8 anos no $\Delta^{14}\text{C}$. Nas análises da série temporal do $\Delta^{14}\text{C}$ de Attolini et al. (1993) pelos métodos da máxima entropia e do ARIST foi encontrado um período médio de 20,0 anos, para o intervalo de tempo entre 1600 a 1796. Kocharov et al. (1995), analisando o $\Delta^{14}\text{C}$ nos anéis de crescimento de árvores da Rússia, também encontrou o ciclo de Hale com períodos médios de 21,4 anos, utilizando a análise de Fourier, e 21,3 anos, utilizando a análise da máxima entropia. Damon et al. (1998) estudando o $\Delta^{14}\text{C}$ para um período de 185 anos encontrou um período de 24,3 anos, ao qual atribuiu ao ciclo solar de Hale dos 22 anos.

6.2.3 – CICLO DE 52 ANOS

Nos anéis de crescimento de árvores da amostra do Chile e das amostras de Concórdia – S. C. foram encontrados períodos de 44,0 a 54,4 anos, para o Chile, e 46,0 a 48,3 anos, para Concórdia – S. C. (Capítulo V). Isto indica que podem representar o ciclo de 52 anos, conhecido como quarto harmônico do ciclo de Suess de 208 anos (Damon et al., 1998). Kurths et al. (1993) também acharam períodos entre 49,0 a 53,0 anos nos anéis de crescimento de árvores da Alemanha, pertencentes ao ciclo de 52 anos.

Rigozo (1994), num estudo feito sobre os cosmonuclídeos atmosféricos ^{14}C – dados obtidos por Stuiver e Quay (1980) – e ^{10}Be – dados obtidos por Beer et al. (1985) –, encontrou períodos de $46,0 \pm 0,5$ e $53,2 \pm 0,6$ anos, para o ^{14}C , e de $45,0 \pm 1,0$ e $53,0 \pm 0,8$ anos, para o ^{10}Be . Stuiver e Braziunas (1989) analisando um registro de 9.600 anos do ^{14}C atmosférico encontraram períodos de 45,0 e 58,0 anos, com o método da máxima entropia, e 57 anos, com o método de Fourier, pertencentes a ciclo de 52 anos. Damon et al. (1998) também encontrou o ciclo de 52 anos, com um período de 51 anos, nos seus estudos do $\Delta^{14}\text{C}$. As análises da série temporal dos anéis de crescimento de árvores do Colorado, de Murphy e Veblen (1992), apresentaram indícios do ciclo de 52 anos com períodos médios de 49,6 anos com os métodos da máxima entropia e o ARIST (Figs. 5.31 e 5.32).

6.2.4 – CICLO DE GLEISSBERG

Os anéis das amostras de árvores de Concórdia – S. C. e da Cordilheira da Costa de Osorno, no Chile, apresentaram uma periodicidade de 85,0 anos, com o método da máxima entropia, e 81,4 anos, com o método ARIST, do ciclo solar de Gleissberg. Períodos próximos ao ciclo de Gleissberg também foram encontrados pelos métodos da máxima entropia e ARIST nas séries temporais do $\Delta^{14}\text{C}$ de Attolini et al. (1993) (Figs. 5.31 e 5.32), com um período médio de 76 anos, e no nível do Rio Paraguai (Figura 5.32).

Stuiver e Braziunas (1989) encontraram uma periodicidade de 88 anos, com a análise de Fourier, e 85 anos, com a máxima entropia, nas variações do ^{14}C atmosférico. Rigozo (1994) também encontrou um período de $79,5 \pm 1,8$ anos nas concentrações do ^{10}Be no gelo da Antártica, dados medidos por McHargue e Damon (1991). Schrove (1955) identificou um ciclo de 78 anos na atividade das manchas solares, devido ao ciclo de Gleissberg. Sonett e Finney (1990) registraram um ciclo dominante com períodos de 80-90 anos em uma longa série dos registros de ^{14}C . Murphy (1990), que encontrou um período de 90 anos nos anéis de árvore da Austrália, causado pelo ciclo de Gleissberg.

6.2.5 – CICLO SOLAR DE 5 ANOS

Uma possível presença do segundo harmônico do ciclo de 11 anos (Damon e Jirikovic, 1992), também conhecido como ciclo dos 5 anos, foi constatada em anéis de crescimento de árvores do sul do Brasil e na amostra do Chile – apenas para o método da máxima entropia - com um período médio de 5,4 anos (tabela 5.1), e 5,6 anos, para o método da regressão iterativa (tabela 5.2). Ammons et al. (1983) também constataram um ciclo de 5,0 anos em suas 12 amostras de árvores. Kurths et al. (1993) encontraram pronunciados picos em torno dos períodos de 5,7 anos, para a análise de Fourier, e 5,5 anos, para a análise da máxima entropia, referentes ao ciclo dos 5 anos.

Murphy e Veblen (1992) encontraram uma periodicidade próxima de 5,3 anos nos anéis de crescimento de árvores do Colorado. Esta mesma periodicidade também foi determinada pela análise espectral por máxima entropia (Figura 5.31) e ARIST (Figura 5.32) da série temporal dos anéis de crescimento de árvores de Murphy e Veblen (1992), para o intervalo de 1797 a 1987 e também foi encontrado um período de 5,7 anos, com a máxima entropia (Figura 5.33), e 5,0 anos, com o ARIST (Figura 5.34) para o intervalo de 1588 a 1796. Nas análises do $\Delta^{14}\text{C}$ de Attolini et al. (1993) foi constatada a presença dos períodos 5,1 anos, com a máxima entropia, e 5,5 anos, com o ARIST, para o intervalo de tempo de 1797 a 1940 anos (Figs. 5.31 e 5.32) e 5,4 anos no intervalo de tempo entre 1600 a 1796, apenas com o ARIST (Figura 5.34). Kocharov et al. (1995) encontrou o ciclo dos 5 anos nos conteúdos do $\Delta^{14}\text{C}$ na Rússia, com períodos

em torno de 5,4 a 5,5 anos, com os métodos de análise da máxima entropia e Fourier. Recentemente Damon et al. (1998) mostraram a existência do segundo harmônico do ciclo de 11 anos em suas análises do $\Delta^{14}\text{C}$, com períodos de 5,2 e 5,7 anos.

6.2.6 – EVENTOS EL NIÑO

Nas amostras de árvores do sul do Brasil e na do Chile, as possíveis ocorrências dos eventos El Niño se mostram nos períodos de 6,4 e 4,2 anos, com a máxima entropia (tabela 5.1), e de 6,6 e 4,0 anos, com o ARIST (tabela 5.2). Kane (1996) mostrou uma periodicidade em torno de 4 a 5 anos para o fenômeno El Niño. Wiles et al. (1998), também estudando anéis de crescimento de árvores, encontraram eventos de El Niño em torno de 3 e 7 anos. Gray et al. (1992) já tinham encontrado esta mesma variação de período para os eventos El Niño em seus estudos de modelagem. Períodos em torno de 3 – 4 e 6,5 anos estão presente nos anéis de crescimento de árvores de Taiwan (Murphy, 1991) e nos fósseis das amostras de madeira se observa um período de 6,1 anos (Murphy e Palmer, 1992). Damons et al. (1998) encontraram períodos de 6,1-6,8 anos e 3,1-4,0 anos nos conteúdos do $\Delta^{14}\text{C}$ atmosférico.

As análises espectrais pelos métodos da máxima entropia e do ARIST, para as séries do $\Delta^{14}\text{C}$ de Attolini et al. (1993), anéis de crescimento de árvores de Murphy e Veblen (1992) e dos níveis do Rio Paraguai, mostram períodos relacionados com os eventos El Niño. No $\Delta^{14}\text{C}$ de Attolini et al. (1993) observou-se periodicidades em torno de 3,0-4,0 anos e 6,2-6,6 anos para os dois intervalos de tempo da série (Figs. 5.31, 5.32, 5.33 e 5.34). Para os anéis de crescimento de árvores de Murphy e Veblen (1992) encontraram-se periodicidades próximas a 3,6–3,8 anos e 6,1-6,9 anos, para os dois intervalo de tempo da série (Figs. 5.31, 5.32, 5.33 e 5.34). Murphy e Veblen encontram apenas o período de 3 anos. Já nos níveis do Rio Paraguai observaram-se periodicidades de 3,8 e 6,6 anos (Figs. 5.31 e 5.32). As mesmas periodicidades foram também encontradas por Nordemann (1998).

6.3 – ESTATÍSTICA DOS SINAIS DE FREQUÊNCIAS

Para identificar melhor os sinais de frequências obtidos em cada método de análise, fez-se um histograma das frequências observadas, para os dois métodos separadamente. A Figura 6.1 mostra o histograma dos resultados para o método da máxima entropia e a Figura 6.2 mostra o histograma para o método ARIST. Os pontos que aparecem nos gráficos correspondem à frequência (ou período) central da banda espectral dominante em cada espectro da densidade de potência (máxima entropia) e amplitude (ARIST).

Os histogramas dos dois métodos de análises mostram que a periodicidade mais característica nas 39 amostras dos anéis de crescimento de árvores está em aproximadamente 12 anos, com uma ocorrência de 29 vezes com os dois métodos de análises, e em 20 anos, com uma ocorrência de 32 vezes com o método da máxima entropia e 28 vezes com o ARIST. Isto mostra uma forte ocorrência do ciclo solar dos 11 e 22 anos no crescimento dos anéis de crescimento de árvores das amostras coletadas no Sul do Brasil e na amostra do Chile. Também se obteve uma alta ocorrência para o período em torno de 5,5 anos, 28 vezes com a máxima entropia e 19 vezes com o ARIST. Isto mostra uma boa ocorrência do período de 5,5 anos, que é caracterizado como o segundo harmônico da atividade solar dos 11 anos (Vitinsky et al., 1986; Damon e Jirikowic, 1992).

O período próximo a 6,7 anos teve 27 ocorrências, para o método da máxima entropia, e 26 ocorrências, para o método da regressão iterativa, nos anéis de crescimento de árvores. Também se obteve uma alta ocorrência para o período de 4 anos, 20 ocorrências para a análise da máxima entropia e 22 ocorrências para a análise da regressão iterativa. Estes períodos podem ser devidos aos fenômenos de El Niño, que está influenciando o crescimento dos anéis de crescimento de árvores do Brasil e do Chile. No caso do período de 4 anos, existe também uma influência do desbaste nas árvores de Canela e São Francisco de Paula, além dos possíveis eventos El Niño.

Os resultados dos histogramas, para os dois métodos de análise, mostram que as principais periodicidades obtidas nas séries temporais médias, das espessuras dos anéis de crescimento de árvores para cada localidade, estão corretas. Isto indica que não houve perdas dos sinais de freqüências após a obtenção de uma série temporal média do índice dos anéis de crescimento de árvores, representativas de cada local, nas análises espectrais.

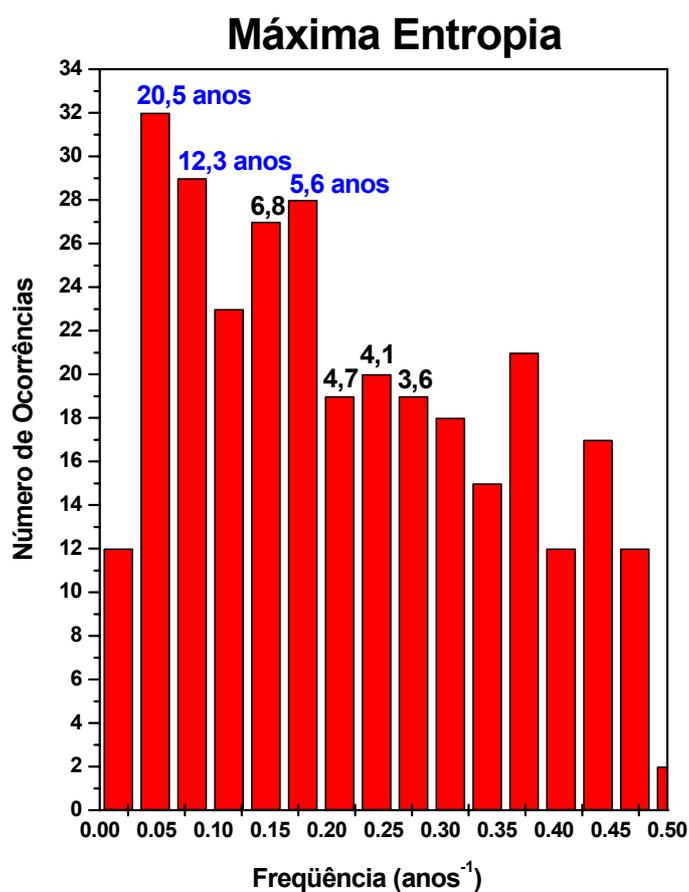


Fig. 6.1 – Estatística dos sinais de freqüências dos espectros da densidade de potência das 39 amostras dos anéis de crescimento de árvores.

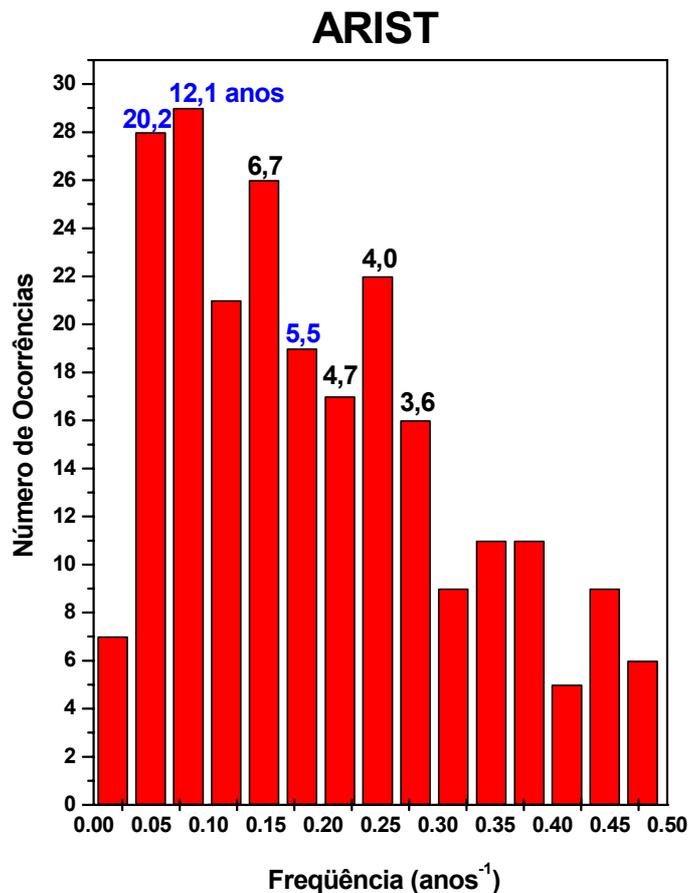


Fig. 6.2 – Estatística dos sinais de frequências dos espectros de amplitude das 39 amostras dos anéis de crescimento de árvores.

Estes resultados mostram que a atividade solar está influenciando o crescimento dos anéis de crescimento de árvores coletados no sul do Brasil e na amostra oriunda do Chile. Também se constatou uma possível influência dos fenômenos de El Niño nos anéis de crescimento de árvores.

6.4 – CONCLUSÃO GERAL

Nas séries temporais das espessuras dos anéis de crescimento de árvores das amostras coletadas na região sul do Brasil e da amostra oriunda do Chile foram encontrados períodos em torno dos ciclos solares de 11, 22 anos e um possível período de 5,5 anos, com os métodos de análises da máxima entropia e regressão iterativa. Esta forte

influência da atividade solar fica evidenciada pelos histogramas das Figs. 6.1 e 6.2, que mostram as maiores ocorrências para os períodos em torno de 12 anos, 29 ocorrências para os dois métodos, e 20 anos, 32 ocorrências para o método de análise da máxima entropia e 28 ocorrências para o ARIST e uma grande ocorrência para o período de 5,5 anos - 28 ocorrências para o método da máxima entropia e 19 ocorrências para o ARIST.

Os ciclos solares de 52 anos e de Gleissberg foram encontrados somente nas amostras das árvores de Concórdia – SC. (Figs. 5.13 e 5.19) e na amostra de árvore da Cordilheira da Costa de Osorno, no Chile (Figs. 5.18, 5.24 e 5.25). Isto foi verificado com um período médio de 46,0 anos para a máxima entropia, e $50,0 \pm 2,0$ anos para a regressão iterativa; um período de 85,0 anos para a máxima entropia, e $84,2 \pm 5,0$ anos para a regressão iterativa, em Concórdia e com períodos médios de 49,2 anos, apenas com a máxima entropia, para os dois intervalos de tempos, e $78,5 \pm 2,4$ anos, apenas para o ARIST, no intervalo de tempo entre 1797 a 1993 anos, no Chile.

Nas séries temporais das espessuras dos anéis de crescimento de árvores também foram encontradas periodicidades relacionadas a possíveis ocorrências dos eventos El Niño, para o sul do Brasil e a Cordilheira da Costa de Osorno, no Chile (tabelas 5.1 e 5.2). Os histogramas das Figs. 6.1 e 6.2 mostram uma grande ocorrência para os períodos em torno de 6,7 anos, 27 ocorrências para o método da máxima entropia e 26 ocorrências para o método da regressão iterativa, e próximos a 4,0 anos, 20 ocorrências para o método da máxima entropia e 22 ocorrências para o método da regressão iterativa.

Nas amostras de Canela – RS. e São Francisco de Paula existe, além dos possíveis eventos de El Niño, a intervenção do homem, mais conhecida como desbaste, para o período de 4 anos. Também foi constatado o desbaste das árvores para um período próximo a 8 anos.

Os resultados descritos neste trabalho foram obtidos a partir de amostras originais de árvores crescidas na América Latina, entre $27^{\circ} 11'$ e $41^{\circ} 00'$ de latitude sul. Isso mostra

que a atividade solar têm uma importante influência no meio ambiente, nesta região do globo terrestre.

6.5 – TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se a continuação desse estudo dos registros da atividade solar em anéis de crescimento de árvores no passado para um período de aproximadamente 2500 anos, no continente da América do Sul, a fim de encontrar periodicidades características da atividade solar e de fenômenos geofísicos.

Recomenda-se também fazer um estudo das épocas de baixa atividade solar, como os períodos conhecidos como mínimo de Wolf, Spörer e Maunder, e de alta atividade solar, como o período conhecido como o Aquecimento Medieval, que ocorreram neste milênio. Verificar-se-á a presença ou não da atividade solar e de seus efeitos no crescimento dos anéis de árvores para estas épocas.

Sugere-se ainda fazer um estudo de uma possível ocorrência de épocas semelhantes ao mínimo de Maunder a dois milênios atrás. Ainda verificar-se-á a presença de outros fenômenos geofísicos que podem ter influenciado o passado milenar do continente sul-americano.

6.5.1 – METODOLOGIA

Recomenda-se fazer um estudo das periodicidades encontradas em anéis de crescimento de árvores, pertencentes a atividade solar, em função do tempo, a fim de verificar o comportamento da atividade solar com o passar do tempo, constatar se ela se intensifica, diminui e/ou deixa de existir. Este estudo das periodicidades em função do tempo é feito pelas análises espectrais dinâmicas convencionais, como os métodos da máxima entropia, método da regressão iterativa ou pelo método de Fourier, ou pela análise das ondeletas.

Sugere-se também desenvolver um método, de identificação dos anéis de crescimentos de árvores, totalmente computacional e automático, não mais interativo, a fim de facilitar e agilizar a determinação das espessuras dos anéis de crescimento de árvores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ammons, R.; Ammons, A.; Ammons, R. B. Solar activity-related quasi-cycles in tertiary tree-ring records: evidence and methodological studies. In: McCormac, B. M ed. **Weather and Climate Responses to Solar Variations**, p. 536-543, 1983.
- Amparo, R. F.; Beeckman, H.; Lemeur, R. Thin section preparation of poplar tree-rings for computer-aided image analysis in dendrochronological investigations. **Silva Gandavensis** v.55, p.81-85, 1990.
- Attolini, M. R.; Cecchini, S.; Galli, M.; Kocharov, G. E.; Nanni, T. 400 year record of delta-C14 in tree rings: the solar activity cycle before, during and after the Maunder Minimum and longer cycles. **Il Nuovo Cimento**, v16, n.4, p.419-436, 1993.
- Baillie, M. G. L. **Tree ring dating and archaeology**. Chicago: The University of Chicago Press, 1982.
- Becker, B.; Kromer, B. The continental tree-ring record – absolute chronology, ¹⁴C calibration and climatic change at 11 kyr. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v.103, p.67-71, 1993.
- Beer, J.; Oeschger, H.; Finkel, R. C.; Castagnoli, G. C.; Bonani, G.; Attolini, M. R.; Galli, M. Accelerator measurements of ¹⁰Be: The 11 year solar cycle from 1180-1800 A.D. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, v.B10/11, p.415-418, 1985.
- Beer, J.; Siegenthaler, U.; Bonani, G.; Finkel, R. C.; Oeschger, H.; Sater, M.; Woelffi, W. Information on past solar activity and geomagnetism from ¹⁰Be in the Camp Century ice core. **Nature**, v.331, p. 675-679, 1988.
- Brantley, S.; Yamaguchi, D.; Cameron, K.; Pringle, P. Tree-ring dating of volcanic deposits. **Earthquakes and Volcanoes**, v.18, n.5, p.184-194, 1986.

- Briffa, K. R.; D.; Jones, P. D., Karlén, W., Schweingruber, F. H. Tree-ring density reconstruction of summer temperature patterns across western North America since AD 1600. **Journal of Climate** v.5, p.735-754, 1992.
- Briffa, K. R.; Bartolin, T. S.; Eckstein, D.; Jones, P. D., Karlén, W., Schweingruber, F. H.; Zetterberg, P. A 1400-year tree-ring record of summer temperatures in Fennoscandia. **Nature**, v.346, p.434-439, 1990.
- Burchuladze, A. A. et al. Radiocarbon variations with the 11-year solar during the last century. **Nature**, v. 287, p. 320-322, 1980.
- Burg, J. P. **Maximum entropy spectral analysis. Modern spectrum analysis.** New York: John Wiley & Sons, 1978. p.34-41.
- Clauson, M. L.; Wilson, J. B. Comparison of video and X-ray for scanning wood density. **Forest Products Journal**, v.41, n.3, p.58-62, 1991.
- Currie, R. G. Luni-solar 18.6 and solar cycle 10-11 year signals in Chinese dryness-wetness indices. **International Journal of Climatology**, v.15, p.497-515, 1995a.
- Currie, R. G. Luni-solar and solar cycle signals in Lake Saki varves and further experiments. **International Journal of Climatology**, v.15, p.893-917, 1995b.
- Currie, R. G. Variance contribution of luni-solar (M_n) and solar cycle (S_c) signals to climate data. **International Journal of Climatology**, v.16, p.1343-1364, 1996.
- Currie, R. G; Vines, R. G. Evidence for luni-solar M_n and solar cycle S_c signals in Australian rainfall data. **International Journal of Climatology**, v.16, p.1243-1265, 1996.
- Damon, P. E.; Jirikowic, J. L. The sun as a low-frequency harmonic oscillator. **Radiocarbon**, v.34, n.2, p.199-205. 1992.

- Damon, P. E.; Eastone, C. J.; Hughes, M. K., Kalin, R. M., Long, A. Peristykh, A. N.
 Secular variation of $\Delta^{14}\text{C}$ during the medieval solar maximum: a progress report..
Radiocarbon, v.40, n.1, p.343-350, 1998.
- Delwaide, A.; Fillion, L.; Payette, S. Spatiotemporal distribution of light rings in sub-
 arctic black spruce, Quebec. **Canadian Journal of Forest Research**, v.21,
 p.1828-1832, 1991.
- Douglass, A. E. **Climatic cycles and tree growth**. Washington, DC. Carnegie Institute
 of Washington Publications, 1928. v.2.
- Douglass, A. E. **Climatic cycles and tree growth: A study of cycles**. Washington, DC.
 Carnegie Institute of Washington Publications, 1936. v.3.
- Dustin, I.; Vollenweider, P.; Hofer, R. M.; Hainard, P. A study of the cambial zone and
 conductive phloem of common beech (*Fagus sylvatica* L.) using an image analysis
 method. II. Automated measurement procedure. **Trees**, v.9, p.113-117, 1994.
- Dutilleul, P.; Till, C. Evidence of periodicities related to climate and planetary behaviors
 in ring-width chronologies of Atlas Cedar (*Cedrus atlantica*) in Marocco.
Canadian Journal of Forest Research, v.22, p.1469-1482, 1992.
- Eddy, J. A. The Maunder minimum. **Science**, v.192, n. 4245, p.1189-1202, 1976.
- Eddy, J. A. Climate and the changing sun. **Climatic Change**, v.1, p.173-190, 1977.
- Eddy, J. A. The historical record of solar activity. In: Pepin, Eddy and Merrill ed.
**Proceedings of the conference on the ancient sun: fossil record in the earth,
 moon and meteorites**. p.119-134, 1980.
- Feng, X.; Epstein, S. Climatic trends from isotopic records of tree rings: the past 100-
 200 years. **Climatic Change**, v.33, p.551-562, 1996.
- Fritts, H. C. Tree rings and climate. **Scientific American**, v. 226, n. 5, p. 92-100, 1972.

- Fritts, H. C. **Tree rings and climate**. London. Academic Press, 1976.
- Gray, W. M.; Sheaffer, J. D.; Knaff, J. A. Hypothesized mechanism for stratospheric QBO influence on ENSO variability. **Geophysical Research Letters**, v. 19, n. 2, p. 107-110, 1992.
- Grissino-Mayer, H. D. An updated list of species used in tree-ring research. **Tree-Ring Bulletin**, v.53, p.17-43, 1993.
- Grissino-Mayer, H. D **The ultimate tree-ring web pages**. [online].
<http://www.ltrr.arizona.edu/~grissino/princip.htm>. Oct. 1996.
- Guiot, J. Reconstruction of seasonal temperatures in central Canada since AD 1700 and detection of the 18.6 and 22 – year signals. **Climatic Change**, v.10, p. 249-268. 1987.
- Hughes, M. K.; Kelly, P. M.; Pilcher, J. R.; Lamarche Jr., V. C. **Climate from tree rings**. Cambridge. Cambridge University Press, 1982.
- Jacoby, G. C. Application of tree ring analysis to paleo-seismology. **Reviews of Geophysics**, v.35, n.2, p.109-124, 1997.
- Jagels, R.; Telewski, F. Computer-aided image analysis of tree rings. **Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences**. Boston, p.76-93, 1990.
- Jirikowic, J. L. and Damon, P. E. The medieval solar activity maximum. **Climatic Change**, v.26, p.309-316, 1994.
- Kane, R. P. Maximum entropy spectral analysis of some artificial samples. **Journal of Geophysical Research**, v.84, p.965-966, 1979.
- Kane, R. P. Power spectrum analysis of solar and geophysical parameters. **Journal of Geomagnetic and Geoelectrical**, v.29, p.471-495, 1977.

- Kane, R. P. Quasi-biennial and quasi-triennial oscillations in some atmospheric parameters. **Pageoph**, v. 147, n. 3, p. 567-583, 1996.
- Kane, R. P.; Gobbi, D. Periodicities in the time series of annual minimum temperatures for the United States Gulf coast region. **Pageoph**, v.138, n.2, p. 324-333, 1992.
- Kane, R. P.; Trivedi, N. B. Comparison of Maximum Entropy Spectral Analysis (MESA) and Least-Squares Linear Prediction (LSLP) methods for some artificial sample. **Geophysics**, v. 47, p. 1731-1736, 1982.
- Kocharov, G. E.; Ostryakov, V. M.; Peristyykh, A. N.; Vasil'ev, V. A. Radiocarbon content variations and Maunder minimum of solar activity. **Solar Physics**. v.159, p.381-391. 1995.
- Kumagai, H.; Sweda, T.; Hayashi, K.; Kojima, S.; Basinger, J. F.; Shibuya, M.; Fukao, Y. Growth-ring analysis of early tertiary conifer woods from the Canadian High Arctic and its paleoclimatic interpretation. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v.116, p.247-262, 1995.
- Kurths, J.; Spiering, Ch.; Müller-Stoll, W.; Striegler, U. Search for solar periodicities in Miocene tree ring widths. **Terra Nova**, v.5, p. 359-363, 1993.
- LaMarche Jr., V. C. And Fritts, H. C. Tree-Rings And Sunspot Numbers. **Tree-Ring Bulletin**, v. 32, p. 19-33, 1972.
- Lawrence, J. K.; Ruzmaikin, A. A. Transient solar influence on terrestrial temperature fluctuations. **Geophysical Research Letters**, v. 25, n.2, p. 159-162, 1998.
- Lenz, O.; Schär, E.; Schweingruber, F. H. Methodische probleme bei der radiographisch-densitometrischen bestimmung der dichte und der Jahrringbreiten Von Holz. **Holzforschung**, v. 30, p. 114-123, 1976.
- Luckman, B. H. Glacier fluctuation and tree-ring records for the last millennium in the Canadian Rockies. **Quaternary Science Reviews**, v.12, p.441-450, 1993.

- Luckman, B. H. Developing a proxy climate records for the last 300 years in the Canadian Rockies – some problems and opportunities. **Climatic Change**, v.36, p.455-476, 1997.
- McHargue, L. R.; Damon, P. E. The global beryllium 10 cycles. **Reviews of Geophysics**, v.29, n.2, p.141-158, 1991.
- Martins, J. V.; Artaxo, P.; Ferraz, E. S. B. Estudo de anéis de crescimento de árvores da Amazônia por PIXE, RBS e densitometria por absorção gama para interferências ambientais. In: Encontro Nacional de Aplicações Nucleares 2. Rio de Janeiro 1993. **Anais**, p.309-310.
- Microcal Software, Origin user's manual. Nova York, 1997.
- Mitchell, S. M. Jr.; Stockton, C. W.; Meko, D. M. Evidence of a 22-year rhythm of drought in the Western United States related to the Hale solar cycle since the 17th century. In: Reidel, Dordrecht ed. **Solar Terrestrial Influences on Weather and Climate**, p.125-143. 1979.
- Mori, Y. Evidence of an 11-year periodicity in tree-ring series from Formosa related to the sunspot cycle. **Journal Climatology**, v.1, p.345-353, 1981.
- Murphy, J. O. Australian tree ring chronologies a proxy data for solar variability. **Proceedings ASA**, v.8, n.3, p. 292-297, 1990.
- Murphy, J. O. The downturn in solar activity during solar cycles 5 and 6. **Proceedings ASA**, v.9, n.2, p.330-331. 1991.
- Murphy, J. O.; Palmer, J. G. Ring-width variation in sub-fossil wood samples as an indicator of short-term solar variability 2000 yr BP. **Proceedings ASA**, v.10, n.1, p. 68-70, 1992.
- Murphy, J. O. and Veblen, T. T. Proxy data from tree-ring time series for the eleven-year solar cycle. **Proceedings ASA**, v.10, n.1, p.64-67, 1992.

- Murphy, J. O.; Sampson, H.; Veblen, T. T.; Villalba, R. Reconstruction of the annual variation in Zurich sunspot number from tree ring-index time series. **Tree Rings, Environment, and Humanity. Radiocarbon**, p.853-869, May 1996. Arizona, International conference, 1996.
- Murphy, J. O.; Veblen, T. T.; Villalba, R. Regression model for the 22-year Hale solar cycle derived from high altitude tree-ring data. **Proceedings ASA**, v.11, n.2, p.157-163, 1994.
- Nordemann, D. J. R. Periodicidades, tendências e previsão a partir da análise espectral dinâmica da série dos níveis do Rio Paraguai, em Ladário – MS (1900-1995). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.33, p.1787-1790, out. 1998. Número Especial
- Nordemann, D. J. R. **Search for periodicities in geophysical time series by iterative regression analysis in C**. São José dos Campos, INPE, 1992. 20p. (INPE-5420-PRE/1762).
- Parker, M. L.; Henschel, W. E. S. The use of Engelmann Spruce latewood density for dendrochronological purposes. **Canadian Journal of Forest Research**, v.1, p.90-98, 1971.
- Parker, M. L.; Maleski, K. R. Preparation of X-ray negatives of tree-ring specimens for dendrochronological analysis. **Tree Ring Bulletin**, v.30, p.11-22, 1970.
- Polge, H. Une nouvelle méthode de détermination de la texture du bois: l'analyse densitométrique de clichés radiographiques. **Annales de l'École Nat. Eaux et Forêts et de la Station de Recherche et Exper.**, v. 20, p.531-581, 1963.
- Polge, H. Etablissement des courbes de variation de la densité du bois par l'exploration densitométrique de radiographies d'échantillons prélevés à la tarière sur des arbres vivants. **Annales des Sciences Forestières**, v. 23, p. 1-206, 1966.

- Press, W. H.; Teukolsky, S. A.; Vetterling, W. T.; Flannery, B. P. **Numerical recipes in C: the art of scientific computing**. New York. Cambridge University Press. 1992.
- Rigozo, N. R. **Análise por regressão iterativa de periodicidades nas variações dos cosmonuclídeos atmosféricos Be-10 e C-14**. São José dos Campos, 79p. (INPE-5547-TDI/533). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1994.
- Sass, U.; Eckstein, D. The annual vessel area of beech as an ecological indicator. **Tree Ring and Environment: Proceedings of the International Dendrochronology Symposium. Lundqua Report**, v.34, p.281-285. 1992.
- Schrove, D. J. **Journal of Geophysical Research**, v. 60, p. 127, 1955.
- Schweingruber, F. H. **Tree rings: basics and applications of dendrochronology**. Holanda: Kluwer, Dordrecht, 1988. 276 p.
- Schweingruber, F. H. Radiodensitometry. **Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences**. Boston. p55-63, 1990.
- Scuderi, L. A. Tree-ring evidence for climatically effective volcanic eruptions. **Quaternary Reserch**, v.34, p.67-85, 1990.
- Sheppard, P. R.; Graumlich, L. J. A reflected-light video imaging system for tree-ring analysis of conifers. **Tree Rings, Environment and Humanity. Radiocarbon**, p.879-889, May 1996. Arizona: International conference, 1996.
- Sonett, C. P.; Finney, S. A. The spectrum of radiocarbon. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, v.330, p.15-21, 1990.
- Stockton, C. W.; Meko, D. m. Drought recurrence in the Great Plain as reconstructed from long-term tree-ring records. **Journal of Climatic Applied Meteorology**, v.22, p. 17-29. 1983.

- Stuiver, M. and Braziunas, T. Atmospheric ^{14}C and century scale oscillations. **Nature**, v.338, p. 405-408. 1989.
- Stuiver, M.; Quay, P. D. Changes in atmospheric carbon-14 attributed to a variable Sun. **Science**, v.207, n.4426, p.11-19, 1980.
- Sylwan, C. A. Paleomagnetism, paleoclimate and chronology of late Cenozoic deposits in southern Argentina. **Meddle Stockholm's University Geological Institute**, v. 277, p. 33-50, 1989.
- Thetford, R.D.; D'Arrigo, R. D.; Jacoby, G. C. An image analysis system for determining densitometric and ring-width time series. **Canadian Journal of Forest Research**, v.21, p.1544-1549, 1991.
- Ulrych, T. J. and Bishop, T. N. Maximum entropy spectral analysis and autoregressive decomposition. **Review of Geophysics**, v.13, p.183-200. 1975.
- Veblen, T.T.; Burns, B.R.; Kitzberger, T.; Lara, A.; Villalba, R. The Ecology of the Conifers of Southern South America. In: Enright, N.J.; Hill. R.S. **Ecology of the Southern Conifers**. Washington DC; Smithsonian Institution Press, 1995. p. 120-155.
- Vitinsky, Ju. I.; Kopetzki, M.; Kuklin G. B. **Statistics of spot-generating activity of the Sun**. Moscow: Nauka, 1986.
- Vollenweider, P.; Dustin, I.; Hofer, R. M.; Vittoz, P.; Hainard, P. A study of the cambial zone and conductive phloem of common beech (*Fagus sylvatica* L.) using an image analysis method. I. Influence of tree age on the structure. **Trees**, v.9, p.106-113, 1994.
- Waldmeier M. **The Sunspot-activity in the years 1610-1960**. Switzerland: Schlthess, 1961. p. 171.

Wiles, G. C.; D'Arrigo, R. D.; Jacoby, G. C. Gulf of Alaska atmosphere-ocean variability over recent centuries inferred from coastal tree-ring records. **Climatic Change**, v. 38, p. 289-306, 1998.

Wilson, R. C.; Hudson, H. S. Solar luminosity variations in solar cycle 21. **Nature**, v.332, p.810-812, 1988.

Wolberg, J. R. **Prediction analysis**. London: Northland D. Van Nostrand, 1967.

Yamaguchi, D. K.; Lawrence, D. B. Tree-ring evidence for 1842-1843 eruptive activity at the Goat Rocks dome, Mount St. Helens, Washington. **Bulletin of Volcanology**, v.55, p.264-272, 1993

APÊNDICE A

ANÁLISE ESPECTRAL

Neste apêndice são apresentados os métodos de análise espectral, em suas formas simplificadas, utilizados na procura das periodicidades. Os métodos são o da máxima entropia (AEME ou MESA) e o da regressão iterativa (método ARIST).

A.1 – ANÁLISE POR REGRESSÃO ITERATIVA DE SÉRIES TEMPORAIS

O método de Análise por Regressão Iterativa de Séries Temporais (ARIST) utiliza uma simples função senoidal com três parâmetros desconhecidos, a_0 = amplitude, a_1 = frequência angular e a_2 = fase da função (Wolberg, 1967; Nordemann, 1992; Rigozo, 1994). O ponto inicial do método é a definição da chamada função condicional, que é:

$$F = Y - a_0 \sin(a_1 t + a_2) \quad (\text{A.1})$$

onde Y é o sinal medido, t é o tempo e a_0 , a_1 , a_2 são os três parâmetros desconhecidos, que serão procurados.

Como o método é iterativo, a cada iteração são calculados os termos corretivos \underline{A}_0 , \underline{A}_1 e \underline{A}_2 . Eles serão aplicados aos parâmetros \underline{a}_0 , \underline{a}_1 e \underline{a}_2 , respectivamente. Os termos corretivos representam as soluções do sistema linear, expresso pela equação:

$$A = C^{-1}V \quad (\text{A.2})$$

onde

$$C_{ij} = \frac{\left(\frac{dF}{da_i}\right)\left(\frac{dF}{da_j}\right)}{L} \quad (\text{A.3})$$

$$V_i = \frac{\left(\frac{dF}{da_i}\right)F}{L} \quad (\text{A.4})$$

$$L = D_y^2 + \left(\frac{dF}{dt}\right)^2 D_t^2 \quad (\text{A.5})$$

\underline{L} é o coeficiente de ponderação, para cada ponto experimental. \underline{D}_y e \underline{D}_t representam o desvio padrão ou erro, associados aos \underline{Y} e \underline{t} , respectivamente. Os termos da direita das fórmulas (A3) e (A4) representam os somatórios dos elementos indicados, para os valores correspondentes a todas as medidas. Os símbolos "Sigma" foram omitidos neste trabalho, conforme o uso habitual neste tipo de cálculos.

Os termos corretivos \underline{A}_0 , \underline{A}_1 e \underline{A}_2 são aplicados aos parâmetros \underline{a}_0 , \underline{a}_1 e \underline{a}_2 , da seguinte forma:

$$a_0 = a_{0_0} - A_0 \quad (\text{A.6})$$

$$a_1 = a_{1_0} - A_1 \quad (\text{A.7})$$

$$a_2 = a_{2_0} - A_2 \quad (\text{A.8})$$

onde: a_{0_0} , a_{1_0} , a_{2_0} representam os valores iniciais, para a primeira iteração. Esses valores são escolhidos arbitrariamente. Para diminuir o tempo de cálculo, escolhe-se os valores iniciais com a mesma ordem de grandeza que os valores esperados.

A obtenção dos parâmetros desconhecidos \underline{a}_i deve respeitar um critério de convergência. As iterações são realizadas até que o somatório dos quadrados dos valores de \underline{A}_i fiquem abaixo de um dado valor. Assim, quando obtido esse critério de convergência, os valores dos parâmetros \underline{a}_i são considerados como sendo as melhores estimativas. Seus desvios padrões D_{a_i} são expressos por:

$$D_{a_i} = \frac{\sqrt{C_{kk}^{-1} S}}{\sqrt{n-p}} \quad (\text{A.9})$$

onde C_{kk} é o termo diagonal da matriz C^{-1} , n é o número de dados experimentais, p é o número de parâmetros desconhecidos e S é definido como:

$$S = \frac{F^2}{L} \quad (\text{A.10})$$

O programa realiza, sucessivamente, a procura dos valores dos parâmetros da função senoidal, através de uma varredura dos valores de frequência angular. A variação de frequência angular é de:

$$dw = \frac{2\pi}{t_{max}} \quad (\text{A.11})$$

onde $t_{max} = t_{final} - t_{inicial}$

A frequência angular máxima é:

$$w_{max} = dw \frac{N}{2} \quad (\text{A.12})$$

onde N é o número de dados.

Essa frequência angular, máxima, corresponde à frequência permitida, que é a chamada frequência de Nyquist, expressa por:

$$w_n = \frac{\pi}{\Delta t} \text{ ou } f_n = \frac{1}{2\Delta t} \quad (\text{A.13})$$

onde Δt é o intervalo de amostragem.

A.2 – ANÁLISE ESPECTRAL POR MÁXIMA ENTROPIA

A Análise Espectral por Máxima Entropia (AEME ou MESA) tenta ajustar um modelo autoregressivo (AR) (Burg, 1978; Hadin, 1986; Press et al., 1992) em uma série temporal de entrada y_t , ou seja, supondo-se que os dados de entrada sejam representados pelo processo:

$$y_t = a_0 x_t - a_1 y_{t-1} - a_2 y_{t-2} - \dots - a_m y_{t-m} \quad (\text{A.14})$$

onde t é a variável temporal, $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ são os coeficientes a serem determinados e x_t é relacionado com o ruído aleatório (ε_t) com média zero e variação σ^2 . O coeficiente a_0 é adotado como sendo um ($a_0=1$) e $x_t = \varepsilon_t$. Assim:

$$y_t = \varepsilon_t - a_1 y_{t-1} - a_2 y_{t-2} - \dots - a_m y_{t-m} \quad (\text{A.15})$$

$$\varepsilon_t = y_t + a_1 y_{t-1} + a_2 y_{t-2} + \dots + a_m y_{t-m} \quad (\text{A.16})$$

A seqüência dos a_t é conhecida como Predição de Erro (PE) e são estes coeficientes que a AEME tenta determinar.

Utilizando a variável transformada – Z , teremos uma representação mais conveniente e real do modelo AR (Eq. A.14), onde Z é o operador unidade de atraso expresso por:

$$Z y_t = y_{t-1} \quad (\text{A.17})$$

Assim:

$$y_t = \frac{1}{a_0 + a_1 Z + a_2 Z^2 + \dots + a_m Z^m} x_t \quad (\text{A.18})$$

Definindo um polinômio $A_m(Z)$ como:

$$A_m(Z) = a_0 + a_1 Z + a_2 Z^2 + \dots + a_m Z^m \quad (\text{A.19})$$

obtem-se:

$$\mathbf{Y}(\mathbf{Z}) = \frac{1}{\mathbf{A}_m(\mathbf{Z})} \mathbf{X}(\mathbf{Z}) \quad (\text{A.20})$$

onde $\mathbf{X}(\mathbf{Z})$ e $\mathbf{Y}(\mathbf{Z})$ são as transformadas – \mathbf{Z} da entrada x_t e saída y_t , respectivamente.

Agora, tomando a transformada da função de correlação de y_t , definida por :

$$\phi(\mathbf{Z}) = \mathbf{Y}(\mathbf{Z})\mathbf{Y}(\mathbf{Z}^{-1}) \quad (\text{A.21})$$

onde $\mathbf{Z} = e^{-i\omega}$

Produz-se o espectro de potência de y_t , com ω sendo a frequência angular em rad/s. Com isso, pode-se escrever:

$$\phi(e^{-i\omega}) = \mathbf{Y}(e^{-i\omega})\mathbf{Y}(e^{i\omega}) = |\mathbf{Y}(e^{-i\omega})|^2 \quad (\text{A.22})$$

ou

$$\phi(\omega) = |\mathbf{Y}(\omega)|^2 \quad (\text{A.23})$$

Substituindo na Eq. A.20 fica:

$$\phi(\omega) = \frac{1}{|\mathbf{A}_m(\omega)|^2} |\mathbf{X}(\omega)|^2 \quad (\text{A.24})$$

Para simplificar o cálculo, volta-se a assumir que a seqüência x_t é correlacionada com o ruído aleatório ($x_t = \varepsilon_t$) com média zero e variância σ^2 , ou seja, $|\mathbf{X}(\omega)|^2 = \sigma^2$, logo o espectro de potência da AEME fica:

$$\Phi(\omega) = \frac{\sigma^2}{|\mathbf{A}_m(\omega)|^2} \quad (\text{A.25})$$

APÊNDICE B

FUNÇÕES DE AJUSTES

Neste apêndice são apresentadas as funções de ajustes utilizadas na padronização das espessuras dos anéis. Todas as funções de ajustes que foram usadas fazem parte do software Origin 5.0 e estão referenciadas no manual do usuário do Origin (Origin User's Manual, 1997).

B.1 – AJUSTE LINEAR

$$Y(t) = a_0 + a_1 x(t) \quad (\text{B.1})$$

onde: $Y(t)$ é o crescimento esperado para o ano t ; a_0 e a_1 são os coeficientes de regressão; x é o comprimento do anel no ano t .

B.2 – AJUSTE EXPONENCIAL

$$Y(t) = ae^{-bt} + k \quad (\text{B.2})$$

onde: $Y(t)$ é o crescimento esperado para o ano t . a , b e k variam de série a série. Essa forma de curva tem sido muito usada nos estudos sobre o crescimento das coníferas na América do Norte.

B.3 – AJUSTE POLINOMIAL

$$Y(t) = a_0 + a_1 x(t) + a_2 x^2(t) + \dots + a_m x^m(t) \quad (\text{B.3})$$

onde: $Y(t)$ é o crescimento esperado para um dado t ; a_0, a_1, \dots, a_m são os coeficientes de regressão; x é o comprimento do anel no ano t ; m é o grau da função de ajuste.

Esta função é, muitas vezes, excelente para o ajuste de séries temporais do comprimento dos anéis, para os casos em que existam processos de distúrbios no crescimento das árvores (princípio de agregação – Capítulo II), além do crescimento biológico. Deve-se tomar muito cuidado no uso desta função de ajuste para não eliminar frequências ambientais importantes. Um dos maiores problemas no uso dessa aproximação é como determinar m .

B.4 – FILTRO PASSA BAIXA

O filtro passa baixa é obtido fazendo-se $0 < \alpha < 1$ na magnitude quadrada da função de transferência:

$$|H(\omega)|^2 = \frac{\beta}{(1 + \alpha)^2} \quad (\text{B.4})$$

onde α e β são reais, ω é a frequência angular.

Este filtro passa as componentes de baixas frequências como saída e atenuando as componentes de altas frequências.

B.5 – AJUSTE GAUSSIANO

$$y = y_0 + \frac{A}{\omega \sqrt{\frac{\pi}{2}}} e^{-\frac{2(x-x_0)^2}{\omega^2}} \quad (\text{B.5})$$

onde :

A é área total sobre a curva da base; x_0 é o centro do pico na abcissa; ω é igual a 2 vezes o desvio padrão da distribuição Gaussiana (2σ) ou aproximadamente 0,849 o comprimento do pico para a metade da altura; y_0 é base da curva; x representa os dados de entrada.

B.6 – AJUSTE LORENTZIANO

$$y = y_0 + \frac{2A}{\pi} \frac{\omega}{4(x - x_0)^2 + \omega^2} \quad (\text{B.6})$$

A é área total sobre a curva da base; **x₀** é o centro do pico na abcissa; **ω** o comprimento do pico para a metade da altura; **y₀** é base da curva; **x** representa os dados de entrada.