

UNIVERSIDADE DO VALE DO PARAÍBA
INSTITUTO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA E ASTRONOMIA

Iuri Rojahn da Silva

**RELAÇÕES ENTRE O CRESCIMENTO DA *Ocotea porosa* (Nees &
Mart.) Barroso E AS FORÇANTES CLIMATOLÓGICAS DO
SUDESTE DO PARANÁ**

São José dos Campos - SP

2018

Iuri Rojahn da Silva

RELAÇÕES ENTRE O CRESCIMENTO DA *Ocotea porosa* (Nees & Mart.) Barroso E AS FORÇANTES CLIMATOLÓGICAS DO SUDESTE DO PARANÁ

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia da Universidade do Vale do Paraíba, como complementação dos créditos necessários para obtenção do título de Doutor em Física e Astronomia.

Orientador: Prof. Dr. Alan Prestes
Coorientadora: Profa. Dra. Virginia Klausner de Oliveira

São José dos Campos - SP

2018

TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

Ficha catalográfica

Silva, Iuri Rojahn da
relações entre o crescimento da Ocotea porosa (Nees & Mart.)
Barroso e As forçantes climatológicas do Sudeste do Paraná / Iuri
Rojahn da Silva; orientador, Alan Prestes; co-orientadora
Virginia Klausner de Oliveira. - São José dos Campos, SP, 2018.
1 CD-ROM, 80 p.

Tese (Doutorado) - Universidade do Vale do Paraíba, São José
dos Campos. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia.

Inclui referências

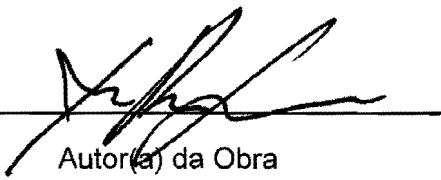
1. Física e Astronomia. 2. Dendrocronologia. 3. Imbuia. 4.
Análise espectral. 5. Variações climáticas e solares. I. Prestes,
Alan, orient. II. Oliveira, Virginia Klausner de, co-orient.
III. Universidade do Vale do Paraíba. Programa de Pós-Graduação
em Física e Astronomia. IV. Título.

Eu, Iuri Rojahn da Silva, autor(a) da obra acima referenciada:

Autorizo a divulgação total ou parcial da obra impressa, digital ou fixada em
outro tipo de mídia, bem como, a sua reprodução total ou parcial, devendo o
usuário da reprodução atribuir os créditos ao autor da obra, citando a fonte.

Declaro, para todos os fins e efeitos de direito, que o Trabalho foi elaborado
respeitando os princípios da moral e da ética e não violou qualquer direito de
propriedade intelectual sob pena de responder civil, criminal, ética e
profissionalmente por meus atos.

São José dos Campos, 3 de Setembro de 2018.


Autor(a) da Obra

Data da defesa:

21 / 06 / 2018

IURI ROJAHN DA SILVA

**“RELAÇÕES ENTRE O CRESCIMENTO DA *Ocotea porosa* (Nees & Mart.) Barroso E
AS FORÇANTES CLIMATOLÓGICAS DO SUDESTE DO PARANÁ”**

Tese aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor, do Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP, pela seguinte banca examinadora:

PROF. DR. FRANCISCO CARLOS ROCHA FERNANDES 

PROF. DR. ALAN PRESTES 

PROF.^ª DR.^ª VIRGINIA KLAUSNER DE OLIVEIRA 

PROF. DR. ARIAN OJEDA GONZÁLEZ 

PROF. DR. ALISSON DAL LAGO - INPE 

PROF. DR. LUÍS EDUARDO ANTUNES VIEIRA – INPE 

PROF.^ª DR.^ª MARIZA PEREIRA DE SOUZA ECHER – INPE 

Prof. Dr. Leandro José Raniero

Diretor do IP&D – Univap

São José dos Campos, 21 de Junho de 2018.

Dedico este trabalho

*à minha mãe Maria Elaine Rojahn da Silva que “sempre sonhou em ter um filho doutor”
e me incentivou a estudar desde a minha primeira infância;
à minha esposa Jasmine Nucci da Silva que me proporcionou a renovação da vida com
uma linda família;
ao meu primogênito Iago Rojahn da Silva e ao meu grande irmão Igor Rojahn da Silva,
ambos minhas inspirações e símbolos de persistência;
e ao meu anjinho Ícaro Rojahn Nucci que me alegra os dias e as noites.*

Agradecimentos

Gostaria de prestar meus agradecimentos ao meu orientador Prof. Dr. Alan Prestes pela dedicação, incentivo, companheirismo e socialização dos conhecimentos indispensáveis para a conclusão do trabalho (faltam palavras pra expressar minha gratidão).

À minha co-orientadora Profa Dra. Virginia Klausner de Oliveira pelo tempo dedicado ao trabalho com suas contribuições e metodologias inovadoras.

À minha colega gaúcha Dra. Caren Lorensi, companheira de laboratório pelas leituras e contribuições conceituais e procedimentais.

Ao professor Clóvis Angeli Sansigolo, meu eterno orientador, pela disponibilidade e contribuição na parte estatística do trabalho.

Aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia da UNIVAP pelos auxílios e sugestões prestadas.

Ao Diretor da Faculdade de Educação e Artes Prof. Dr. Milton Beltrame Junior por proporcionar condições a realização deste trabalho.

A todos os colegas de trabalho, que se tornaram amigos.

À Fundação Valeparaibana de Ensino (FVE) pela bolsa concedida.

Aos meus familiares que tiveram paciência para conviver com todas as oscilações de humor e ausência nesses anos.

*“Existem muitas hipóteses em ciência que estão erradas.
Isso é perfeitamente aceitável,
elas são a abertura para achar as que estão certas”. (Carl Sagan)*

Resumo

As árvores, durante sua vida, armazenam informações das variáveis climatológicas e geofísicas que atuaram durante seu crescimento. O sol atua de forma direta no seu crescimento pela ação da radiação de ondas curtas (realização da fotossíntese) e de forma indireta pela radiação de ondas longas recebida pela atmosfera (temperatura). A variabilidade solar e as Anomalias das Temperaturas da Superfície do Mar (ATSM) influenciam o clima de todas as regiões do planeta, podendo ser registradas nos anéis de crescimento, de árvores que pode ser utilizados como “proxy” dessas variáveis. Para estudar a relação dessas forçantes climáticas e dos elementos climáticos com as séries temporais de anéis de crescimento em árvores de imbuia (*ocotea porosa (nees & mart.) barroso*), coletadas na cidade de General Carneiro, localizada na região sudeste do estado do Paraná, foram utilizados o número de manchas solares que representa a atividade solar, as ATSM do setor equatorial do oceano atlântico representado pelo Índice do Atlântico Sul (IATLS) e do pacífico representado pela região do Niño 3.4, o Índice de Oscilação Sul (IOS), precipitação e temperatura do ar. A série dendrocronológica de imbuia foi obtida pela análise de agrupamento, um processo hierárquico aglomerativo, utilizando a medida de dissimilaridade entre os elementos pela distância euclidiana quadrática e o agrupamento feito pelo método de variância de Ward, sendo os grupos formados representados por dendrogramas. Foi empregada a Análise por Regressão Iterativa de Séries Temporais (ARIST) para a obtenção do espectro da série dendrocronológica, bem como a análise de cross-wavelet no estudo das relações entre a série dendrocronológica e as séries geofísicas e climáticas. Os períodos encontrados na análise espectral apresentaram periodicidades similares aos apresentados ao El Niño/Oscilação Sul (ENOS) (periodicidades entre 2 a 7 anos), ao ciclo de Schwabe de 11 anos (periodicidades entre 8 a 14 anos), ao ciclo climático de Brückner ~35 anos, e aos ciclos solares de ~200 anos (ciclo de Suess), ~400 e ~800 anos. dos espectros cruzados entre a série dendrocronológica e as séries geofísicas e climáticas, concluiu-se que: 1) o espectro cruzado entre o número de manchas solares e os anéis de crescimento apresentou duas periodicidades predominantes: um período intermitente de ~11 anos (ciclo de Schwabe) e outro em torno de 90 ~ 100 anos (ciclo de Gleissberg); 2) os períodos de 2 - 8 anos encontrados nos anéis de crescimento são provavelmente devido à variabilidade de ATSM do Pacífico, por meio do ENOS, que atua tanto na variabilidade da precipitação quanto na da temperatura; 3) os períodos em torno de 11 anos encontrados nos anéis de crescimento podem ser devido à variabilidade solar que atua tanto diretamente, quanto na influência na temperatura e na precipitação; 4) o período de ~17 anos entre a ATSM do Pacífico e Atlântico com a série dendrocronológica pode ser resultado do batimento dos períodos dos ciclos solar de Hale e de Gleissberg, sendo um efeito não linear da atividade solar em processos na atmosfera; e 5) o período de ~22 anos encontrado na série dendrocronológica está relacionado principalmente a variação de temperatura, e consequentemente, a precipitação devido à alta correlação entre ambas, que provavelmente tem sua origem no oceano Atlântico.

Palavras-chave: Dendrocronologia. Imbuia. Análise espectral. Variações climáticas e solares.

Abstract

The trees, during their lifetime, store information about the climatological and geophysical variables forcing their growth. The sun acts directly in their growth due to its short-wave radiation (photosynthesis), and indirectly by the long-wave radiation received by the atmosphere (temperature). The solar variability and Sea Surface Temperatures Anomaly (ATSM) influence the climate in all regions of the planet. These variabilities are marked on the growth rings, and also can be used as proxy. To study the relationship between climatic forcing and the growth ring time series of imbuia trees (*Ocotea Porosa* (Nees & Mart.) Barroso) collected in the city of General Carneiro, located in the southeast region of the state of Paraná. moreover, the sunspots number representing solar activity, the ATSM of the equatorial sector of the Atlantic Ocean represented by the South Atlantic Index (IATLS) and the Pacific represented by the Nino 3.4 region, the Southern Oscillation Index (IOS), precipitation and air temperature are used here. The dendrochronological series of imbuia was obtained by clustering analysis, a hierarchical agglomerative process using the measure of dissimilarity between the elements by the euclidean quadratic distance and by the variance method of ward have being used to construct the dendrograms. The regression and cross-wavelet analysis were also used to study the relationships between the dendrochronological series and the geophysical and climate series. These analyses indicate periodicities corresponding to ENOS (~2–7 yrs), Schwabe (~11 yr), Brückner (~35 yr), Hale (~22 yr), de Suess (~200yr), and others (~100 yr and ~800 yr). From the cross-wavelet spectra between the dendrochronological series and the geophysical and climatic series, it can be concluded: 1) the cross-wavelet spectrum between the sunspots number and the tree-ring growth had two main periodicities: an intermittent period of ~11 years (Schwabe cycle), and another around ~90–100 years (Gleissberg cycle); 2) the 2–8year periodicities found in the tree-ring growth may be due to the variability of ATSM in the Pacific, through ENOS, which acts on both precipitation and temperature variabilities; 3) the period of ~11 year found in the tree-ring growth may be due to the solar variability, which acts both directly and indirectly through the influence on temperature and precipitation; 4) the period of ~17 year between ATSM of the Pacific or Atlantic and the dendrochronological series may be the result of the beating of the solar periodicities such as the cycles of hale and Gleissberg, which are a nonlinear effect of the solar activity in the atmospheric dynamics; and 5) the ~22 year period found in the dendrochronological series may be related to temperature variation, and consequently, to the precipitation due to their high correlation between the two, which probably has its origin in the Atlantic Ocean.

Keywords: Dendrochronology. Imbuia. General Carneiro. Climate and solar variations.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa da (a) média anual de temperatura, e (b) média anual da precipitação para a região sul do Brasil.	9
Figura 2 – Sistemas Atmosféricos que atuam de forma direta e indireta na região Sul.	10
Figura 3 – Mapa da vegetação da Região Sul do Brasil	12
Figura 4 – Localização da Mesorregião Sudeste do Estado Paraná, onde se localiza General Carneiro.	13
Figura 5 – Classificações Climatológicas das regiões do estado Paraná destacando-se o município de General Carneiro.	14
Figura 6 – Série temporal com totais anuais de precipitação (linha azul) e a média climatológica (linha magenta) na região de General Carneiro, de 1900 a 2010.	14
Figura 7 – Série temporal com os totais no período Outono-Inverno (linha azul) e Primavera-Verão (linha magenta) na região de General Carneiro, de 1900 a 2010.	15
Figura 8 – Distribuição climatológica mensal da precipitação de General Carneiro, no período de 1900 - 2010.	15
Figura 9 – Série das temperaturas médias anuais de General Carneiro, no período de 1948 - 2010.	16
Figura 10 – Série temporal das médias anuais da temperatura para os períodos de Outono-Inverno (linha magenta) e Primavera-Verão (linha azul) na Região de General Carneiro, de 1948 a 2010.	16
Figura 11 – Distribuição das temperaturas médias mensais de General Carneiro, para o período de 1948 - 2010.	17
Figura 12 – Ilustração esquemática das componentes e interações do sistema climático.	18
Figura 13 – Série com ATSM do oceano Atlântico Sul e sua linha de tendência no período de 1854 - 2015.	21
Figura 14 – Série da ATSM do oceano Pacífico Equatorial para a região do El Niño 3.4 no período de 1854 - 2015.	22
Figura 15 – Série com valores do IOS no período de 1866-2015.	22
Figura 16 – Série com valores do número de manchas solares anuais no período de 1700 - 2015.	24
Figura 17 – <i>Ocotea porosa</i> (imbuia) na região de General Carneiro.	27
Figura 18 – Secção transversal macroscópica do lenho de <i>Ocotea porosa</i> mostrando os anéis de crescimento.	28

Figura 19	– Mesa de mensuração Velmex associada ao microscópio estereoscópico.	30
Figura 20	– Regiões consideradas sobre os Oceanos Pacífico (Niño 3.4) e Atlântico Sul (ATLS).	34
Figura 21	– Transformada wavelet contínua de uma função ($f(t) = \text{sen}(0,28545t)$) usando como wavelet analisadora chapéu mexicano (DOG).	39
Figura 22	– Similar à Figura 21, mas para a função $f(t) = \text{abs}(\text{sin}(0,28545 * t))$	40
Figura 23	– Similar à Figura 22, entretanto aqui o método de simetrização é aplicado, sendo assim o sinal replicado duas vezes sobre seu suporte original.	40
Figura 24	– Zoom do eixo do tempo da Figura 23 entre 0 e 66 anos.	41
Figura 25	– Dendrograma das séries de anéis de crescimento no período 1670 a 1832 construído com 10 raios obtidos de 6 árvores.	45
Figura 26	– Dendrograma das séries de anéis de crescimento no período 1832 a 1935, construído com 47 amostras obtidas de 16 árvores.	46
Figura 27	– Dendrograma das séries de anéis de crescimento no período 1935 à 2011, construído com 64 amostras obtidas de 21 árvores.	47
Figura 28	– Série dendrocronológica (linha preta) e o número de amostras (linha vermelha) do lenho de imbuia utilizadas em sua construção.	48
Figura 29	– Espectro da série dendrocronológica média de imbuia de General Carneiro.	49
Figura 30	– Fluxograma das relações entre os componentes climáticos, os elementos e os anéis de crescimento.	52
Figura 31	– Espectro de potência cruzado entre o número de manchas solares e a largura dos anéis de crescimento, com o nível de confiança de 95% (contorno branco).	53
Figura 32	– Espectro de potência cruzado entre o número de manchas solares e a ATSM do Atlântico, com o nível de confiança de 95% (contorno branco).	54
Figura 33	– Espectro de potência cruzado entre o número de manchas solar e a ATSM do Pacífico, com o nível de confiança de 95% (contorno branco).	55
Figura 34	– Espectro de potência cruzado entre o número de manchas solares e o IOS, com o nível de confiança de 95% (contorno branco).	56
Figura 35	– Espectro de potência cruzado entre o número de manchas e a precipitação na região, com o nível de confiança de 95% (contorno branco).	57
Figura 36	– Espectro de potência cruzado entre o número de manchas solar e a anomalia da temperatura do ar na região, com o nível de confiança de 95% (contorno branco).	57
Figura 37	– Espectro de potência cruzado entre a precipitação da região e a ATSM do Atlântico, com o nível de confiança de 95% (contorno branco).	59
Figura 38	– Espectro de potência cruzado entre a precipitação da região e a ATSM do Pacífico, com o nível de confiança de 95% (contorno branco).	59

Figura 39 –Espectro de potência cruzado entre a ATSM do Atlântico e a anomalia de temperatura do ar na região, com o nível de confiança de 95% (contorno branco).	60
Figura 40 –Espectro de potência cruzado entre a ATSM do Pacífico e a anomalia de temperatura do ar na região, com o nível de confiança de 95% (contorno branco).	61
Figura 41 –Espectro de potência cruzado entre a ATSM do Pacífico e a largura dos anéis de crescimento, com nível de confiança de 95% (contorno branco).	62
Figura 42 –Espectro de potência cruzado entre o Índice de Oscilação Sul e a largura dos anéis de crescimento, com o nível de confiança de 95% (contorno branco).	62
Figura 43 –Espectro de potência cruzado entre a ATSM do Atlântico e a largura dos anéis de crescimento, com o nível de confiança de 95% (contorno branco).	63
Figura 44 –Espectro de potência cruzado entre a precipitação e a largura dos anéis de crescimento, com nível de confiança de 95% (contorno branco).	64
Figura 45 –Espectro de potência cruzado entre a anomalia da temperatura do ar na região e a largura dos anéis de crescimento, com nível de confiança de 95% (contorno branco).	65
Figura 46 –Espectro de potência cruzado entre a precipitação e a anomalia da temperatura do ar na região, com o nível de confiança de 95% (contorno branco).	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Número de amostras obtidas por árvore.	30
Tabela 2 – Idade das árvores em função do número de anéis obtidas por árvore. . .	43
Tabela 3 – Fração de potência encontrada na largura média das séries de anéis de árvores.	50
Tabela 4 – Correlação linear entre os dados climatológicos, geofísicos e a cronologia dos anéis.	51
Tabela 5 – Intervalos com interações entre atividade solar nos períodos de 11 e 22 anos com as ATSM dos oceanos, IOS, Precipitação e Anomalia da Temperatura do ar.	58

Lista de abreviaturas e siglas

ATSM	Anomalias das Temperaturas da Superfície do Mar.
ARIST	Análise por Regressão Iterativa de Séries Temporais.
ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul.
CCM	Complexos Convectivos de Mesoescala.
Cfa	Clima inverno frio com verão quente, inverno e verão úmidos.
Cfb	Clima inverno frio com verão ameno, inverno e verão úmidos.
COI	Cone de influência.
Cwa	Clima com temperaturas moderadas com verão quente e chuvoso.
CWT	Transformada Wavelet Contínua.
ENOS	El Niño-Oscilação Sul.
FOM	Floresta Ombrófila Mista.
IAPAR	Instituto Agronômico do Paraná.
IATLS	Índice do Atlântico Sul.
ICWT	Transformada Wavelet Contínua Inversa.
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia.
IOS	Índice de Oscilação Sul.
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas.
IPE	Índice mensal do Pacífico Equatorial.
mPa	Massa Polar Atlântica.
mTa	Massa Tropical Atlântica.
NCEP	<i>Centro Nacional de Previsão Ambiental.</i>
OMM	Organização Meteorológica Mundial.
OQB	Oscilação Quase-Bienal.

PACE	Influência do Pacífico Equatorial.
SEMA	Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos.
TSM	Temperatura da Superfície do Mar.
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul.

Lista de símbolos

a_o	amplitude
a_1	frequência angular
a_2	fase da função
Y	sinal medido
D	distância Euclidiana
F	função
t	tempo
x	variável independente
y	variável independente
r	coeficiente de correlação linear
α	coeficiente angular da reta
β	coeficiente linear da reta
a	estimativa do parâmetro α
b	coeficiente de regressão linear
f	função
ψ	wavelet mãe
a	escala
b	posição
$W(a,b)$	coeficiente wavelet

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	2
1.2	Importância da pesquisa	4
1.3	Problema físico	4
1.4	Objetivo geral	5
1.5	Objetivos específicos	5
1.6	Estrutura da Tese	5
2	CLIMATOLOGIA DA REGIÃO SUL DO BRASIL	7
2.1	Sistemas Atmosféricos sobre a Região	9
2.2	A Vegetação e as Características Climatológicas	11
2.3	Localização e Classificação climática de General Carneiro	12
2.4	Interações Climatológicas e Geofísicas no Clima da Região	16
2.5	Interação Oceano-Atmosfera e sua Influência na Região Sul	17
2.6	Oceano Atlântico Sul	20
2.7	Oceano Pacífico Equatorial	21
2.8	El Niño - Oscilação Sul (ENOS)	21
2.9	Índice de Oscilação Sul (IOS)	22
2.10	Forçante Climático - o Sol	23
2.11	Atividade Solar e Número de Manchas	23
2.12	O Uso da Dendrocronologia no Estudo do Clima	25
2.13	Anel de Crescimento	26
2.14	<i>Ocotea porosa (Nees) Barroso</i> - Imbuia	26
3	MATERIAIS e MÉTODOS	29
3.1	Descrição do material empregado no estudo	29
3.2	Obtenção das Séries Dendrocronológicas	29
3.3	Série dendrocronológica de Imbuia	30
3.4	Análise de Agrupamento	31
3.5	Distância Euclidiana Quadrática	31
3.6	Método da variância mínima de Ward	32
3.7	Dendrograma	32
3.8	Dados Geofísicos e Climatológicos	33
3.9	Temperatura de Superfície do Mar: Oceanos Atlântico e Pacífico	33
3.10	Métodos de Análise	34
3.11	Análise Espectral	34

3.12	Correlação e Regressão Linear Simples	35
3.13	Filtros Digitais	36
3.14	Análise Wavelet	36
3.15	Efeitos de fronteira	38
4	RESULTADOS e DISCUSSÕES	43
4.1	Série da Espessura de Anéis de Crescimento de Imbuia	43
4.2	Análise Espectral da Série Dendrocronológica	48
4.3	Correlações da Série Dendrocronológica com as Séries Geofísicas e Climatológicas	50
4.4	Análises por Cross-Wavelets entre a Séries dendrocronológica/ Climatológica/Geofísicas	52
4.5	Cross-Wavelet entre a Série Dendrocronológica com as Manchas Solares	53
4.6	A influência solar nas variáveis oceânicas e climatológicas (Efeito de cima para baixo)	54
4.7	A influência dos Oceanos sobre o clima (Efeito de baixo para cima)	58
4.8	ATSM e IOS e os Anéis de Crescimento	61
4.9	Cross-Wavelet entre a Série Dendrocronológica com as Séries Climatológicas	64
5	CONCLUSÃO	67
5.1	Trabalhos Futuros	69

1 INTRODUÇÃO

Séries temporais de anéis de crescimento de árvores podem ser analisadas a fim de revelar padrões espaciais e temporais das variações climáticas em resposta a forçantes naturais, tais como El Niño - Oscilação Sul (ENOS), erupções vulcânicas e ciclos solares (FYE, 2001). Os anéis de crescimento das árvores podem ser considerados como “testemunhos” do ambiente e do clima que afetaram o seu crescimento (FRITTS, 1976).

Vários fatores ambientais simultâneos influenciam o crescimento da árvore, entre eles, a radiação solar, a temperatura, a precipitação, a umidade do solo, a umidade atmosférica, os nutrientes, a vizinhança, as pragas e as doenças. Dependendo das condições ambientais do local em que a árvore vive ou viveu, alguns desses fatores podem ou puderam prevalecer. Temperatura, luz e precipitação desempenham um importante papel em regiões com mudança de estações bem definidas e induzem diferentes taxas de crescimento causadas pela diferença de tamanho das células, o que permite o reconhecimento visual dos anéis de crescimento das árvores. Portanto, a variação de espessura de anéis anuais reflete a sensibilidade da árvore a fatores ambientais no local, no qual ela se desenvolve (NORDEMANN; RIGOZO; FARIA, 2005). Assim, as flutuações de precipitação e de temperatura causadas pelo ENOS e por outros forçantes naturais podem ser gravadas nos anéis de crescimento das árvores. É conhecido que ENOS tem uma influência muito forte sobre o clima da América do Sul, o que tipicamente induz secas no nordeste do Brasil e fortes chuvas com inundações no sul (NEELIN; LATIF, 1998; PRESTES et al., 2011).

Variações paleoclimáticas envolvem um amplo intervalo de escala de tempo, e suas causas associadas operam em diferentes frequências. A compreensão de eventos climáticos do passado auxiliando o entendimento a respeito da evolução desses eventos no presente, e também, no futuro. Os registros instrumentais de mudanças do clima e de fenômenos geofísicos são insuficientes para observar e estudar como o sistema terrestre opera em escalas de tempo muito maiores do que décadas, ou sob forçantes diferentes do presente. Na maioria das regiões do globo, não há registros instrumentais antes do século XIX.

Muitos trabalhos paleoclimáticos estão focados em estudar variações de séculos a milênios, como por exemplo, os ciclos de erosão, de mudança vegetacional, e da história da humanidade, os quais têm sido reconstruídos e correlacionados com ciclos da atividade vulcânica, das variações de gases atmosféricos e da atividade solar. Informações paleoclimáticas, enfatizando variações de escalas de tempo de estações sazonais (3 - 4 meses) a séculos, podem ser obtidas em registros de testemunhos de gelo, de sedimentos de varves, de corais, e de anéis de crescimento de árvores. As variações com frequências maiores, também têm sido amplamente identificadas, tais como, os eventos ENOS, as variações solares anuais, o véu de poeira vulcânica, a oscilação bienal da atmosfera e a variabilidade

climática aleatória (FRITTS, 1991).

Informações obtidas diretamente do Sol e do clima terrestre por meio de medidas instrumentais estão disponíveis para um período relativamente curto de tempo. Sendo difícil muitas vezes discernir entre variabilidade e mudança climática, ou entre fatores do passado que tenham se mantidos e assim influenciado o sistema terrestre. Observações diretas do Sol; o monitoramento de sua atividade por meio de índices, como por exemplo, o número de manchas solares; e as medidas de parâmetros de fenômenos ambientes (temperaturas do ar e do oceano, pluviometria, níveis de rios, etc.) são os meios mais utilizados para se conhecer as variações desses fenômenos e servem de base para analisar suas correlações, bem como realizar previsões. Um monitoramento indireto das variações solares e de outros fenômenos geofísicos, numa escala de tempo maior no passado, é possível devido à existência de registros naturais, que são capazes de gravar e reter informações do passado, melhorando a compreensão de seus efeitos sobre o clima do planeta e uma possível previsão do mesmo para o futuro, o que contribui para validar modelos existentes (PRESTES, 2009).

Vários estudos sugerem que conexões entre as variações solares e os anéis de crescimento podem existir (por ex., MURPHY 1990; RIGOZO et. al., 2008; PRESTES et al., 2011; PRESTES et al., 2013; PRESTES et al., 2018). Dentre estes estudos, pode-se citar primeiramente, que os anéis de crescimento de árvores têm sido usados para reconstruir o clima local (FLOWER; SMITH, 2010; LORENSI; PRESTES, 2016). A evidência da influência solar no clima também tem sido encontrada em escala de tempo de séculos bem como em escala mais curta, de 11 anos, por exemplo. Além disto, foram observadas evidências de variações correspondentes aos ciclos solares em anéis de árvores (NORDEMANN; RIGOZO; FARIA, 2005; RIGOZO et al., 2008; PRESTES et al., 2011; PRESTES et al., 2013; PERONE et al., 2016).

1.1 Motivação

O Sol é o principal forçante que controla o sistema climatológico do planeta Terra. Entretanto, uma questão continua em aberto: se as variações nas emissões solares, são ou não capazes de influenciar o clima terrestre e quanto. Sabe-se que a radiação solar e as partículas de altas energias colidem continuamente com os constituintes neutros da atmosfera terrestre. Entretanto, o estudo das variações solares é baseado em observações, o que torna este estudo relativamente recente. Comparado com as séries dendrocronológicas que podem ter de centenas a milhares de anos, as observações solares possuem um período de tempo bem mais curto, o que restringe muito a compreensão de seus efeitos sobre o clima do planeta, e uma possível previsão do mesmo para o futuro. Assim, torna-se necessário um monitoramento indireto dessas variações solares, bem como outros fenômenos geofísicos que possam ter acontecido numa escala de tempo maior no passado. A existência de

registros naturais como mencionado acima sobre extensos períodos de anos, e estas variações solares e de outros parâmetros geofísicos podem ser mensuráveis indiretamente por meio de medidas de anéis de crescimento de árvores (RIGOZO; NORDEMANN, 1998).

Para detectar uma influência solar no clima, primeiramente, deve-se construir índices meteorológicos e solares de longos períodos confiáveis e consistentes; e segundo, deve-se separar a influência solar de outras influências que estão presentes em um sistema não-linear como o clima terrestre. Mesmo os mecanismos físicos nos quais o Sol atua diretamente precisam ser explicados, considerando ainda as realimentações dinâmicas e físicas do sistema. Entre estes efeitos, pode-se citar o acoplamento dos processos na baixa atmosfera, na circulação do oceano ou na média atmosfera. O fenômeno El-Niño é o principal modo de variabilidade natural nos trópicos, tendo a oscilação do Atlântico Norte uma variabilidade menos expressiva. Salienta-se que esse trabalho se justifica pelo fato das cronologias de anéis de crescimento de árvores representarem um registro natural, que são úteis no estudo de possíveis conexões entre variáveis solares/geofísicas/climáticas, e consequentemente estas variações dendrocronológicas podem ser usadas para inferir a evolução de variáveis solares/geofísicas/climáticas durante períodos passados sem registros antropogênicos.

O clima da região Sul/Sudeste sofre influência do oceano Atlântico devido sua proximidade, principalmente por meio do sistema Anticiclone do Atlântico Sul, também denominado de Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Sua influência no clima ocorre em função do deslocamento para oeste da posição climatológica, sendo observadas temperaturas mais elevadas na região Sul e na parte sul da região Sudeste do Brasil (DEGOLA, 2013).

No Atlântico, tem-se também a mudança no fluxo de umidade devido à alteração do local da zona de confluência entre as correntes quentes do Brasil, em direção ao pólo Sul, e fria das Malvinas, em direção ao Equador, esse deslocamento altera o padrão termodinâmico local influenciando o transporte vertical de umidade para a atmosfera (CAMARGO et al., 2013). A atuação do Oceano Pacífico na região Sul do Brasil, ocorre por meio dos eventos El Niño e La Niña, que mudam a posição da circulação de Walker, definida como os ramos zonais de ar orientados de leste para oeste relacionados à variação da pressão atmosférica entre as porções leste e oeste do oceano Pacífico, acarretando uma circulação celular na região equatorial, que pode ser alterada pelas anomalias de tsm no oceano Pacífico provocando chuvas intensas, veranicos, geadas, tornados e estiagens, podendo gerar secas severas (OLIVEIRA, 2001).

Portanto, esta Tese utiliza registros naturais e registros observacionais solares e de outros parâmetros geofísicos para tentar compreender melhor suas variabilidades/mudanças e suas interações sobre os séculos passados, visando o potencial de previsão destas variáveis no futuro.

1.2 Importância da pesquisa

A compreensão sobre o comportamento da atividade solar em escalas de tempo de centenas/milhares de anos e seus efeitos sobre o sistema climático, é de grande importância, pois permite estimar os efeitos antropogênicos sobre o clima terrestre. Além disso, o conhecimento do clima num passado longínquo traz informações sobre as variabilidades naturais do clima da Terra.

O Brasil tem sido afetado por fortes eventos climáticos, como por exemplo o El Niño, que provocou intensas secas e enchentes principalmente na região Sul do Brasil. Portanto, estudos como este proposto aqui podem trazer resultados a fim de minimizar os problemas socioeconômicos causados por estes fenômenos ambientais.

A melhor compreensão das variações climáticas e suas influências (pluviometria; circulação atmosférica, El-Niño, La-Niña, etc.) pode responder questões ainda hoje não esclarecidas. Além da importância científica, esta Tese tem carácter multidisciplinar, visto que necessita da criação de programas computacionais para o processamento de sinais geofísicos, bem como a análise matemática avançada, por meio dos métodos de análise espectral harmônica, e Wavelet, para o estudo de fenômenos climatológicos descritos por séries temporais de temperatura e precipitação, séries temporais de fluxo de radiação solar e índices geomagnéticos, e séries temporais de crescimento de anéis de árvores.

1.3 Problema físico

A interação Sol-Terra e os efeitos geofísicos e climáticos recorrentes da variabilidade solar representam, atualmente, um dos mais importantes problemas do Clima Espacial. As observações diretas do Sol, o monitoramento de sua atividade por meio de índices como o número de manchas solares, as medidas de parâmetros de fenômenos ambientes (temperaturas do ar e do oceano, pluviometria, níveis de rios, etc.) são os meios mais utilizados para se obter conhecimento sobre as variações desses fenômenos, além de servirem como base para a análise de suas correlações.

O monitoramento indireto das variações solares e de outros fenômenos geofísicos, numa escala de tempo maior no passado, é possível através do estudo de registros naturais, que são capazes de gravar e reter informações de fenômenos os quais foram expostos, contribuindo para melhorar as previsões climáticas, ou mesmo para validar modelos.

As cronologias de anéis de crescimento de árvores representarem um registro natural, e são úteis para a compreensão das possíveis conexões entre variáveis solares/geofísicas/climáticas. Além disso, essas cronologias podem ser usadas para inferir a sua evolução durante períodos passados, para os quais não há observações instrumentais diretas. Desta forma propõem-se investigar registros de anéis de árvores de Imbuia da região Sul do Brasil (Paraná), e as séries geofísicas e climáticas disponíveis em bases

públicas de dados.

1.4 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é analisar as relações entre o crescimento da imbuia e os forçantes climatológicos que atuam na Região Sudeste do estado do Paraná, especificamente no município de General Carneiro. Em particular, esta região de interesse é uma região suscetível a eventos climáticos, tendo destaque para as conexões com os oceanos Pacífico Equatorial e Atlântico Sul (SILVA, 2001). Esta Tese procura confirmar o caráter não linear da atividade solar e sua correlação (se houver) com a variabilidade das condições climáticas no município de General Carneiro. Para isso, focará no estudo de periodicidades relacionadas a variações solares, tais como, as periodicidades de 11, 22, 54, 80 e 200 anos pela análise de wavelet. O estudo dessas periodicidades terá como objetivo de contribuir para uma melhor compreensão dos efeitos da atividade solar e fenômenos geofísicos no clima do sul do Brasil.

1.5 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho podem ser enumerados como:

1. Verificação dos períodos presentes na série dendrocronológica, e identificação da contribuição da variância desses sinais na série dendrocronológica.
2. Resposta do crescimento da imbuia a variabilidade solar.
3. Relação do crescimento dos anéis de árvores com o clima local, tendo como base o estudo da precipitação e da temperatura.
4. Descrição da relação entre eventos geofísicos e climatológicos que atuam na Região Sudeste do Paraná por meio da análise de suas séries temporais.
5. Relação das anomalias da temperatura da superfície do mar dos Oceanos Atlântico e Pacífico com as séries dendrocronológicas de General Carneiro.

1.6 Estrutura da Tese

A partir das motivações mencionadas acima para o estudo e do uso de uma abordagem inovadora com metodologias integradas para prover um melhor entendimento das características das séries dendrocronológicas e das influências climatológicas e solares nas mesmas, esta Tese está assim organizada:

- Capítulo 2: será feita a revisão bibliográfica, especificando as características da região sul e sua análise climatológica. Também será especificada a descrição da vegetação, a localização geográfica e a classificação climática da cidade de General Carneiro. Posteriormente, sendo abordados mais profundamente os mecanismos de interações climatológicas e geofísicas no clima da região de General Carneiro.
- Capítulo 3: neste capítulo, é feita uma descrição detalhada dos métodos de obtenção e descrição do índice para o estudo dendroclimatológico focando na contagem e mensuração dos anéis de crescimento. Além disso, é apresentada a descrição das ferramentas matemáticas para a análise espectral das séries dendrocronológicas e séries geofísicas. Para verificar as influências na série dendrocronológica obtida são utilizados dados climatológicos, representados por dados mensais e anuais de precipitação e temperatura do ar na região, o Índice do Oscilação Sul (IOS), e dados da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) dos Oceanos Atlântico Sul e Pacífico Equatorial; e dados geofísicos, representado pelo número de manchas solares.
- Capítulo 4: neste capítulo, são aplicadas diversas ferramentas (descritas no Capítulo 3) nas séries temporais em estudo, em busca da sua relação com a variabilidade climática local e a variabilidade solar.
- Capítulo 5: com base nas análises realizadas no Capítulo 4, neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas, como também algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 CLIMATOLOGIA DA REGIÃO SUL DO BRASIL

Na maioria das regiões do globo, não há registros instrumentais de variáveis climatológicas em uma escala de tempo suficiente que permita analisar as condições climáticas e os forçantes climáticos que atuam e atuaram em uma dada região. Assim, devido à escassez desses registros climáticos, um monitoramento indireto se faz necessário. Esse monitoramento pode ser feito por meio de registros naturais, como por exemplo, anéis de crescimento de árvores, que pela sua qualidade, permite a obtenção de uma excelente escala de tempo, podendo relacionar-se a espessura dos anéis aos fatores ou condições ambientais.

Para caracterização do clima é necessário conhecer o comportamento e as interações das grandezas físicas que o formam, tais como, a temperatura, a umidade relativa do ar, o regime de ventos, as correntes marítimas, dentre outros. Os fatores climáticos vão determinar o regime vigente para cada elemento que caracteriza o clima. Para fins de padronização, a Organização Meteorológica Mundial (OMM) define essas Normas como “valores médios calculados para um período relativamente longo e uniforme, compreendendo no mínimo três décadas consecutivas” e padrões climatológicos normais como “médias de dados climatológicos calculadas para períodos consecutivos de 30 anos (INMET).

O Paraná (PR) faz parte da região Sul do Brasil junto com os Estados do Rio Grande do Sul (RS), de Santa Catarina (SC). O clima da Região Sul, por estar quase que completamente abaixo do Trópico de Capricórnio e por ter grande parte de seu território em 300 m acima do nível do mar (ASL) diferindo bastante do clima das outras regiões do país. É a região que pode sofrer com fenômenos quase que desconhecidos do Brasil, como neve, chuva congelada e geadas de congelamento, também conhecida como geadas negras (HIERA; EDVARD, 2014).

Antes de definir a climatologia da região Sul do Brasil, é conveniente definir alguns conceitos desta área de concentração de estudo. Por exemplo, a palavra tempo em meteorologia traduz o estado atmosférico num determinado instante. Portanto, tempo constitui apenas uma fase na sucessão dos fenômenos meteorológicos (ARAÚJO, 1930). Por outro lado, a palavra clima refere-se ao comportamento médio do tempo sobre algum período médio apropriado (ARAÚJO, 1930; IPCC, 1995; SEINFELD; PANDIS, 1998). Escala de relevância para mudanças do clima são da ordem de décadas a séculos (HOYT; SCHATTEEN, 1997; SEINFELD; PANDIS, 1998).

As características climáticas da região Sul são de clima subtropical com chuvas bem distribuídas ao longo do ano. Em uma classificação mais específica, observam-se três tipos

de clima: Cfb (inverno frio com verão ameno, inverno e verão úmidos), Cfa (inverno frio com verão quente, inverno e verão úmidos) e Cwa (temperaturas moderadas com verão quente e chuvoso). Nestes três tipos climáticos, há uma queda no índice pluviométrico no inverno, principalmente em agosto, e um índice elevado no verão. A região Sul como um todo, está localizada fora dos trópicos e recebe, em média, menos luz que as regiões tropicais. No verão, a posição da Terra permite maior insolação da Região Sul, provocando uma evaporação elevada, e, devido à proximidade com o oceano Atlântico há um aumento da nebulosidade, e conseqüentemente, aumento de chuvas (DITTBERNER, 2001).

Além disso, em qualquer estação do ano, a região serve de passagem para frentes polares, fazendo com que a região esteja sujeita a bruscas mudanças de tempo. Devido a estas mudanças, a região é submetida a notáveis desvios pluviométricos anuais, tanto no verão quanto no inverno, mas que não chegam a influir com a mesma intensidade na variabilidade térmica (LEAL, 1999).

A precipitação apresenta períodos com maior ou menor intensidade, sendo, em geral, a primavera e o verão considerados chuvosos, e o outono e o inverno, secos. Contudo, existem variações regionais neste padrão: (i) no sul da região, o período mais chuvoso é o inverno, enquanto no norte, é o verão; (ii) nas regiões litorâneas, os períodos secos e chuvosos são menos acentuados do que nas regiões continentais, sendo o inverno mais chuvoso e o outono mais seco (RAO; HADA, 1990; STUDZINSKI, 1995).

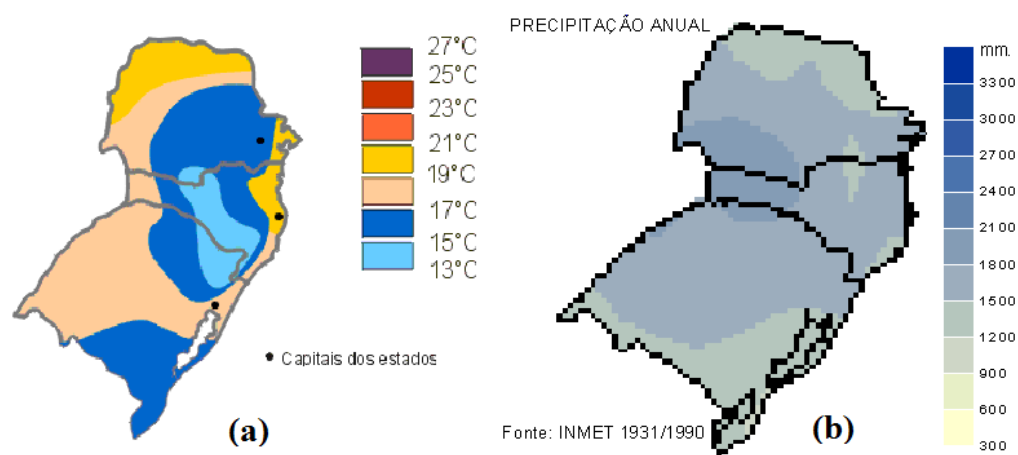
Nos meses de junho a agosto há, em média, 22 penetrações de sistemas frontais na faixa latitudinal de 25° a 35° S (OLIVEIRA, 1986). As frentes frias induzem a formação de linhas de instabilidade e outros fenômenos que acentuam a formação de precipitações convectivas e exercem efeitos à distância, inclusive sobre uma grande área do clima tropical. Essas mudanças nos elementos do tempo se manifestam com muito mais rapidez através das frentes do que no interior das massas de ar.

Na região Sul, a temperatura média do inverno é de 13 °C, variando de 9 a 17 °C e, no verão, a média é de 21 °C, variando de 18 a 25 °C. A menor temperatura registrada ocorreu no município de Caçador (SC), com -14 °C em 11 de junho de 1952, já a maior temperatura foi de 42,2 °C em Indaial (SC), em 08 de fevereiro de 2014 (ALVES et al., 2016).

Na Figura 1a, estão representadas as temperaturas médias anuais e, na Figura 1b, as médias anuais da precipitação, para toda a região Sul. A média da região do índice pluviométrico é de 1.400 mm/ano e a temperatura média anual é de aproximadamente de 18°C.

O cálculo da média de um parâmetro atmosférico requer a definição de período temporal e extensão espacial sobre o mesmo. Períodos de tempo baseados em forçantes solares são frequentemente utilizados. O período anual e o ciclo diurno (diário) encontram-

Figura 1 – Mapa da (a) média anual de temperatura, e (b) média anual da precipitação para a região sul do Brasil.



Fonte: INMET (2016).

se entre os exemplos mais comuns. Entre a escala de tempo anual e diária, estão as variações em escala sinóptica, que podem ser de aproximadamente uma semana, de um a vários meses, intra-sazonais, ou até mesmo de anos. Como exemplo de variações sinópticas de vários meses e anos, tem-se a Oscilação Quase-Bienal (OQB) e o ENOS. O OQB é uma reversão da direção dos ventos na estratosfera, alternando simétrica e regularmente os ventos zonais de leste e de oeste, com um ciclo aproximado de 26 meses (VERYARD; EBDON, 1961; REED, 1965; BHALME, et al., 1987; HOLTON; AUSTIN, 1991; HOTON, 1994).

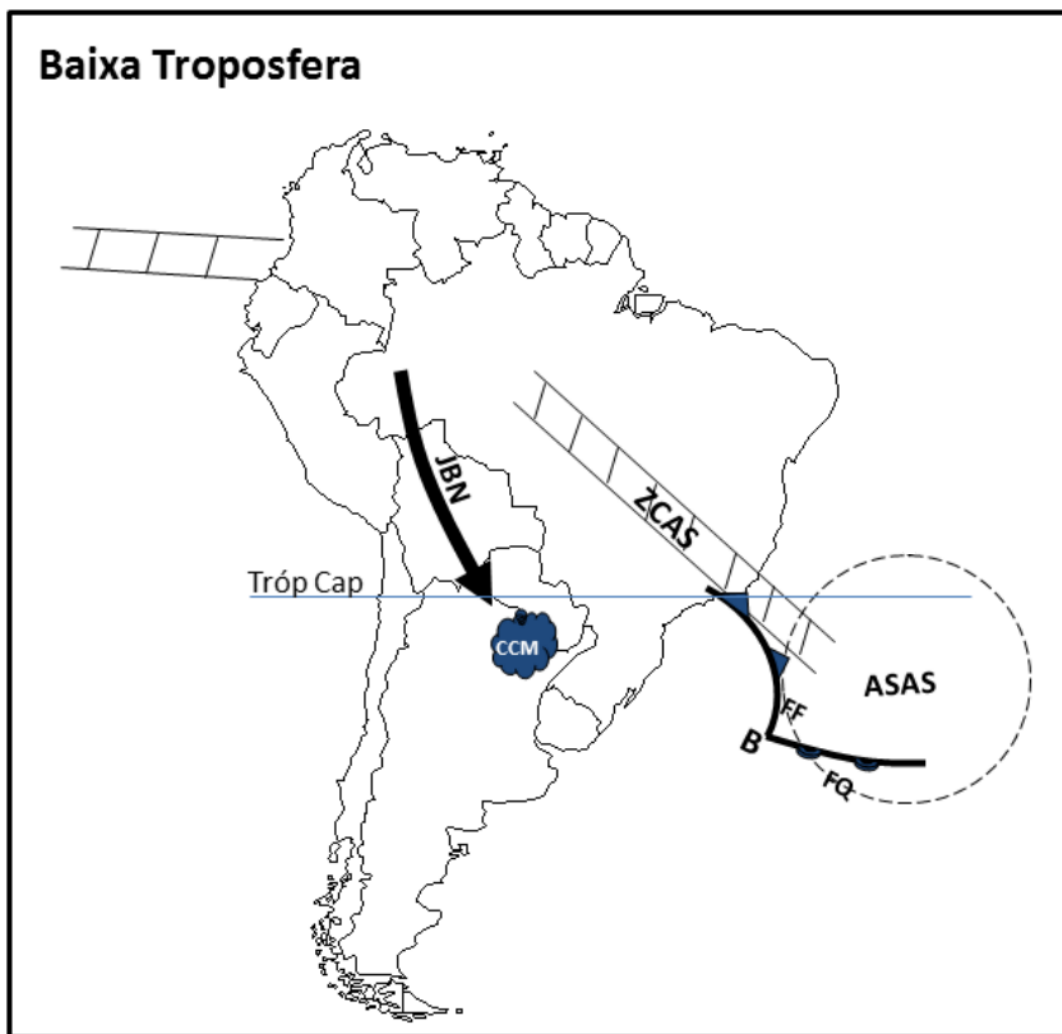
A relação entre os aspectos físicos da região, ou melhor, a ação isolada ou conjunta dos fatores físicos (latitude, altitude, insolação, pressão atmosférica, relevo, maritimidade, continentalidade, vegetação, massas de ar, etc.) sobre a atmosfera, determina o clima físico (ARAÚJO, 1930).

2.1 Sistemas Atmosféricos sobre a Região

Alguns fenômenos atmosféricos que atuam sobre a região sul são essenciais na determinação da climatologia de temperatura e de precipitação. Entre os mais importantes, pode-se citar a passagem de sistemas frontais sobre a região, que são responsáveis, junto com interação com as configurações orográficas da região, por grande parte dos totais pluviométricos registrados (OLIVEIRA, 1986). A trajetória desses sistemas está fortemente ligada ao posicionamento e à intensidade do jato subtropical da América do Sul, e este último exerce forte influência na precipitação (BROWING, 1985; KOUSKY; CAVALCANTI, 1984). Estudos climatológicos mostram que, em média, 5 a 7 frentes frias passam pela região a cada mês (OLIVEIRA, 1986).

Outros sistemas que contribuem para o aumento da precipitação são os vórtices ciclônicos e cavados em altos níveis, que cruzam os Andes, oriundos do Pacífico e se intensificam sobre o Sul e o Sudeste do Brasil (CAVALCANTI, 1985). Em uma escala menor, a convecção por mesoescala é responsável por precipitação intensa no Sul do Brasil (GUEDES, 1985). Comuns na primavera, estes sistemas convectivos desenvolvem-se nas primeiras horas do dia, geralmente sobre o Paraguai e alcançam o sul do Brasil com precipitação intensa, em um curto intervalo de tempo. Alguns dos sistemas atmosféricos que atuam na região Sul, e que contribuem para a climatologia da região, estão apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Sistemas Atmosféricos que atuam de forma direta e indireta na região Sul.



Fonte: Modificada de Reboita et al. (2012).

Segundo Reboita et al. (2012), os sistemas que atuam de forma direta na região sul proporcionam uma precipitação elevada ao longo dos anos, destacando-se os sistemas frontais, os ciclones, os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) linhas de instabilidade, sistemas convectivos alongados persistentes, os sistemas de Brisa, os jatos de baixos

níveis (JBN) definidos como sistemas de ventos com velocidades superiores a 10 m/s com altitude entre um a dois quilômetros com uma extensão horizontal aproximadamente de 500 km.

Andrade (2005) cita que um dos sistemas sinóticos mais importantes sobre a América do Sul é o sistema frontal sendo ativo durante o ano todo, atuando também de forma indireta. Em um estudo de caso para o verão de 1999 - 2000, observou-se que o avanço da frente fria pelo litoral foi um dos fatores responsáveis pela formação de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) definida como uma persistente banda de nebulosidade e precipitação com orientação noroeste-sudeste, estendendo-se do Atlântico Sul até o leste da Amazônia.

O Atlântico Sul age de forma indireta no clima da região, pois o sistema de Anticiclone do Atlântico Sul (ASAS) origina a massa tropical marítima e o anticiclone polar origina a massa polar, sendo o deslocamento dessa massa e sua relação com o aquecimento do Atlântico o principal responsável pela abundante precipitação na primavera e no verão (NIMER, 1989).

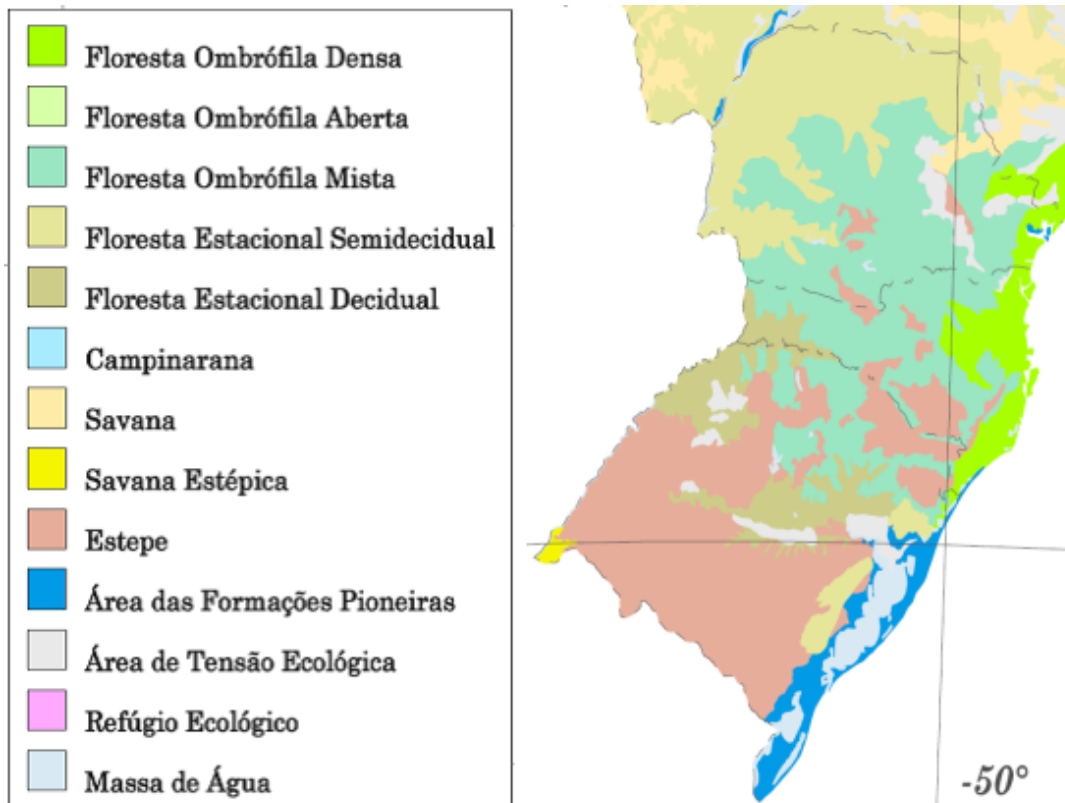
2.2 A Vegetação e as Características Climatológicas

No Sul do Brasil, um dos ecossistemas mais característicos do bioma Mata Atlântica corresponde à Floresta Ombrófila Mista - FOM (IBGE, 2014). Sua distribuição espacial é apresentada na Figura 3.

A FOM é caracterizada por uma mistura florística que comporta gêneros Australásicos (*Drymis*, *Araucaria*) e Afro-Asiáticos (*Podocarpus*), com fisionomia fortemente marcada pela predominância da *Araucaria angustifolia* (pinheiro) no estrato superior. Sua área de ocorrência coincide com o clima úmido sem período seco, e com temperaturas médias anuais em torno de 18 °C. Entretanto, durante três a seis meses, as temperaturas se mantêm abaixo dos 15 °C. Seus ambientes predominam no Planalto Meridional Brasileiro, em terrenos acima de 500 - 600 metros (ASL), apresentando disjunções em pontos mais elevados das serras do Mar e da Mantiqueira (BERREDO, 2015).

A principal espécie associada a FOM é a *Araucaria angustifolia*. Contudo, neste tipo de formação florestal se integram diversas espécies características, tais como: *Ocotea porosa* (imbuia), *Ilex paraguariensis* A. St. Hil. (erva-mate), *Ocotea odorifera* (canela-sassafrás), *Cedrela fissilis* Vell. (cedro-rosa), *Campomanesia xanthocarpa* Mart. ex O. Berg (gabirola), *Podocarpus lambertii* Klotzsch ex Endl. (pinheiro-bravo), entre outras (MAACK, 2002).

Figura 3 – Mapa da vegetação da Região Sul do Brasil



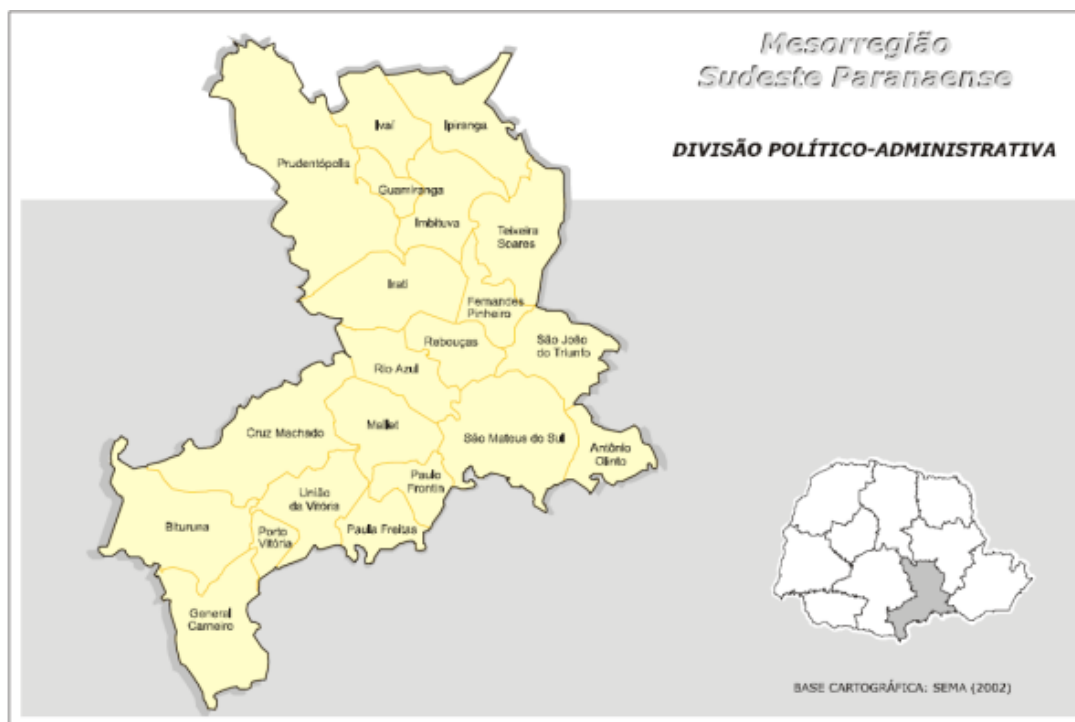
Fonte: Adaptada, IBGE (2014).

2.3 Localização e Classificação climática de General Carneiro

A mesorregião Sudeste Paranaense localiza-se no segundo planalto Paranaense, também conhecido como planalto Ponta Grossa, o que corresponde a 8,51 % do território estadual, e sua área de abrangência pode ser vista na Figura 4. A região possui basicamente dois tipos de solos, o argissolo, o que possui mais areia na parte superficial e argila na parte mais profunda, e é susceptível à erosão principalmente em relevos de maior declividade; e o nitossolo com mais argila na parte superficial, (350 g/kg ou mais de argila) o que implica em boa fertilidade (LIMA; LIMA; MELO, 2012).

O município de General Carneiro, onde foi realizada a coleta das amostras, está localizado nas seguintes coordenadas geográficas: Latitude (S) 26°43' e Longitude (W) 51°23'. Este município se encontra a uma altitude média de 1100 metros, estando também no limite entre as zonas tropical e temperada, com classificação climática, segundo Köppen-Geiger, do tipo “Cfb”, que significa clima temperado quente, com verão ameno e chuvas bem distribuídas ao longo do ano. A temperatura média do mês de verão mais quente não atinge valores superiores a 22°C, e a temperatura média do mês mais frio, não atinge valores inferiores a 3°C (VIANELLO, 1991). A classificação climática para o estado do Paraná, destacando-se o município de General Carneiro, é apresentada na Figura 5.

Figura 4 – Localização da Mesorregião Sudeste do Estado Paraná, onde se localiza General Carneiro.



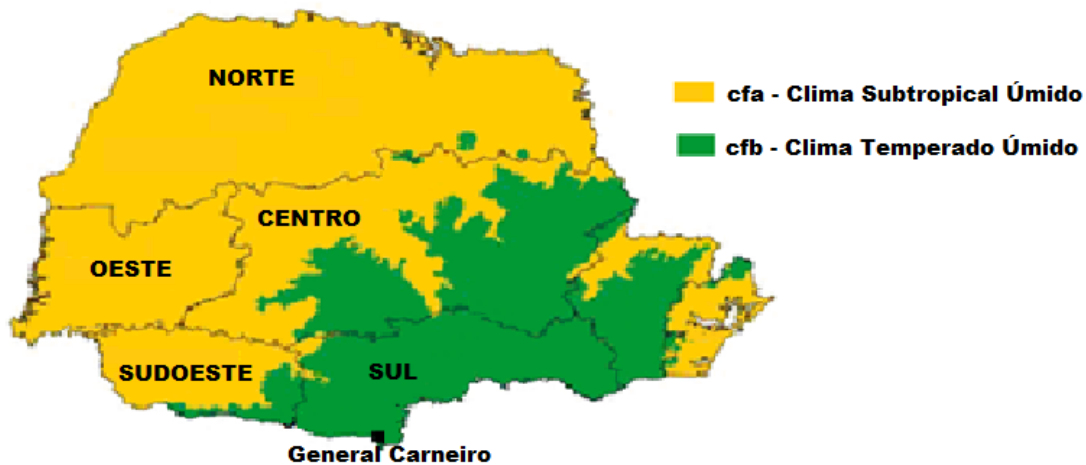
Fonte: Adaptada, SEMA (2010).

Na Figura 6 é apresentada a série temporal anual da precipitação para a região de General Carneiro durante o período de 1900 - 2010, obtida de reanálise, tendo resolução espacial de $0,5^\circ$ Latitude X $0,5^\circ$ Longitude. Observa-se que as maiores amplitudes da precipitação na região ocorreram na última década, enquanto que o menor volume ocorreu em 1916. Pode-se observar também uma tendência de maior precipitação a partir da década de 1960.

O regime da precipitação na região possui valores distintos em relação às estações, como pode-se observar na Figura 7 para os totais anuais de precipitação para períodos de outono-inverno (linha azul), e períodos de primavera-verão (linha magenta). Sendo as estações de primavera-verão mais chuvosas, como pode-se observar na Figura 8, que apresenta os totais mensais médios da precipitação.

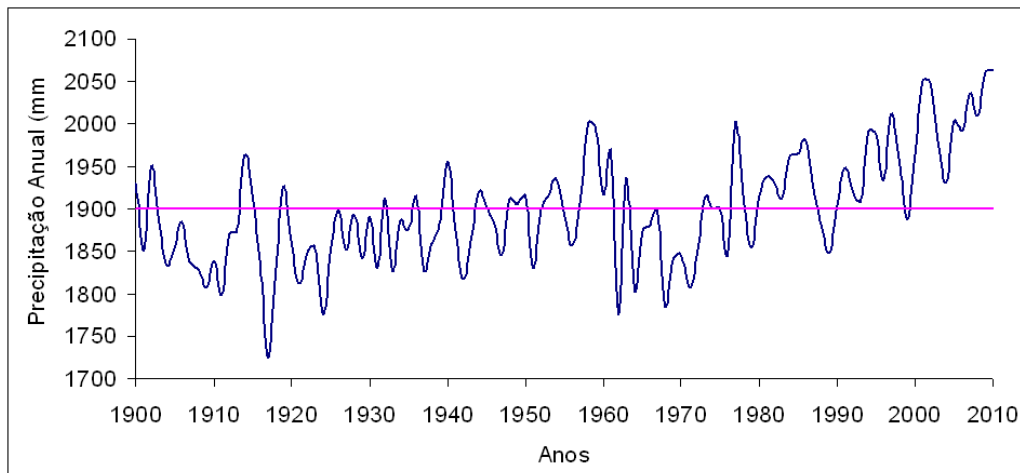
O comportamento térmico apresenta um papel importante na caracterização do clima de uma região, principalmente em latitudes médias, onde tem-se as estações do ano com temperaturas bem definidas. No inverno, apresenta valores médios de 10°C devido a maior penetração de massas frias, e no verão apresenta temperaturas médias de 24°C , com exceção de áreas elevadas onde tem-se valores mais amenos (TALJAARD, 1972). A Figura 9 apresenta séries com as médias anuais de temperatura para a região de General Carneiro para o período de 1948 a 2010, obtida de reanálise, tendo resolução espacial de

Figura 5 – Classificações Climatológicas das regiões do estado Paraná destacando-se o município de General Carneiro.



Fonte: Adaptada de IAPAR (2016).

Figura 6 – Série temporal com totais anuais de precipitação (linha azul) e a média climatológica (linha magenta) na região de General Carneiro, de 1900 a 2010.

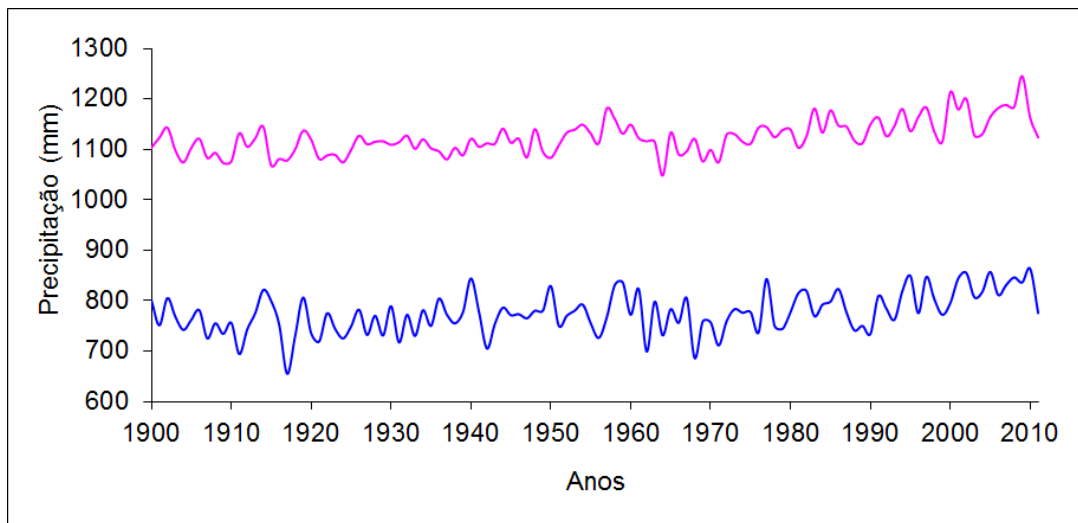


Fonte: Autor, 2018.

0,5° Latitude X 0,5° Longitude. O ano de 1971 apresentou a menor média anual de 16,5 °C, enquanto o ano de 1984 foi o de maior média anual, com 19,1 °C. Também, observa-se uma alta variabilidade térmica anual e uma tendência de aumento da temperatura média anual a partir de 1976. Os períodos de 1961 a 1990 a média ficou em 17,7 °C, enquanto que entre 1991 a 2010, a média foi de 18,3 °C.

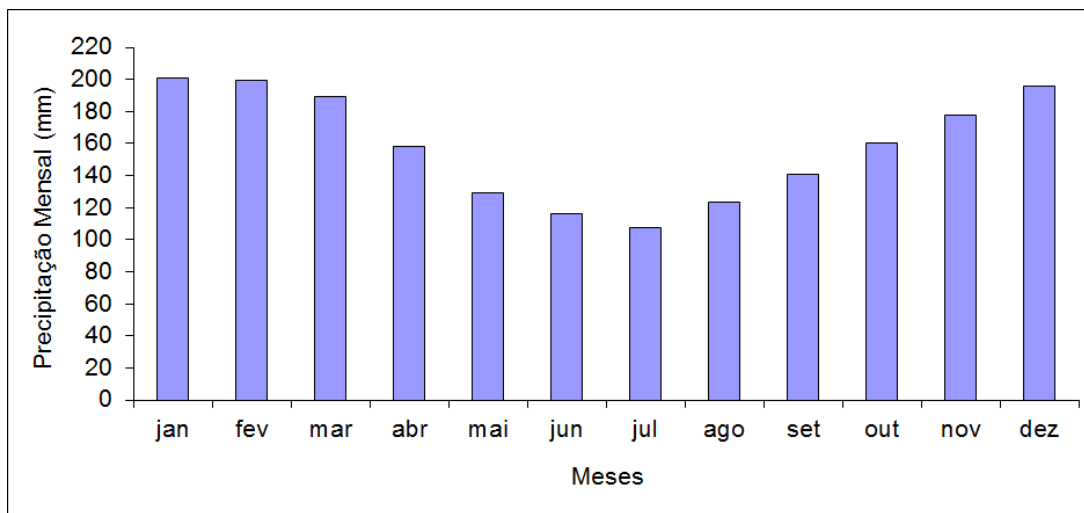
A Região Sul do Brasil apresenta as maiores amplitudes térmicas do país, o que é coerente pois esta apresenta a maior diferença entre radiação solar recebida no verão e no inverno devido estar localizada em latitudes mais altas. O comportamento térmico

Figura 7 – Série temporal com os totais no período Outono-Inverno (linha azul) e Primavera-Verão (linha magenta) na região de General Carneiro, de 1900 a 2010.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 8 – Distribuição climatológica mensal da precipitação de General Carneiro, no período de 1900 - 2010.

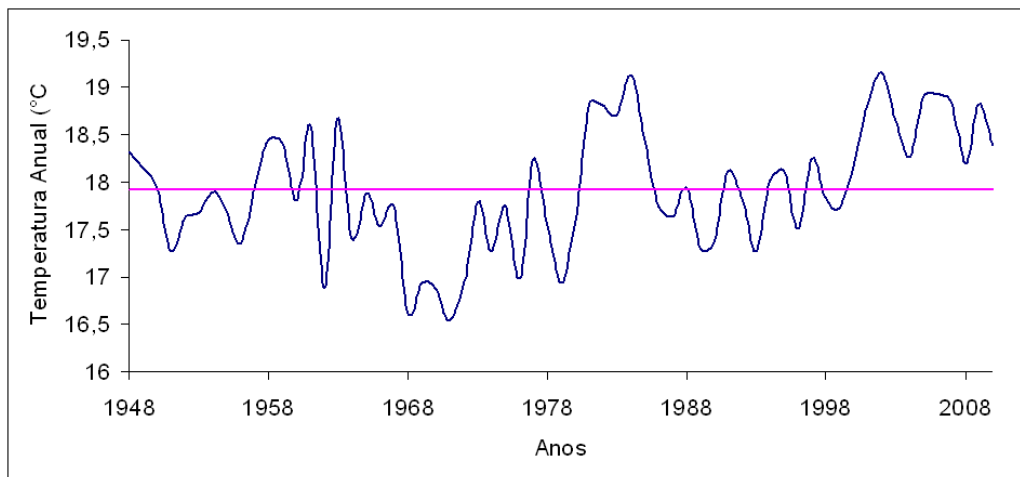


Fonte: Autor, 2018.

da região de estudo desta Tese possui duas estações com comportamentos semelhantes (primavera-verão) e (outono-inverno). A Figura 10 apresenta o comportamento térmico dessas estações no período de 1948 a 2010. Nesta figura, a curva na cor magenta representa o período de outono-inverno, e a curva azul, primavera - verão.

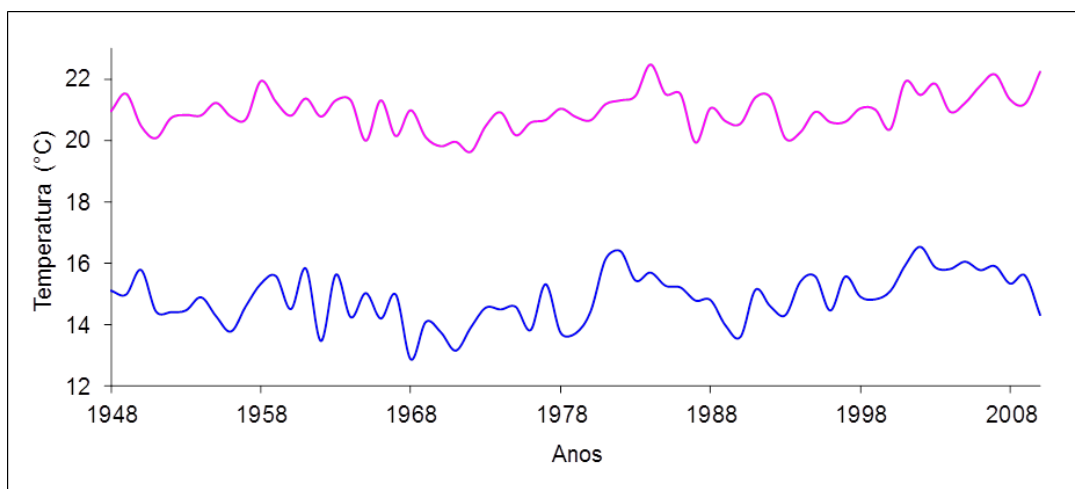
A distribuição térmica, Figura 11, para a região mostra as estações mais frias nos meses entre abril e setembro (outono-inverno), e as quentes, entre outubro e março (primavera-verão). A média para as estações frias foi de 13,7°C, enquanto que, para as estações quentes foi de 19,2°C.

Figura 9 – Série das temperaturas médias anuais de General Carneiro, no período de 1948 - 2010.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 10 – Série temporal das médias anuais da temperatura para os períodos de Outono-Inverno (linha magenta) e Primavera-Verão (linha azul) na Região de General Carneiro, de 1948 a 2010.

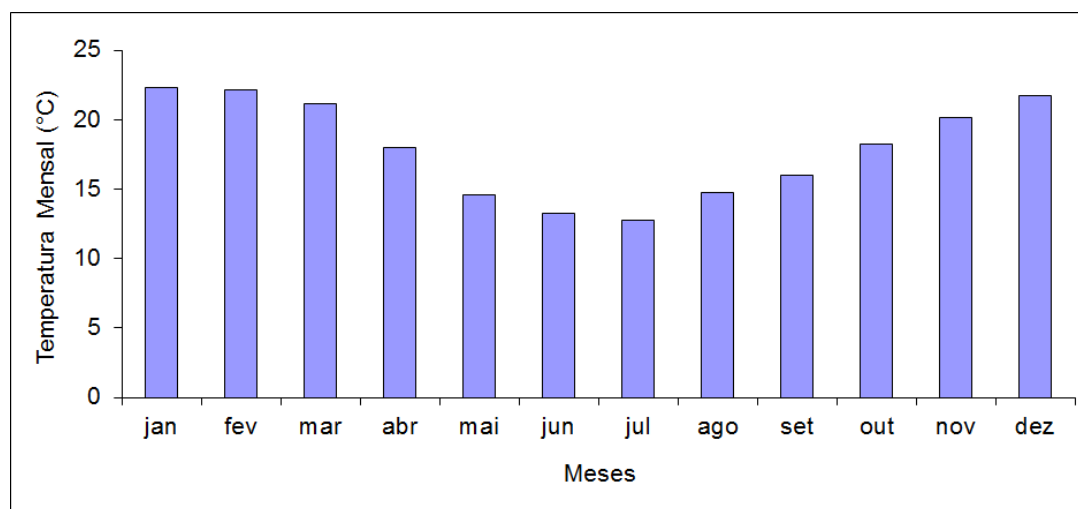


Fonte: Autor, 2018.

2.4 Interações Climatológicas e Geofísicas no Clima da Região

As variáveis do clima, que são comumente usadas, estão relacionadas principalmente com a atmosfera, contudo, considerando o sistema do clima não se pode considerar somente a atmosfera como único forçante climático. Processos na atmosfera estão fortemente acoplados à superfície dos continentes, aos oceanos e àquelas regiões da Terra, que estão cobertas por gelo (a criosfera). Existe também forte acoplamento com a biosfera (a vegetação e outros sistemas vivos na Terra e nos oceanos).

Figura 11 – Distribuição das temperaturas médias mensais de General Carneiro, para o período de 1948 - 2010.



Fonte: Autor, 2018.

A atmosfera, a hidrosfera, a biosfera, a litosfera e a criosfera são os cinco componentes que juntos formam o sistema climático (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) (IPCC, 1995; AYOADE, 1998). A Figura 12 apresenta uma ilustração esquemática das cinco componentes e suas interações no sistema climático. Nela, são apresentados os forçantes externos, que podem influenciar o sistema climático, particularmente a intensidade de energia liberada pelo Sol, as componentes do sistema climático e suas interações (interações internas), e as variações do clima (respostas internas).

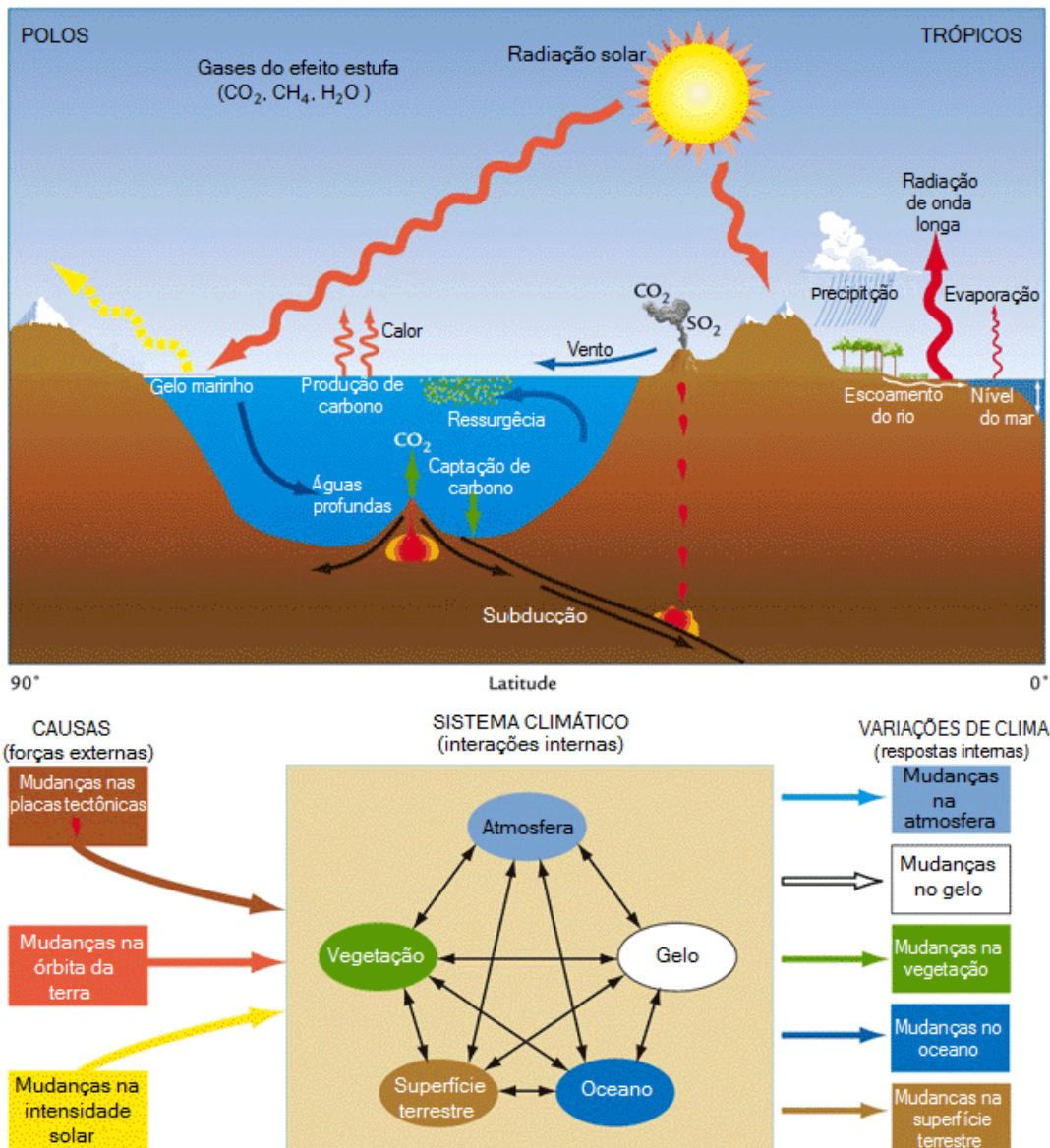
A variabilidade do clima é definida pelo IPCC como a diferença entre o clima normal de uma região e condições climáticas diferentes, mas recorrentes nessa mesma região. Essas variações são chamadas também de anomalias do clima. Na América Latina, estas anomalias estão principalmente associadas ao fenômeno ENOS.

2.5 Interação Oceano-Atmosfera e sua Influência na Região Sul

Os oceanos recebem a maior parte da energia oriunda do Sol, são excelentes absorvedores de radiação solar, possuindo um baixo albedo, tendo um papel de destaque no equilíbrio térmico da atmosfera. Os oceanos e os continentes absorvem 51% do total da radiação solar incidente. A energia absorvida nos primeiros 100 m de profundidade é a principal responsável pelo processo de evaporação. Isso torna os oceanos a fonte primária de vapor de água e de calor para a atmosfera, o que é importante para o ciclo hidrológico global (PHLILANDER, 1989).

Devido à grande inércia térmica da água do mar, o oceano tende a responder lentamente às mudanças no forçante térmico. A média anual do fluxo de calor ar - mar varia

Figura 12 – Ilustração esquemática das componentes e interações do sistema climático.



Fonte: Adaptada de Ruddiman (2001).

fortemente de lugar para lugar devido à convergência ou à divergência do transporte de calor por correntes oceânicas. Por sua vez, a atmosfera, responde rapidamente em escalas de tempo de algumas semanas e meses, como consequência, as mudanças no clima, com prazos de anos a séculos, são amplamente controlados pelas correntes oceânicas (KAROLY, 2015).

Dos vários fenômenos meteorológicos que afetam a Região Sul, as estiagens e as enchentes são os fenômenos climáticos mais dramáticos. Durante o período de 1982 - 1983, o sistema climático global exibiu possivelmente a maior variedade de extremos quando comparados a qualquer outro período similar no século XX. Os desastres climáticos de

tal período são exemplos das consequências do fenômeno de extensão global e magnitude histórica: o ENOS. As chuvas intensas, ocasionadas pelo fenômeno ENOS de 1982 - 1983, causaram enchentes em 270 municípios do Paraná, 199 em Santa Catarina e 191 no Rio Grande do Sul (GASQUEZ; MAGALHÃES, 1987).

Ropelewski e Halpert (1987) analisaram as relações significativas do fenômeno ENOS na precipitação de várias regiões do globo, e, apesar de contarem com poucos dados observados no Sul do Brasil, seus resultados sugeriram que em anos de El Niño ocorre um excesso de precipitação, em relação à normal climatológica, a partir do mês de novembro do ano de surgimento do fenômeno, estendendo-se até o mês de fevereiro do ano seguinte ao seu surgimento. Em estudo similar ao anterior, Ropelewski e Halpert (1989) analisaram os impactos globais na precipitação nas fases frias do ENOS (La Niña). Os resultados desse trabalho mostram que esses anos tenderam apresentar uma queda na quantidade de precipitação inferior à normal climatológica no período que se estende de junho a dezembro do ano em que a fase fria ocorreu. Rao e Hada (1990), Aceituno (1988), Studzinski (1995) e Diaz et al. (1998) mostraram que em anos de ENOS, durante sua fase quente, ocorre geralmente um excesso de precipitação no sul do Brasil, norte da Argentina e Uruguai; e na fase fria do ENOS (La Niña), ocorre um déficit de precipitação.

Grimm et al. (1998) realizaram estudos similares àqueles de Ropelewski e Halpert (1987; 1989), porém usando um conjunto mais amplo de dados de precipitação (250 estações) sobre a região Sul do Brasil. Esse estudo reforçou a evidência da relação do excesso de precipitação nesta região com o fenômeno El Niño. Em várias localidades do Sul do Brasil, os efeitos devido ao fenômeno El Niño começam a ser notados em várias sub-regiões a partir da primavera do ano do fenômeno, e que em geral, o Sul do Brasil apresenta um forte e consistente padrão de anomalias de precipitação associados aos extremos de ENOS, mais forte do que na Argentina e no Uruguai (PEZZI; UBARANA; REPELLI, 2000).

Embora seja evidente a relação do ENOS com a precipitação na região Sul, uma parcela significativa dos picos de anomalias não está aparentemente relacionada com o fenômeno (STUDZINSKI, 1995). Outros fatores que influenciam as variações sazonais e interanuais para esta anomalia são as variações nas condições de contorno da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) em todos os oceanos, não somente o Pacífico, o gelo, a cobertura de neve e a umidade. Então, em uma escala regional, os continentes em torno dos oceanos Atlântico e Índico estão sob influência de outros forçantes climáticos, a despeito ou em adição de um ENOS (MOURA, 1994).

Studzinski (1995) analisou a relação dos oceanos Pacífico e Atlântico com a variabilidade da precipitação na região Sul, com base nas ATSM, e encontrou que ambos os oceanos têm influência na precipitação no sul do Brasil.

Segundo Nimer (1989), o sistema de circulação atmosférica na região Sul é influenciado pelos principais centros de ação, tais como a Alta Subtropical do Atlântico Sul

(ASAS), as pequenas altas tropicais, o anticiclone polar, e por fim, a Baixa do Chaco. Também se destacam os centros de ação de menor importância, como a baixa do Mar de Weddel, a alta dos Açores e o anticiclone do Pacífico Sul, exercendo influência indireta sobre a região Sul.

Rao e Hada (1990) analisando 21 anos de dados de precipitação associados ao IOS, encontraram para a região Sul precipitações acima da média em períodos de El Niño e abaixo da média em períodos de La Niña, destacando as estações de outono e primavera.

A associação do Oceano Atlântico com o regime de precipitação da região Sul é discutida por vários autores, tais como Studzinski (1995); Grimm et al. (1998); Grimm e Feuser (1998); Silva (2001); Kayano e Cipriano (2014), tendo estes, obtidos resultados em comum para o incremento da precipitação nos períodos de aquecimento da TSM do Pacífico com o aquecimento da TSM do Atlântico Sul-Sudoeste.

Coelho et al. (2015), estudando a seca de 2014 na região Sudeste do Brasil, encontraram uma forte associação negativa entre a precipitação e a TSM do ATLS com a região, especificando as alterações do ramo de subsidiência da célula de Walker. Anomalias negativas no desenvolvimento vertical geram um deficit de precipitação entre 5° S e 25° S, anomalias negativas proporcionam condições favoráveis para convecção nas regiões entre 28° S e 40° S. Essas anomalias de velocidade vertical caracterizam uma célula de circulação Hadley regional, ligando a circulação da região sudeste do Brasil aqui investigada com o sul do Brasil e o vizinho Oceano Atlântico.

2.6 Oceano Atlântico Sul

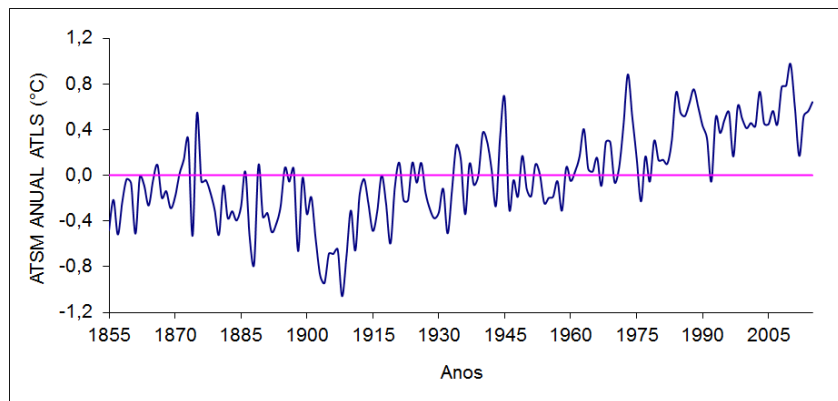
A proximidade do Atlântico com a região Sul traz influências no clima da região pela emissão de umidade, que, por meio da ação de brisa, podem provocar chuvas sobre o continente (REBOITA, et al., 2012).

Também, a ação do oceano Atlântico sobre o clima da região Sul, se dá por meio de um sistema de alta pressão semi-estacionário, cujo centro localiza-se no Atlântico Sul – Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Este sistema de alta pressão origina a Massa Tropical Atlântica (mTa), assim como o anticiclone polar origina a Massa Polar Atlântica (mPa), sendo o deslocamento dessas massas o principal responsável pela abundante precipitação na primavera e verão na Região Sul (NIMER, 1989).

Para a análise da influência do Oceano Atlântico Sul na região de estudo, são utilizadas as Anomalias das Temperaturas da Superfície do Mar (ATSM) do oceano Atlântico Sul para o período entre 1854 a 2015, apresentada na Figura 13.

No período entre 1901 a 1930 observa-se 90% dos anos tendo anomalias negativas de TSM, para o ciclo seguinte, de 1931 a 1960 esse valor passa para 63%. Nos ciclos seguintes ocorre um comportamento inverso, com 87% das ATSM positivas no período

Figura 13 – Série com ATSM do oceano Atlântico Sul e sua linha de tendência no período de 1854 - 2015.



Fonte: Autor, 2018.

de 1961 a 1990 e 95% no período de 1991 a 2010. Destacando-se o período entre 1900 e 1920 com 20 anos de anomalias negativas. Enquanto, o período entre 1979 e 2015 ocorreu apenas um ano com anomalia negativa alterando as relações oceano-atmosfera nas regiões próximas. Anomalias da temperatura da superfície do mar e da quantidade de calor armazenado na camada de mistura podem resultar em impactos diretos na região costeira e em alterações consideráveis na circulação atmosférica e no ciclo hidrológico na região continental adjacente (GRIMM, et al., 2000)

2.7 Oceano Pacífico Equatorial

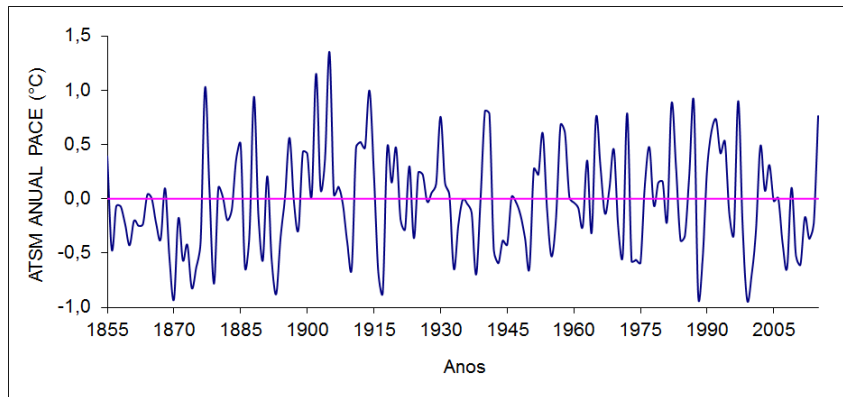
O aquecimento diferencial do Pacífico gera anomalias de precipitação e temperatura do ar em diversas partes do globo. Sua maior influência ocorre em locais que possuem maior proximidade das áreas ascendentes e descendentes da célula de Walker. A ATSM do Pacífico Equatorial considerada neste trabalho corresponde à região do El Niño 3.4, Figura 14.

Diferente da ATSM do Atlântico Sul, a do Pacífico Equatorial não possui uma tendência de resfriamento para a primeira metade do século XX, nem um aquecimento na segunda metade do século XX.

2.8 El Niño - Oscilação Sul (ENOS)

O fenômeno ENOS é uma associação de eventos de El Niño (componente oceânica associada às variações de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) nas águas do Leste do Oceano Pacífico Equatorial) e a Oscilação Sul (componente atmosférica associada às grandes variações no sentido Leste-Oeste da massa da atmosfera tropical, entre os oceanos Pacífico Oeste e Índico e o Pacífico Leste). Este fenômeno altera a atividade climática de

Figura 14 – Série da ATSM do oceano Pacífico Equatorial para a região do El Niño 3.4 no período de 1854 - 2015.



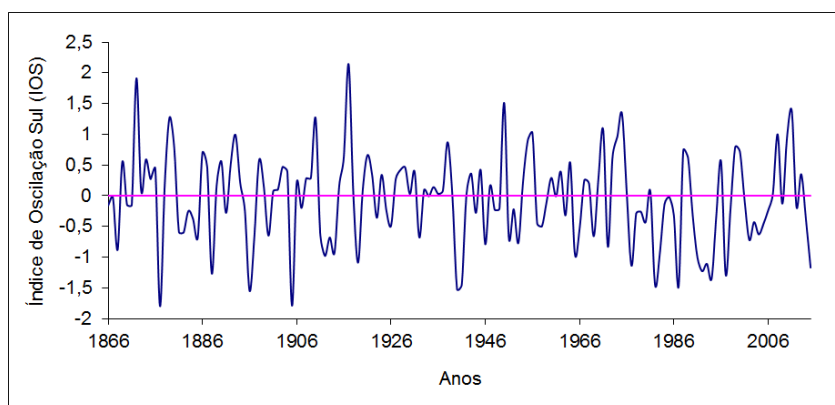
Fonte: Autor, 2018.

todo o globo, alterando principalmente as posições dos ramos ascendentes e descendentes da circulação de Walker, apresentando uma periodicidade, não bem definida, geralmente sendo entre 4 e 7 anos, podendo, em alguns casos ser entre 2 e 7 anos (OLIVEIRA, 2001).

2.9 Índice de Oscilação Sul (IOS)

O IOS é a componente atmosférica do El Niño, que influencia a atmosfera através da gangorra barométrica entre Taiti e Darwin. Os valores de IOS são apresentados na Figura 15.

Figura 15 – Série com valores do IOS no período de 1866–2015.



Fonte: Autor, 2018.

As fases extremas da Oscilação Sul (El Niño e La Niña) provocam significativas alterações nos totais mensais e sazonais de precipitação no Sul do Brasil (GRIMM et al., 1998, 2000). Entre elas, pode-se citar que a fase negativa da Oscilação Sul (El Niño), que traz primaveras mais chuvosas, além de aumentar a precipitação no inverno do ano

seguinte ao início do evento. Por outro lado, a fase positiva (La Niña) produz primaveras mais secas.

2.10 Forçante Climático - o Sol

De modo geral os moduladores atmosféricos para a radiação solar incidente são principalmente, a matéria presente em suspensão, tais como molécula de gases, aerossóis e nuvens, sendo estas os moduladores de primeira ordem da radiação solar que chega a superfície (ECHER et al., 2003) A quantidade de energia radiante que entra e sai constitui o balanço de energia da Terra. A atmosfera controla a quantidade da radiação solar que alcança a superfície terrestre, e ao mesmo tempo, controla a quantidade de radiação que é devolvida para o espaço. Qualquer fator que altere o balanço de radiação da Terra ou que altere a redistribuição de energia no sistema atmosfera-continentes-oceanos pode afetar o clima (SEINFELD; PANDIS, 1998).

A quantidade de energia que alcança a superfície da Terra pode variar por causa de (i) processos internos do Sol; (ii) mudanças na órbita da Terra, tais como a inclinação do seu eixo; (iii) mudanças dentro do ambiente da Terra e do sistema climático, tais como as atividades vulcânicas que causam nuvens de poeira que bloqueiam a energia do Sol; e (iv) mudanças na composição da atmosfera (HOYT; SCHATTEN, 1997; SEINFELD; PANDIS, 1998).

A distribuição geral da temperatura sobre a superfície da Terra e suas flutuações, diárias e anuais, dependem das variações na intensidade e na duração da insolação, as quais dependem principalmente da latitude do lugar. Assim, a latitude ocupa o primeiro lugar entre os fatores climáticos. Dependentes da distribuição geral da circulação da atmosfera sobre a superfície do planeta, e por conseguinte, intimamente ligados à latitude, seguem-se dois fatores climáticos de notável importância, que são a circulação secundária da atmosfera e os ventos predominantes (ARAÚJO, 1930).

Considerando somente a influência solar, todos os lugares de mesma latitude deveriam ter clima idênticos. Entretanto, tem-se que levar em consideração a influência, isolada ou simultânea, dos seguintes fatores físicos, a distribuição de terras e águas, as cadeias de montanhas e a altitude. Um clima que fosse dependente unicamente da latitude seria denominado "Clima Solar".

2.11 Atividade Solar e Número de Manchas

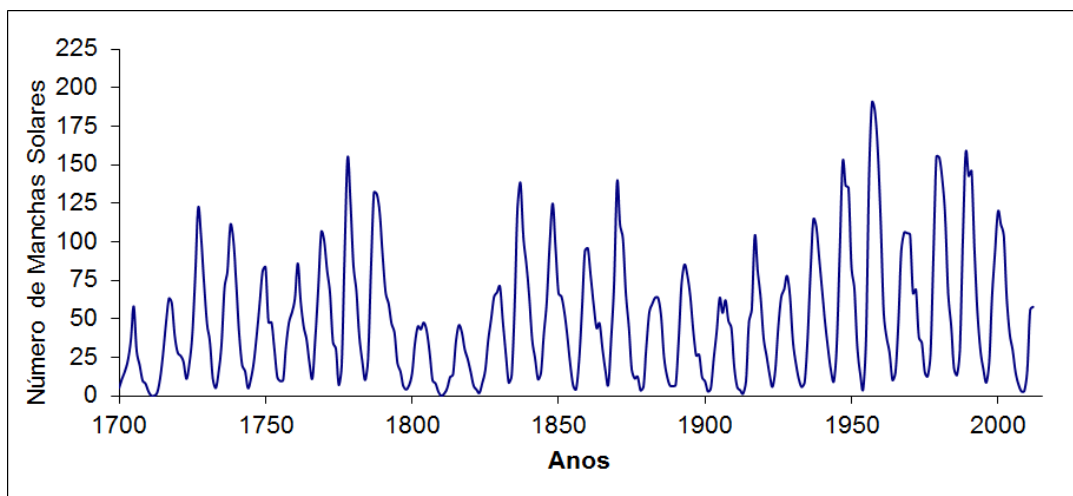
A emissão de energia do Sol em todas as suas formas não é constante, ela varia tanto no tempo (segundos a séculos) quanto com a posição do Sol. Quando se observa o Sol em alta resolução, Raios X, Ultravioleta, etc. A fotosfera e também as outras camadas da atmosfera solar revelam estruturas, por exemplo, filamentos, arcos magnéticos, braços

coronais e as próprias manchas solares que mudam dinamicamente de muitas maneiras. Estas estruturas são observadas em todas as latitudes no disco e em todos os níveis na atmosfera, e elas se manifestam em todas as regiões do espectro eletromagnético. A atividade solar tem influência sobre a distribuição dos campos magnéticos e partículas carregadas no meio interplanetário, e tem importantes consequências no estado físico da atmosfera superior da Terra (PRIEST, 1987).

Uma maneira de se estudar a atividade solar e, conseqüentemente, sua variabilidade, é por meio das manchas solares. Estas são manchas escuras vistas na fotosfera do Sol, porque são mais frias, em contraste com as regiões vizinhas que as rodeiam. O resfriamento ocorre localmente, porque o campo magnético inibe a convecção e assim permite a temperatura das manchas tornar-se mais baixa. A ocorrência das manchas solares varia com periodicidade média de 11 anos, conhecido por ciclo de Schwabe (KIVELSON; RUSSELL, 1995). Ao longo do ciclo de 11 anos há uma variação de aproximadamente 0,1% no fluxo de radiação solar representado pela constante solar com valor aproximado de 1.365 W/m^2 .

Dois ciclos de manchas solares são necessários para o Sol retornar ao mesmo estado de polaridade magnética, resultando numa periodicidade média de 22 anos, que é conhecido como ciclo de Hale (PRIEST, 1987). Os picos do número de manchas solares variam a cada sete ou oito ciclos (picos altos e baixos), o que indica longo ciclo no número de manchas solares, conhecido por ciclo de Gleissberg, de aproximadamente 90 anos (PRIEST, 1987; KIVELSON; RUSSEL, 1995). A atividade solar representada pelo número de manchas solar anuais, entre período de 1700 e 2015, é mostrada na Figura 16.

Figura 16 – Série com valores do número de manchas solares anuais no período de 1700 - 2015.



Fonte: Autor, 2018.

2.12 O Uso da Dendrocronologia no Estudo do Clima

Na Terra, meios naturais (físicos, químicos, geofísicos ou biológicos) são capazes de gravar e reter informações sobre vários fenômenos e eventos do passado, que são conservados no tempo e que podem ser datados. Registros Naturais (“proxies”) possibilitam recolher amostras, cuja análise fornece informações sobre o passado (PRESTES, 2009).

Um dos registros naturais mais importantes para o estudo do clima no passado são os anéis de crescimento de árvores. Por meio da contagem dos anéis de crescimento anuais, pode-se determinar a idade das árvores. Esta técnica é chamada dendrocronologia. Dela se desenvolveu a dendroclimatologia, que relaciona os anéis de crescimento anual com as condições climáticas, permitindo reconstruções e caracterizações de mudanças na temperatura global, e da alternância de períodos secos e úmidos que ocorreram no passado.

Etimologicamente, a dendrocronologia tem origem do grego *dendron* (árvore), *kronos* (tempo) e *logos* (conhecimento), sendo um método científico com grande potencial para realizar as datações aplicadas a madeira e para o estudo paleoclimático (GONÇALVES, 2007).

Bryson e Dutton (1961) citam dois cuidados na aplicação da série dendrocronológica como forma de proxies, o primeiro é determinar a equivalência entre a série dos anéis de crescimento com a série climatológica desejada, e o segundo diz respeito a identificação do comportamento interno da série e a determinação de suas variâncias e periodicidades.

Segundo Cook e Kairiukstis (2013), é indicada a escolha de uma região homogênea com árvores da mesma espécie. A série dendrocronológica deve ser associada a fatores limitantes, por exemplo, para o estudo da relação da precipitação é melhor a escolha de locais secos, pois a precipitação será um fator limitante. Já quando o interesse for com dados de relações térmicas, o local deverá possuir uma boa distribuição de precipitação.

Douglass (1921), efetuando a leitura de cerca de 100 mil anéis de 400 árvores amplificou o seu trabalho desenvolvido anteriormente em 1911, quando estudou 20 árvores, e descobriu que 19 delas apresentavam anéis de crescimento. Com a série cronológica obtida foi possível estimar a precipitação na região para dois séculos anteriores.

Hughes; Swetnam; Diaz (2011) citam que a dendrocronologia é uma ciência nova, tendo sua internacionalização há pouco mais de quarenta anos, com o primeiro *Workshop* Internacional sobre dendroclimatologia, em abril de 1974, inspirado e organizado por Harold C. Fritts.

Villalba et al. (2011), utilizando uma extensa cronologia obtida de 16 tipos de árvores ao longo da costa da América do Norte e do Sul para um intervalo de 1640 a 1989, encontraram uma relação significativa entre as forçantes geradas pelo ENOS e a

Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) com a largura de crescimento dos anéis.

Wilson (1994) cita uma possível relação da Pequena Idade do Gelo com o Mínimo de Maunder, período sem manchas solares, identificado com o estudo da relação do carbono-14 nos anéis das árvores, revelando assim existência de um ciclo solar de 200 anos.

2.13 Anel de Crescimento

A contagem dos anéis de crescimento é uma técnica utilizada para identificar a idade de árvores. De modo geral, em regiões com clima temperado, os anéis de árvore formam-se anualmente. Um anel anual corresponde à transição entre o lenho primaveril (lenho inicial/claro) e o lenho outonal (lenho tardio/escuro). O lenho inicial desenvolve-se na primavera/verão em consequência da temperatura e do fotoperíodo favoráveis ao crescimento, e caracteriza-se por células maiores com paredes finas e grande diâmetro. Já no lenho tardio, as células diminuem e absorvem nutrientes tendo paredes mais espessas, e por isso, apresentam maior densidade. A alternância entre o lenho inicial e o tardio formados periodicamente gera um anel anual de crescimento (BOTOSSO; MATOS, 2002).

Palermo; Latorraca; Abreu (2002) citam que a determinação da idade e o ritmo de crescimento de uma árvore, com base na técnica de contagem e mensuração da largura dos anéis é simples e rápida, porém com limitações de largura dos anéis em função da altura do tronco.

Segundo Worbes (2002), se a árvore possui anéis anuais visíveis, a dendrocronologia é a metodologia mais simples para a datação desta árvore.

2.14 *Ocotea porosa* (Nees) Barroso - Imbuia

A espécie *Ocotea porosa* (Figura 17) conhecida como imbuia, pertence à família *Lauraceae*, podendo atingir alturas de 10 a 20 m, e em média 50 a 150 cm de diâmetro na altura do peito (DAP). Na fase adulta, estes valores podem alcançar até 30 m de altura e 320 cm ou mais de DAP. Trata-se de uma espécie característica e exclusiva da FOM (CARVALHO, 2003). A imbuia ainda é pouco utilizada como potencial dendrocronológico mas alguns trabalhos tal como Stepka (2012) já abordam seu potencial dendrocronológico.

A imbuia nasce naturalmente no Paraná, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e São Paulo, entre as latitudes 22°30' S (RJ) e 29°50' S (RS), associada com *Araucaria angustifolia* (Pinheiro-do-Paraná), sendo rara onde há ausência de pinheiros (KLEIN, 1963). Nas sub-matas dos pinhais, constitui a árvore mais abundante, sendo encontrada comumente de 6 a 20 imbuias adultas por hectare. A imbuia possivelmente é a espécie arbórea mais longeva da “floresta com araucária”, podendo ultrapassar 500 anos de vida (CARVALHO, 1994).

Figura 17 – *Ocotea porosa* (imbuia) na região de General Carneiro.

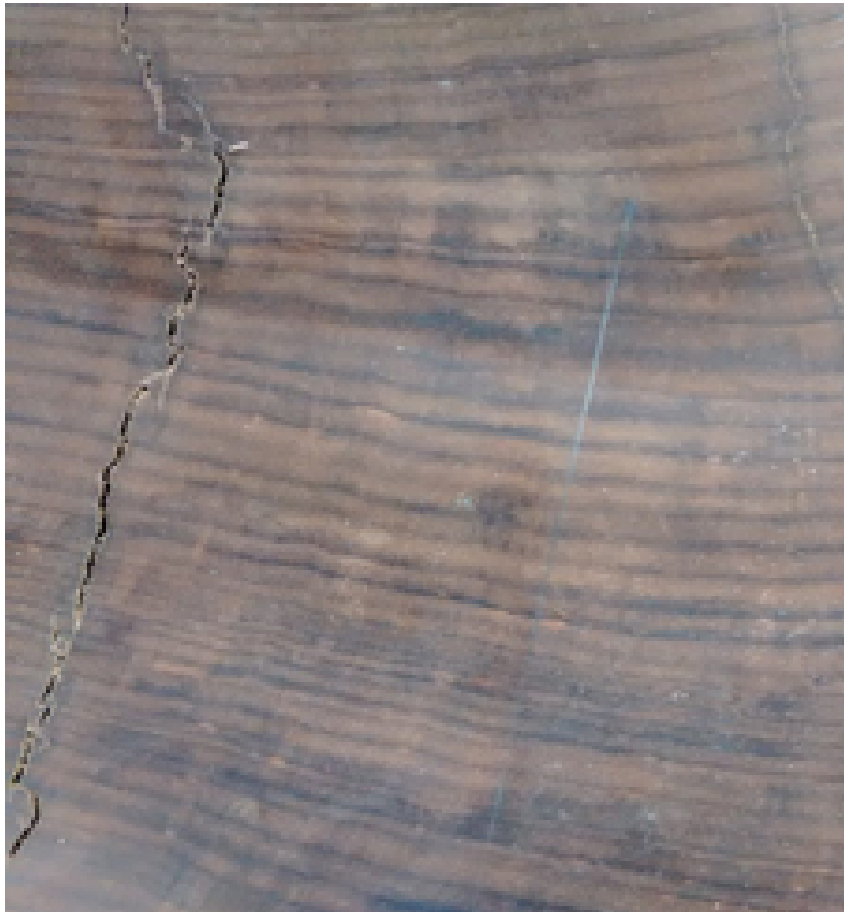
Fonte: Laboratório de Registros Naturais - UNIVAP.

Segundo Reitz, Klein e Reis (1978), nas áreas de sua maior concentração, a imbuia apresenta frequência elevada, em virtude de sua distribuição bastante uniforme por meio das diversas condições que podem ser influenciadas pelo solo, ocorrendo naturalmente em solos de baixa fertilidade natural, com altos teores de alumínio, e também, em solos com níveis de fertilidade química entre média e elevada. Pode ser observada desde o fundo de vales até o alto das encostas, em pronunciadas alterações na sua frequência (MARCHESAN et al., 2006; CARVALHO, 1994).

Anatomicamente em corte transversal do lenho, observa-se a presença de camadas de crescimento distintas, caracterizadas pelo achatamento das fibras no lenho tardio, com paredes celulares que se espessam gradativamente no sentido radial (Figura 18). No limite

entre os anéis de crescimento ocorre a transição brusca das células com paredes espessas para aquelas com paredes finas do lenho inicial do anel seguinte (TOMAZELLO FILHO et al., 2004; COSMO et al., 2009).

Figura 18 – Secção transversal macroscópica do lenho de *Ocotea porosa* mostrando os anéis de crescimento.



Fonte: Laboratório de Registros Naturais - UNIVAP.

3 MATERIAIS e MÉTODOS

Neste Capítulo, são apresentados os procedimentos de seleção do material, e os métodos que foram utilizados na coleta e tratamento das amostras, bem como, os métodos de análises dos dados empregados.

3.1 Descrição do material empregado no estudo

A espécie florestal foi selecionada em função de: (i) suas características morfológicas e anatômicas da madeira – potencial dendrocronológico; (ii) posição geográfica – foram selecionadas regiões de clima subtropical/temperado; e (iii) idade das plantas. Atendendo a estes critérios, foi selecionada a espécie *Ocotea porosa* (Nees) Barroso em área de FOM, na região Sudeste do estado do Paraná. As amostras de *Ocotea porosa* foram coletadas no município de General Carneiro, em janeiro de 2013.

Na coleta das amostras, foi verificado se as árvores estavam com alguma doença ou se tinham sido atacadas por alguma praga, para eliminar qualquer influência destas nas séries de anéis de crescimento.

3.2 Obtenção das Séries Dendrocronológicas

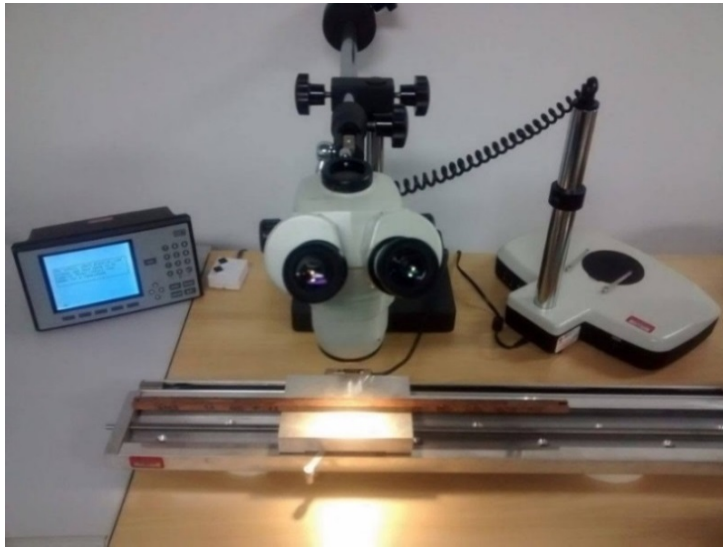
Esta etapa da pesquisa compreende a obtenção das séries temporais das espessuras dos seus anéis de crescimento das árvores por meio de uma mesa de mensuração.

A obtenção das séries cronológicas dos anéis de crescimento das amostras selecionadas foi conduzida no Laboratório de Registros Naturais, na Universidade do Vale do Paraíba - UNIVAP. As medições dos anéis de crescimento foram feitas com o uso da mesa de mensuração VELMEX, com precisão de 0,001 mm, conectado a um microscópio estereoscópico com retículo micrométrico (Figura 19).

O primeiro passo para a mensuração da largura dos anéis de crescimento é a seleção da área adequada das medidas. Isso significa que, na escolha dos raios de um disco de madeira, deve ser considerado parâmetros, tais como, a presença de madeira de reação (formada pela árvore para a sua estabilidade em terreno inclinado), nós de madeira, anéis de crescimento ausentes, etc. Medidas precisas são obtidas quando são primeiramente identificados e demarcados os limites dos anéis de crescimento (SCHWEINGRUBER, 1988).

Para a visualização dos anéis, todas as amostras foram polidas na superfície transversal com uma sequência de lixas de diferentes granulações (de 50 a 600 granos). Posteriormente, foram examinadas sob um microscópio estereoscópico (com aumentos de 6 a

Figura 19 – Mesa de mensuração Velmex associada ao microscópio estereoscópico.



Fonte: Laboratório de Registros Naturais - UNIVAP.

40 vezes) e sistema de iluminação de fibra ótica para a demarcação dos anéis anuais de crescimento. Foi realizada a contagem dos anéis de crescimento para a determinação da idade das árvores e a sua correlação com os respectivos anos do calendário civil.

Como o ano de coleta é conhecido, foi feita a datação dos anéis anuais de crescimento no sentido da casca para medula tendo início no último anel formado, correspondente ao ano de 2011.

Os valores medidos foram transferidos para uma planilha eletrônica para o desenvolvimento dos cálculos e obtenção das figuras de variação da largura dos anéis de crescimento.

3.3 Série dendrocronológica de Imbuia

Para o estudo dendrocronológico foram analisadas 64 amostras de imbuia obtidas a partir de 21 árvores por método não-destrutivo, com auxílio de sondas de incremento (sonda de Pressler) extraídos na altura do DAP (1,30 m) no mês de janeiro de 2013, no município de General Carneiro. A Tabela 1 apresenta o número de amostras retirado das 21 árvores selecionadas para o trabalho.

Tabela 1 – Número de amostras obtidas por árvore.

Árvore	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Número de Amostras	3	2	3	2	4	3	3	3	3	4	2	5	4	2	2	4	3	4	4	1	3

Para a construção da série dendrocronológica do sítio, primeiramente, removeu-se de cada série a tendência que representa o crescimento biológico de cada árvore, anomalia

e/ou danos que podem ter ocorrido em alguma árvore, ou algum outro fenômeno esporádico que tenha ocorrido, dado o interesse na resposta das árvores a fatores ambientais. A remoção da tendência foi feita pela subtração de funções de ajustes polinomiais por meio do software *Origin 7.0*, referenciadas no manual do usuário (*Origin User's Manual*).

3.4 Análise de Agrupamento

A análise de agrupamentos é o estudo do conjunto de relações interdependentes. É uma metodologia numérica multivariada, com o objetivo de propor uma estrutura classificatória, ou de reconhecimento da existência de grupos sem fazer distinção entre variáveis dependentes e independentes. Sua aplicação engloba uma variedade de técnicas e algoritmos, com o objetivo de encontrar e separar as variáveis em grupos homogêneos ou similares (VICINI; SOUZA, 2005).

A análise de agrupamento é bastante simples a partir de um ponto de vista estatístico e não possuindo problemas formais ao ser diretamente aplicada aos dados de anéis de árvores. Primeiro, ela envolve computar uma matriz com as comparações entre todos os pares de variáveis (indivíduos). Tais comparações podem ser realizadas utilizando diferentes parâmetros estatísticos e são expressos como medidas de dissimilaridade, dada pela distância entre os indivíduos. Em uma segunda etapa, os indivíduos ou grupos que têm as menores distâncias são unidos em clusters sucessivamente maiores, e o resultado final é normalmente expresso como uma árvore ou dendrograma hierárquico, que facilita a identificação de grupos (GARCÍA-GONZÁLEZ; FONTI, 2008).

Em dendrocronologia, a análise de agrupamento é uma ferramenta que vem sendo utilizada por diversos pesquisadores, com a finalidade de obter uma construção de grupos com comportamento homogêneo, destacando-se Neira; Lara, (2000); Wimmer; Grabner, (2000); Koprowski; Zielski, (2006); Wilczyński; Feliksik, (2007); Campbell et al., (2007); García-González (2008); Piraino et al., (2013); Babushkina et al., (2016).

Para a realização da análise de agrupamento das séries dendrocronológica foi utilizado o processo hierárquico aglomerativo, com a medida de dissimilaridade entre os elementos dada pela distância Euclidiana quadrática, empregando o método de variância de Ward. Os grupos formados são representados por dendrogramas ou diagrama de árvore, utilizando a análise de agrupamento, por meio do programa *IBM SPSS Statistics*.

3.5 Distância Euclidiana Quadrática

A ideia central do agrupamento de pontos de dados é a ideia de distância. Os aglomerados devem ser compostos de pontos separados por pequenas distâncias, em relação às distâncias entre aglomerados (WILKS, 2011). A intenção é a formação de grupos em

que as distâncias entre os elementos do grupo seja mínima e as distâncias entre os grupos seja máxima.

A medida de distância mais frequentemente empregada na análise de agrupamento, quando todas as variáveis são quantitativas, é a distância Euclidiana no espaço de K -dimensões do vetor de dados (WILKS, 2011). A distância Euclidiana quadrática entre dois itens, x e y , é a soma das diferenças quadráticas entre os valores dos itens. A distância euclidiana quadrática $D.E$ é definida por:

$$D.E = \sum_{j=1}^p (X_{ij} - Y_{ij})^2. \quad (3.1)$$

Quanto mais próximo de zero for a distância euclidiana, mais similares são os objetos comparados (BUENO; AGUIAR, 2004).

3.6 Método da variância mínima de Ward

O método de Ward busca gerar grupos que possam minimizar a variância dentro destes grupos. Este método minimiza o quadrado da distância euclidiana às médias dos grupos. Um grupo será reunido a um outro se essa reunião proporcionar o menor aumento da variância intra-grupo. Este método de variância calcula as médias de todas as variáveis para cada grupo, escolhendo a que proporciona a menor variância. Calcula-se então, para cada objeto, o quadrado da distância euclidiana, as médias do agrupamento. Somam-se essas distâncias para todos os objetos. Em cada estágio, combinam-se os dois grupos que apresentarem menor aumento na soma global de quadrados dentro dos agrupamentos. Este método é altamente eficiente na formação de grupos (BUENO; AGUIAR, 2004; VICINI; SOUZA, 2005; WILKS, 2011).

3.7 Dendrograma

O progresso e os resultados intermediários de uma análise de agrupamento hierárquico são convenientemente ilustrados usando um dendrograma ou diagrama de árvore. Neste diagrama, cada ramo representa um elemento, enquanto a raiz representa o agrupamento de todos os elementos (WILKS, 2011). Há duas formas de se representar um dendrograma: horizontal e vertical.

No dendrograma horizontal, as linhas verticais (eixo y) representam os grupos unidos por ordem decrescente de semelhança, e a posição da reta o eixo x , indica as distâncias entre os grupos que foram formados. O dendrograma é lido de cima para baixo, quando for feito na forma horizontal.

No dendrograma vertical, a leitura é feita da direita para esquerda, no qual as linhas verticais (eixo y) indicam as distâncias entre os grupos que foram formados, e a

posição da reta na escala (eixo x) representa os grupos unidos por ordem decrescente de semelhança.

Por meio do dendrograma e do conhecimento prévio sobre a estrutura dos dados, deve-se determinar uma distância de corte para definir quais serão os grupos formados. Essa decisão deve ser feita de acordo com o objetivo da análise e o número de grupos desejados (VICINI; SOUZA, 2005).

3.8 Dados Geofísicos e Climatológicos

Para representar as variações da atividade solar, será utilizada a série anual do Número de Manchas Solares (1700 - 2015), obtidas do centro de dados do *Sunspot Index Data Center* em Bruxelas, Bélgica (“Source: WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels” - <http://www.sidc.be/silso/datafiles>).

Os dados de TSM dos Oceanos Atlântico e Pacífico Equatorial foram obtidos no sítio Climate Explorer, disponíveis no período de 1854 - 2015. Inicialmente, os dados disponíveis estavam em ponto de grade de dois graus por dois graus ($2^\circ \times 2^\circ$). Posteriormente, foi realizada uma média dos pontos para as latitudes e longitudes desejadas, obtendo assim uma coluna de dados representativa da região.

Os dados atmosféricos selecionados para o trabalho foram a precipitação no período de 1900 - 2010, a temperatura do ar 1948 - 2010 e o IOS de 1880 a 2015. Os dados de precipitação e temperatura do ar foram obtidos de reanálise em *Earth System Research Laboratory* (<http://www.esrl.noaa.gov>), tendo resolução espacial de $0,5^\circ$ Latitude \times $0,5^\circ$ Longitude.

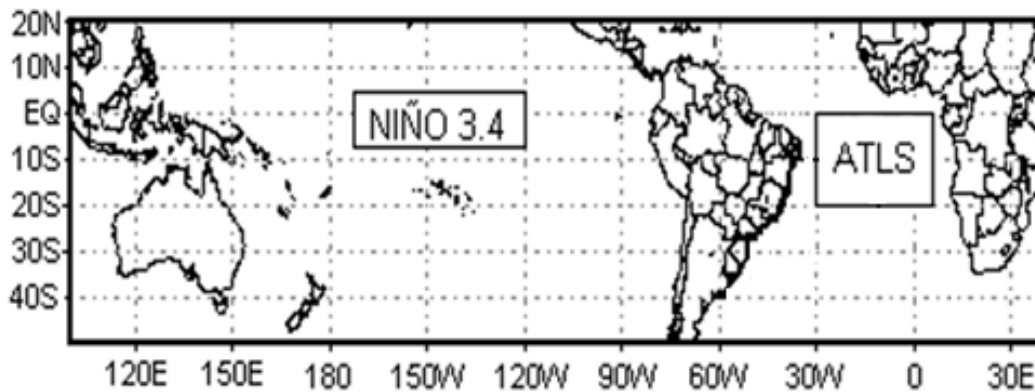
3.9 Temperatura de Superfície do Mar: Oceanos Atlântico e Pacífico

Para verificar a influência dos oceanos na precipitação, na temperatura e nos anéis de crescimento da região de estudo, serão utilizados um índice do Atlântico e um do Pacífico.

Para o Atlântico, será utilizado o Índice do Atlântico Sul (IATLS) definido entre as latitudes de 0° S e 20° S e as longitudes 30° W e 10° E, disponível no site do *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>.

Para verificar a influência do Pacífico Equatorial (PACE) na precipitação e nos anéis de crescimento, foi selecionada a região Niño 3.4 (5° N - 5° S; 120° - 170° W), representada pelo índice mensal do Pacífico Equatorial (IPE). A localização das regiões consideradas nos Oceanos Pacífico e Atlântico para a realização do trabalho podem ser observadas na Figura 20 (SILVA, 2001).

Figura 20 – Regiões consideradas sobre os Oceanos Pacífico (Niño 3.4) e Atlântico Sul (ATLS).



Fonte: Adaptada, Silva (2001).

O Pacífico possui a maior extensão longitudinal na faixa equatorial, possuindo a maior variabilidade interanual atingindo até 3 °C de temperatura acima da média em eventos El Niño (TRENBERTH, 1997).

3.10 Métodos de Análise

Para séries dendrocronológicas, realizar-se-á análise matemática pelos métodos de análises espectrais clássicos (regressão iterativa) e por Wavelet, além das correlações matemáticas com outras séries temporais (manchas solares, temperatura do ar, precipitação, TSM, IOS)

3.11 Análise Espectral

A análise espectral é uma das mais importantes técnicas matemáticas no estudo de séries temporais, sendo aplicada em praticamente todas as áreas do conhecimento humano, ou pelo menos nas áreas onde é possível obter uma série temporal que expresse alguma informação ou fenômeno dessa área. Muitas técnicas têm sido desenvolvidas para análise de séries temporais. O método da regressão iterativa, descrito na sua forma geral por Wolberg (1967), e adaptado em linguagem C por Rigozo; Nordemann (1998) - (ARIST – Análise por Regressão Iterativa de Séries Temporais), foi aplicado na procura de periodicidades em séries temporais do índice dendrocronológico, das variáveis geofísicas e climatológicas.

Este método é um ajuste de mínimos quadrados iterativo e pode ser aplicado ao ajuste de qualquer função (derivável em relação aos parâmetros e variáveis), a dados experimentais, sem necessidade de linearização prévia. A análise espectral é aplicada,

neste trabalho, na procura de periodicidades nas séries temporais, com o uso, para cada período considerado, de uma única função senoidal com três parâmetros desconhecidos: a_o = amplitude, a_1 = frequência angular, e a_2 = fase da função. O ponto inicial do método é a definição da chamada função condicional, que é:

$$F = Y - a_o \sin(a_1 t + a_2) \quad (3.2)$$

no qual Y é o sinal medido, t é o tempo e a_o , a_1 , e a_2 são os três parâmetros desconhecidos, que serão procurados por iterações por meio da minimização do quadrado desta função F . O número máximo de iterações utilizado na determinação dos três parâmetros pode ser escolhido entre 50 a 200 (RIGOZO; NORDEMANN, 1998). A vantagem deste método é que ele fornece o desvio padrão de cada um dos três parâmetros determinados. Isto permite uma seleção das amplitudes mais importantes, que apresentam maiores valores na relação amplitude/desvio.

3.12 Correlação e Regressão Linear Simples

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

$$r(n) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.3)$$

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

A dependência funcional das variáveis envolvidas pode ser tratada pelo problema da regressão. Para o presente propósito, será admitida que a forma da linha de regressão seja uma reta, como o melhor ajuste por pontos representando as variáveis dependente e independente. O melhor ajuste médio que a raiz quadrática média difere entre os pontos medidos e a linha teórica, é minimizado. Supondo-se ser a linha teórica de regressão uma reta e que seja estabelecido a regressão de y em função de x . Logo, a função que deseja-se obter é da forma

$$y = \alpha + \beta x. \quad (3.4)$$

Os parâmetros α e β da reta teórica serão estimados dos pontos experimentais fornecidos pela amostra, obtendo uma reta estimativa na forma

$$y' = a + bx, \quad (3.5)$$

no qual a é a estimativa do parâmetro α , e b , também chamado coeficiente de regressão linear, é a estimativa do parâmetro β . Os parâmetros a e b são os coeficientes obtidos do melhor ajuste (BEVINGTON, 1969; COSTA NETO, 1977; WATTS, 1981).

3.13 Filtros Digitais

Um filtro é qualquer dispositivo físico ou operação matemática que é aplicada a uma série temporal na ordem de mudá-la de alguma maneira. A principal finalidade dos filtros digitais é alterar a informação espectral contida em um sinal de entrada x_k , produzindo um sinal de saída aprimorado y_k . Estes podem ser executados tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência. Filtros são, de um modo geral, classificados como filtro passa baixa (*low-pass*), passando componentes de baixa frequência, enquanto atenua frequências altas; e filtro passa alta (*high-pass*), que permite a passagem de componentes de altas frequências, eliminando as baixas frequências. O filtro passa banda (*band-pass*), é aquele que rejeita tanto componentes de frequências altas como baixas, passando uma banda intermediária (STEARNS; DAVID, 1993).

3.14 Análise Wavelet

A transformada wavelet é uma ferramenta útil para análise de sinal não estacionário. Permite identificar as principais periodicidades de uma série temporal e sua evolução. Uma das limitações da transformada de Fourier encontra-se no fato de que ela não permite analisar em separado diferentes trechos do sinal. Além disso, as ondas senoidais são bem localizadas na frequência, mas não no tempo, pois seus suportes são de comprimento infinito.

Afim de contornar esses problemas, foi introduzida a transformada wavelet que utiliza janelas de largura variável, que podem assim ser mais ajustadas as características de cada trecho do sinal. Então, por exemplo, se há um aumento na resolução do domínio do tempo implica em uma perda de localização na frequência e vice-versa. Isto ocorre devido ao princípio da Incerteza de Heisenberg. Em 1927, o físico Werner Heisenberg determinou que a posição e a velocidade de um objeto não podem ser medida com exatidão no tempo ou mesmo descrito com exatidão em teoria. Em processamento de sinais, é impossível saber simultaneamente a frequência e a exata posição no tempo desta frequência de um sinal qualquer. Para determinar a frequência de um sinal, este deve ser um suporte infinito no tempo, ou vice-versa.

Portanto, se a função wavelet escolhida apresenta um suporte mais compacto (estreita) vai ter uma boa resolução no tempo e uma resolução mais pobre no domínio da frequência, enquanto que uma wavelet com suporte mais amplo terá uma resolução mais pobre no domínio do tempo e uma boa resolução no domínio da frequência. A função wavelet de Morlet foi utilizada no presente trabalho, porque é a adequada para detectar continuamente variações de periodicidade em sinais geofísicos, e tem a mesma localização tanto em tempo, como em frequência. A wavelet de Morlet é uma onda plana modulada por uma função gaussiana dada por:

$$\psi(t) = \exp(i\omega_0 t) \exp\left(-\frac{1}{2}t^2\right), \quad (3.6)$$

no qual o valor de $\omega_0 = 2\pi$. Este valor de ω_0 foi escolhido porque implica num valor aproximado de frequência central igual a 1, e uma relação com o período de Fourier igual a $T = 1,03a$, em que a é o valor de escala, que será descrito a seguir.

A transformada wavelet contínua (CWT) de uma função f no tempo é definida como

$$W(a, b) = \int f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad a > 0, a \in \mathcal{R}, \quad (3.7)$$

no qual $*$ representa o complexo conjugado e o fator $|a|^{\frac{1}{2}}$ é introduzido em ordem para garantir que todas as funções $|a|^{\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t}{a}\right)$, tenham a mesma energia em $\mathcal{L}^2(\mathcal{R})$. A função $W(a, b)$ representa os coeficientes wavelet em função tanto do tempo, como de frequência (posição b e escala a).

Entretanto, para uma função ser considerada uma função Wavelet, ela deve satisfazer as seguintes condições:

1. A função ψ deve ter média igual a zero,

$$\int \psi(t)dt = 0. \quad (3.8)$$

Esta condição é denominada de condição de admissibilidade. Esta condição impõe que nem toda onda pode ser considerada uma wavelet.

2. Ter energia finita,

$$\int |\psi(t)|^2 dt < \infty. \quad (3.9)$$

Esta segunda condição garante que a função está tanto localizada no espaço da frequência quanto no espaço do tempo, como descrito pelo princípio de Heisenberg.

Dadas duas séries temporais 1 e 2, define-se o espectro cruzado de wavelet como

$$W_{XY} = \frac{W_1(a, t) W_2^*(a, t)}{(\int W_1(a, t)^2 dt \int W_2(a, t)^2 dt)^{\frac{1}{2}}} \quad (3.10)$$

no qual $W_i(a, t) = |W_i(a, t)| - \overline{|W_i(a, t)|}$, W_i são os coeficientes wavelet e $\overline{W_i}$ é a média aritmética no tempo para a série $i = 1$ ou 2 . A potência da cross-wavelet, definida por $|W_{XY}|$, indica a escala de alta covariância entre duas séries temporais (x, y) (TORRENCE; COMPO, 1998; PERCIVAL; WALDEN, 2000).

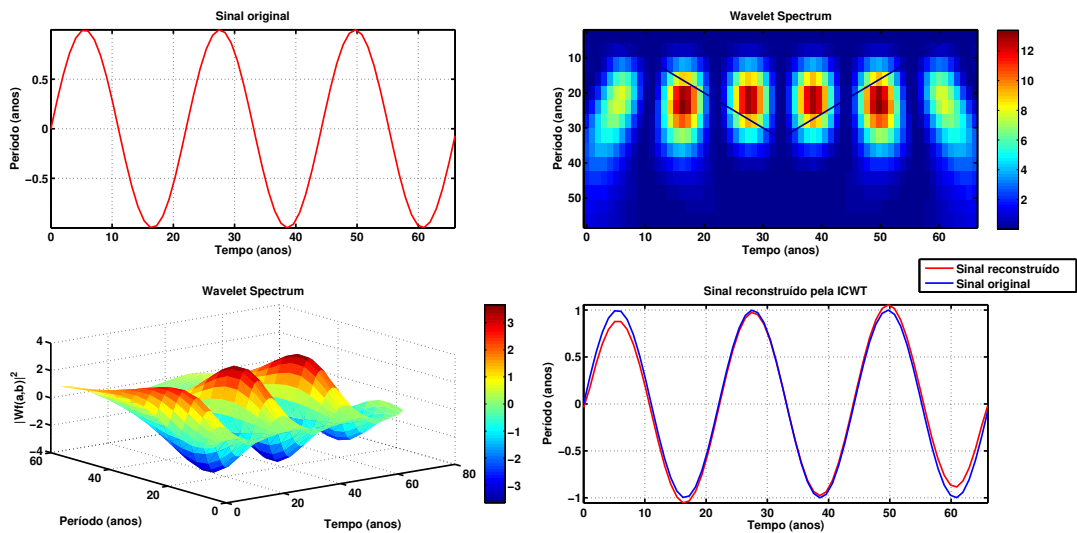
3.15 Efeitos de fronteira

Nesta Tese, modificou-se o algoritmo da CWT desenvolvido por Torrence e Compo (1998) para suprimir os efeitos de fronteira ou borda. É importante mencionar que os efeitos de borda ocorrem devido à limitação do comprimento do sinal, e serão tratados aqui pelo método de simetrização. Este método assume que os sinais podem ser recuperados fora do seu suporte original através da sua replicação simétrica (espelhamento do sinal), tanto à esquerda quanto à direita do seu suporte. Entretanto, este método tem a desvantagem de introduzir descontinuidades nas bordas, mas funciona bem em geral. Além disso, não há perda de resposta devido ao truncamento de wavelet, e o cone de influência não é necessário como discutido em Prestes et al. (2018).

Para demonstrar que o método de simetrização é válido, primeiramente, gerou-se uma série sintética do ciclo solar, uma senóide simples com período de 22 anos (painel superior à esquerda da Figura 21). Esta figura mostra a CWT sem nenhum tratamento de fronteiras, portanto apenas os coeficientes wavelet que estão dentro da região delimitada pelo cone de influência (COI) - linha azul mostrado no escalograma - são confiáveis (painel superior à direita da Figura 21). No painel inferior à esquerda da Figura 21, mostra-se uma visão espacial do comportamento dos coeficientes wavelet, em outras palavras, um escalograma 3-D. O painel inferior à direita da Figura 21 mostra o sinal sintético original (linha azul) e o sinal recuperado (linha vermelha) pela aplicação da transformada

contínua wavelet inversa (ICWT). Pode-se notar que o sinal recuperado teve distorção nas bordas devido aos efeitos de fronteira.

Figura 21 – Transformada wavelet contínua de uma função ($f(t) = \text{sen}(0,28545t)$) usando como wavelet analizadora chapéu mexicano (DOG). O painel superior esquerdo apresenta o sinal sintético semelhante ao do ciclo solar apresentando uma periodicidade de 22 anos ao longo de um período total de 66 anos (comprimeto do sinal). O painel superior direito apresenta o espectro de potência wavelet (escalograma) com um cone de influência triangular (COI - linha azul) devido à escala linear de pseudo-período. O painel inferior esquerdo apresenta o espectro de potência wavelet em 3D. O painel inferior direito apresenta o sinal original $f(t) = \text{sen}(0.28545t)$ na cor azul e sua reconstrução usando transformada wavelet contínua inversa na cor vermelha, é possível ver os problemas devido aos efeitos de borda referentes à região não confiável sob a região do COI.



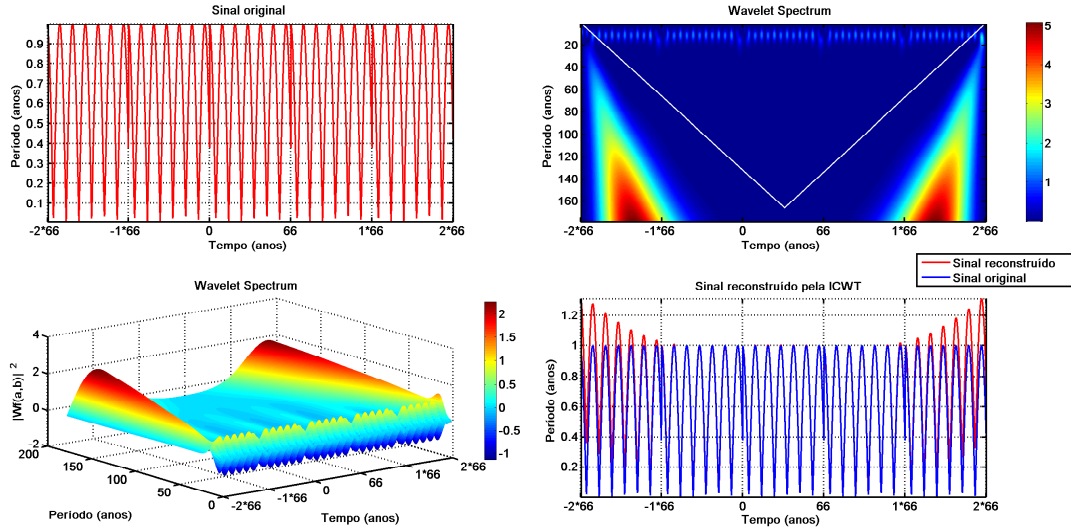
Fonte: Autor, 2018.

A Figura 22 é similar a Figura 21, entretanto mostra a análise wavelet para um sinal sintético referente ao número de manchas solares $f(t) = \text{abs}(\text{sen}(0,28545t))$, este sinal apresenta uma periodicidade de 11 anos ao longo de um período de 66 anos. Nesta análise, pode-se perceber que os efeitos de fronteira são mais significativos. Por exemplo, nos escalogramas aparecem periodicidades “fantasmas” na região fora do COI com periodicidades entre 10 e 50 anos, e os efeitos de fronteira são mais evidentes no sinal reconstruído pela ICWT.

A fim de eliminar o efeito das periodicidades fantasmas da Figura 22, o mesmo sinal é simetricamente replicado duas vezes à direita e à esquerda do seu suporte original. Similarmente à Figura 22, os escalogramas da Figura 23 mostram periodicidades “fantasmas” na região fora do COI com periodicidades entre 20 e 160 anos. Apesar da simetrização ter a desvantagem de criar artificialmente descontinuidades nas bordas do sinal replicado, pode-se perceber que não aparecem periodicidades “fantasmas” significativas

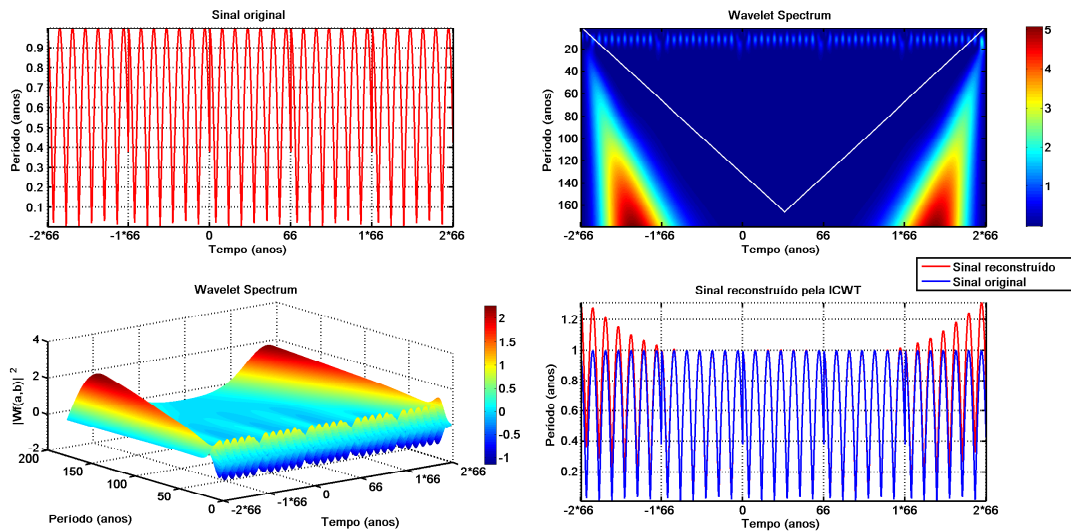
entre as região replicadas. Portanto, em geral esse método funciona bem.

Figura 22 – Similar à Figura 21, mas para a função $f(t) = \text{abs}(\sin(0,28545 * t))$.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 23 – Similar à Figura 22, entretanto aqui o método de simetrização é aplicado, sendo assim o sinal replicado duas vezes sobre seu suporte original. A simetrização tem a desvantagem de criar artificialmente descontinuidades nas bordas, mas essas descontinuidades não criam periodicidades “fantasmas”, portanto método funciona bem em geral.

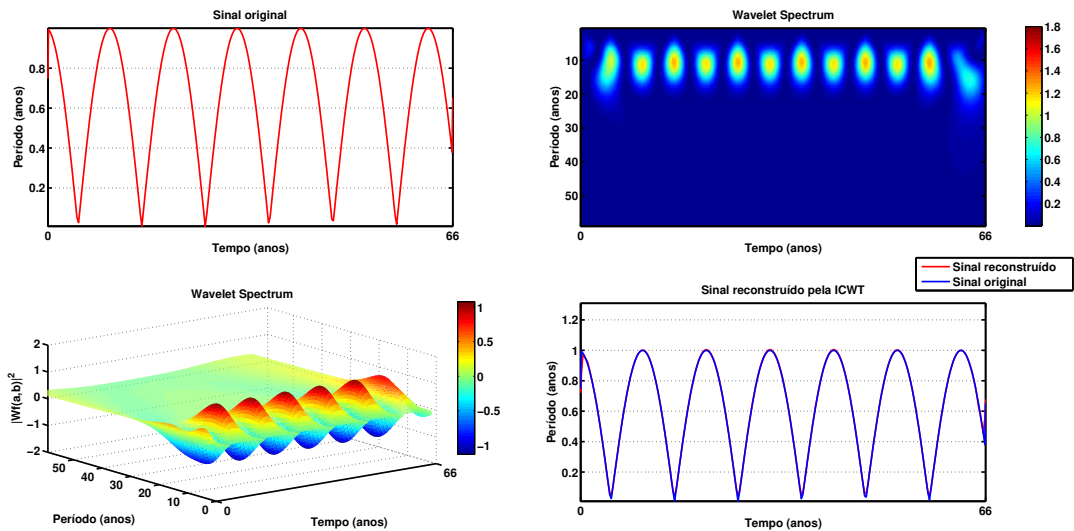


Fonte: Autor, 2018.

Fazendo o zoom no eixo do tempo da Figura 23 entre 0 e 66 anos, o suporte original do sinal analisado é recuperado. Este zoom é mostrado na Figura 24. É possível notar que

não há perda de resposta da análise wavelet devido ao truncamento da wavelet analisadora nas bordas, e todos os coeficientes wavelet estão agora dentro do COI da Figura 23, que não aparece nesta figura devido ao zoom. O sinal reconstruído pela ICWT é bastante semelhante ao sinal original, verifica-se que o efeito de fronteiras é quase inexistente. Além disso, o teorema da amostragem de sinal é respeitado considerando sempre o suporte original do sinal (período mínimo e máximo), nos quais o período mínimo é de 2 anos e o máximo é de 33 anos.

Figura 24 – Zoom do eixo do tempo da Figura 23 entre 0 e 66 anos.



Fonte: Autor, 2018.

Portanto, nesta Tese, o processo de simetrização será utilizado na construção de todos os escalogramas wavelet, a fim de eliminar o COI, e pode ser aplicado a qualquer escolha de wavelet analisadora. Antes de utilizar os escalogramas obtidos, estes serão comparados com os escalogramas obtidos pelo programa original desenvolvido por Torrence e Compo (1998), afim de verificar se nenhuma periodicidade “fantasma” foi incluída pelo método de simetrização. Uma vez que o escalograma é verificado e validado, este será utilizado nas análises espectrais das séries dendrocronológicas, e de parâmetros climáticos e geofísicos.

4 RESULTADOS e DISCUSSÕES

Neste Capítulo, são apresentados os procedimentos de obtenção e análise das séries temporais de espessura dos anéis de crescimento, bem como, das séries geofísicas e climatológicas. Em seguida, serão apresentados os resultados e suas discussões. As análises dessas séries temporais serão feitas pelo método de regressão iterativa, e por meio de análise wavelet (cross-wavelets) a fim de se obter as relações entre as séries temporais (no caso, número de manchas solares, IOS, TSM, precipitação e temperatura do ar).

4.1 Série da Espessura de Anéis de Crescimento de Imbuia

A construção da série dendrocronológica de imbuia teve início no lixamento das amostras coletadas na região de General Carneiro, com lixas de granulometria de 50 a 600, para destacar os anéis de crescimento. Com as amostras polidas, foram selecionados os melhores raios com base na morfologia dos anéis de crescimento. Após, os anéis foram marcados e finalmente medidos. A Tabela 2 apresenta o número de árvores envolvidas, o número de anéis da amostra mais antiga de cada árvore, e o ano inicial de cada árvore (considerando 2011 como ano final).

Tabela 2 – Idade das árvores em função do número de anéis obtidas por árvore.

Árvore	Número de anéis	Ano Inicial
1	565	1446
2	84	1927
3	84	1927
4	151	1860
5	341	1670
6	83	1928
7	341	1670
8	91	1920
9	235	1776
10	379	1632
11	310	1701
12	225	1786
13	139	1872
14	194	1817
15	179	1832
16	491	1520
17	219	1792
18	278	1733
19	199	1812
20	239	1772
21	349	1662

Após as medições e obtenções das séries temporais de anéis de crescimento, iniciou-se o processo para a construção da série cronológica para cada indivíduo. Fez-se a correlação entre as amostras extraídas de um mesmo indivíduo. Aquelas amostras que apresentaram melhor coeficiente de correlação, foram utilizadas para calcular a média, e obter assim uma série temporal para cada indivíduo. O processo de correlação auxilia na seleção das melhores amostras. São descartadas aquelas séries dendrocronológicas que apresentam baixa correlação, o que evidencia pouca similaridade em seu crescimento.

Uma vez obtida a série média de cada indivíduo, foram aplicadas funções de ajuste nas séries dendrocronológicas para eliminar as tendências indesejáveis ao foco dessa pesquisa. Após obter a melhor curva que representa longos períodos associadas ao ritmo de crescimento de cada série, subtraiu-se as tendências de cada série de anéis de crescimento, tendo como resultado as cronologias da variação da largura dos anéis com relação as suas tendências. A remoção da tendência nas séries de anéis de crescimento transformou-as em séries estacionárias e comparáveis entre si.

As funções de ajuste utilizadas na padronização foram a linear, a polinomial de grau 2, e a polinomial de grau 3. Os ajustes selecionados foram aqueles que apresentaram melhor correlação com a série dendrocronológica. Dessa forma, consegue-se respeitar as particularidades de crescimento de cada amostra, assim como, a persistência dos sinais climatológicos. Maiores explicações sobre o procedimento descrito acima, pode ser obtido em Prestes (2009) e Lorensi (2016).

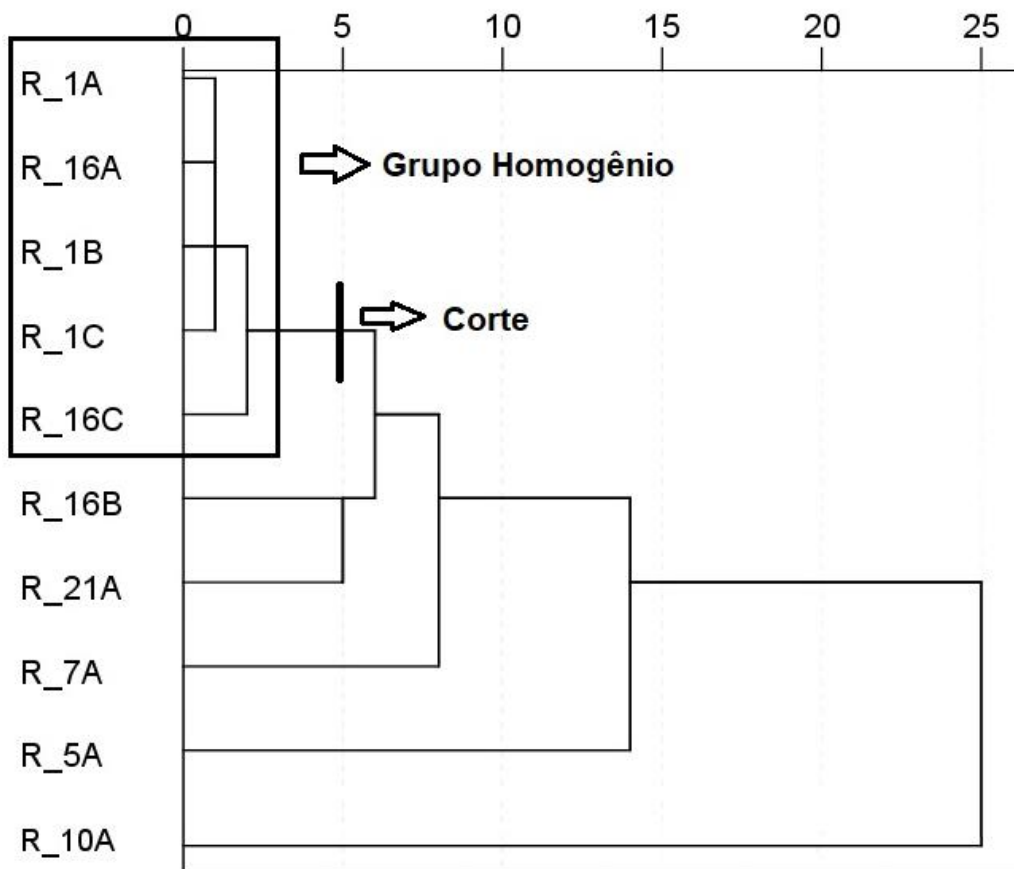
Para verificar e/ou confirmar a qualidade das séries dendrocronológicas obtidas, foi realizada a análise de agrupamento. Para isso, as séries individuais sem as tendências foram divididas em 3 intervalos com o mesmo período de tempo. Isto ocorreu devido às séries terem tamanhos diferentes, por isso foram obtidos três agrupamentos, nos quais o primeiro intervalo foi de 1670 a 1832, utilizando 10 amostras obtidas de 6 árvores; o segundo intervalo foi de 1832 a 1935, contendo 47 amostras obtidas de 17 árvores; e o terceiro período de 1935 a 2011, contendo todas as 64 amostras das 21 árvores.

A seleção dos grupos foi realizada através de uma linha de corte ou linha Fenon na distância euclidiana re-escalada de 5. Segundo Messetti (2007), a determinação da localização da linha de Fenon é feita em função da necessidade do pesquisador, tendo seu valor máximo em 12,5 de distância que é a média Euclidiana (LOPES et al., 2004). Dos dendrogramas obtidos, verificou-se que mais de 95% de todas as amostras, que obtiveram as maiores correlações, foram as que formaram os grupos homogêneos. Assim, pode-se garantir que na construção da série dendrocronológica média do local foram utilizadas as melhores amostras possíveis.

Portanto, a construção da série dendrocronológica do sítio foi realizada após a identificação dos grupos homogêneos em cada dendrograma, obtendo-se a série temporal cobrindo o intervalo de 1446 anos, data da árvore mais longeva, até 2011, ano de formação

do último anel. Nas Figuras 25 a 27, são apresentados os dendrogramas de cada intervalo. Antes de 1670, por haver somente duas amostras a série foi obtida pela média aritmética entre as amostras. Observa-se na Figura 25, o intervalo contendo as árvores mais antigas, que o grupo homogêneo foi formado com os raios das árvores 1 e 16, o que corresponde a 50% das amostras utilizadas para compor o dendrograma.

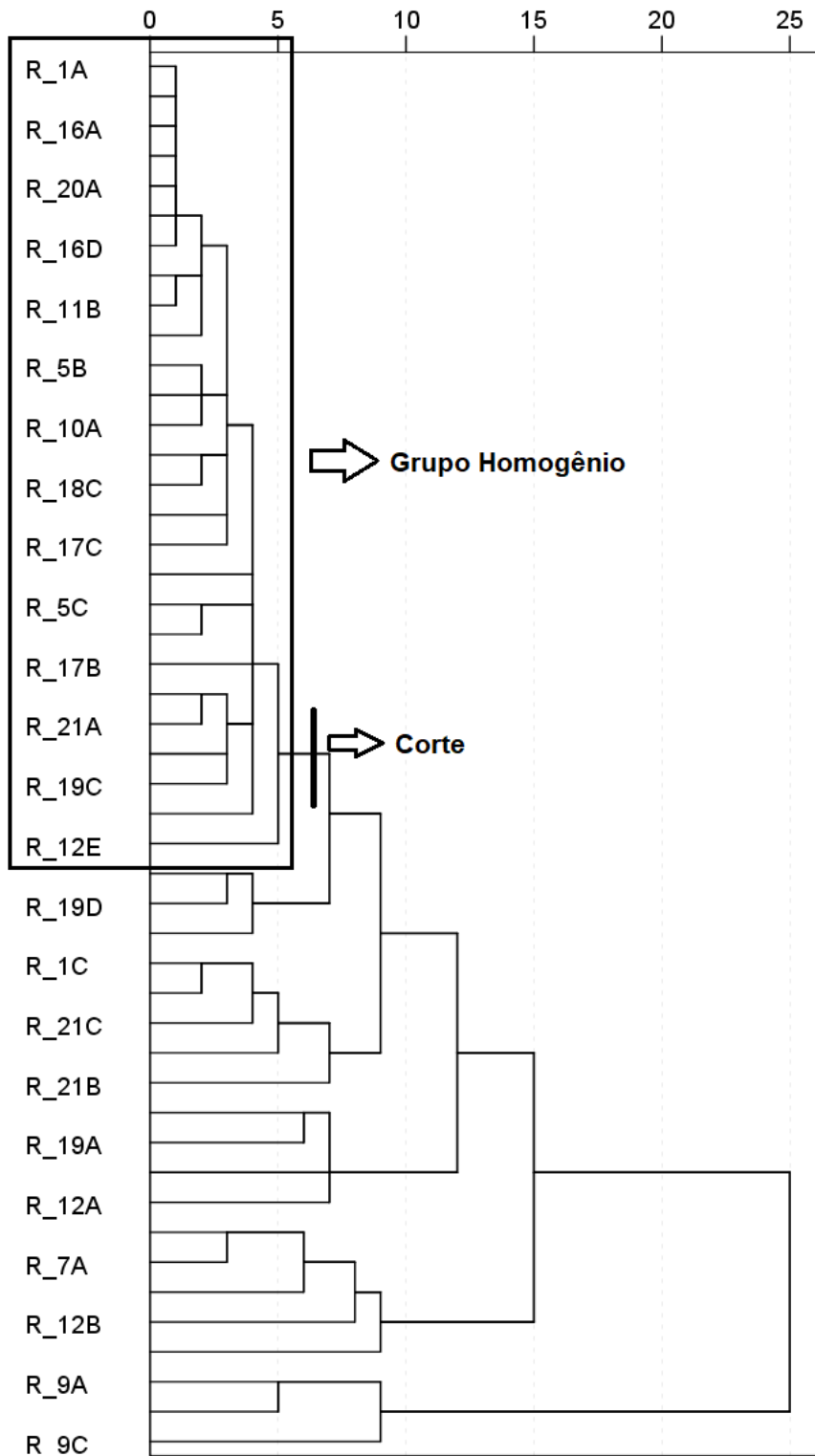
Figura 25 – Dendrograma das séries de anéis de crescimento no período 1670 a 1832 construído com 10 raios obtidos de 6 árvores.



Fonte: Autor, 2016.

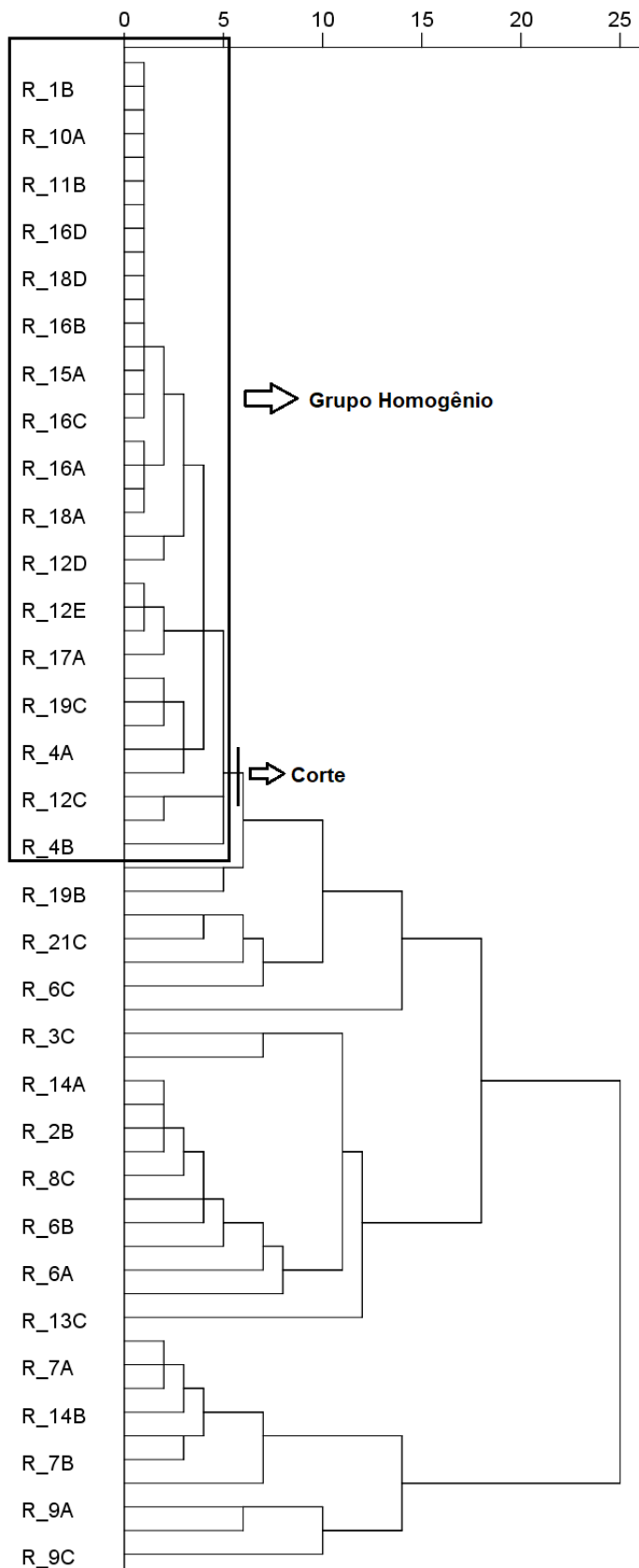
Na Figura 26, para o dendrograma do segundo intervalo, o grupo homogêneo é formado por 27 amostras representando 57% das amostras utilizadas para compor o dendrograma. As árvores selecionadas para compor a série média e que participam de forma completa foram as 10, 11, 13, 16, 18 e 20, e de forma parcial a 1, 5, 7, 12, 17, 19, 21. Enquanto que na Figura 27, terceiro intervalo, pode-se observar que o grupo homogêneo para a construção da série cronológica média foi formado de 34 das 64 amostras totais, com 7 árvores participando com todas suas amostras, 7 participando parcialmente, e 7 completamente excluídas. Nenhuma árvore abaixo de 100 anos foi selecionada para compor o grupo.

Figura 26 – Dendrograma das séries de anéis de crescimento no período 1832 a 1935, construído com 47 amostras obtidas de 16 árvores.



Fonte: Autor, 2016.

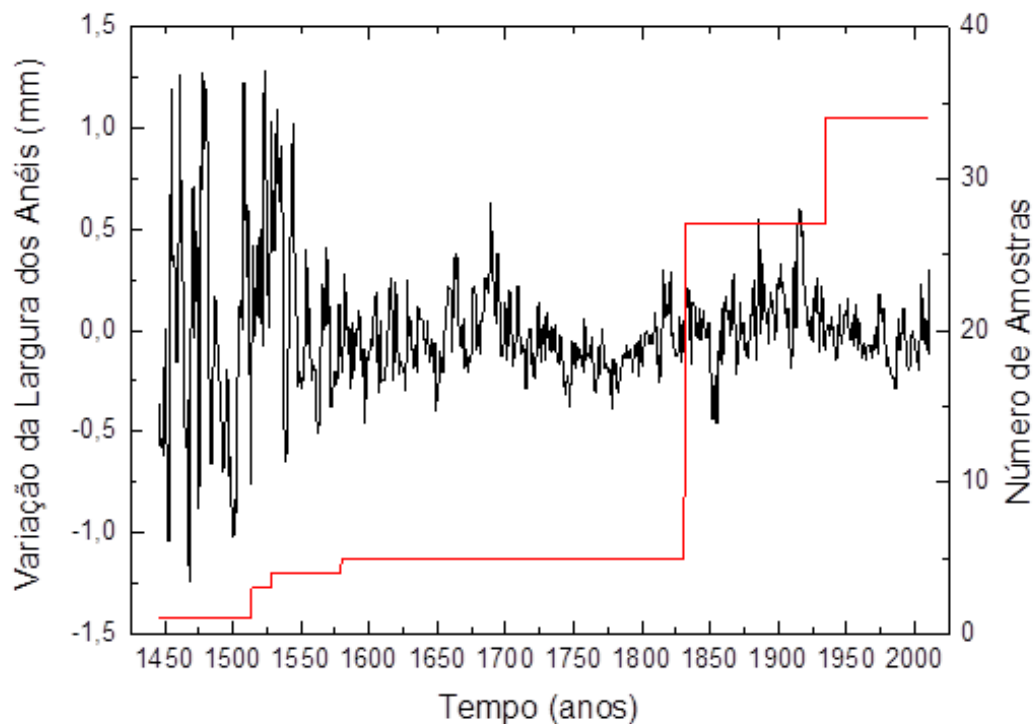
Figura 27 – Dendrograma das séries de anéis de crescimento no período 1935 à 2011, construído com 64 amostras obtidas de 21 árvores.



Fonte: Autor, 2016.

Um comparativo entre os 3 dendrogramas mostra que as séries dendrocronológicas apresentam um comportamento coerente, sendo que das 5 amostras que formaram o grupo homogêneo no primeiro dendrograma, 4 permaneceram nos outros dois dendrogramas, enquanto das 27 amostras agrupadas no segundo dendrograma, 24 permaneceram no terceiro. A partir dos dendrogramas, obteve-se a série dendrocronológica média para o sítio, possivelmente a mais longa série dendrocronológica do Brasil, com 565 anos. A série está apresentada na Figura 28, com o número de amostras envolvidas em cada período selecionado para a construção da série (linha vermelha mostrada na Figura 28).

Figura 28 – Série dendrocronológica (linha preta) e o número de amostras (linha vermelha) do lenho de imbuia utilizadas em sua construção.



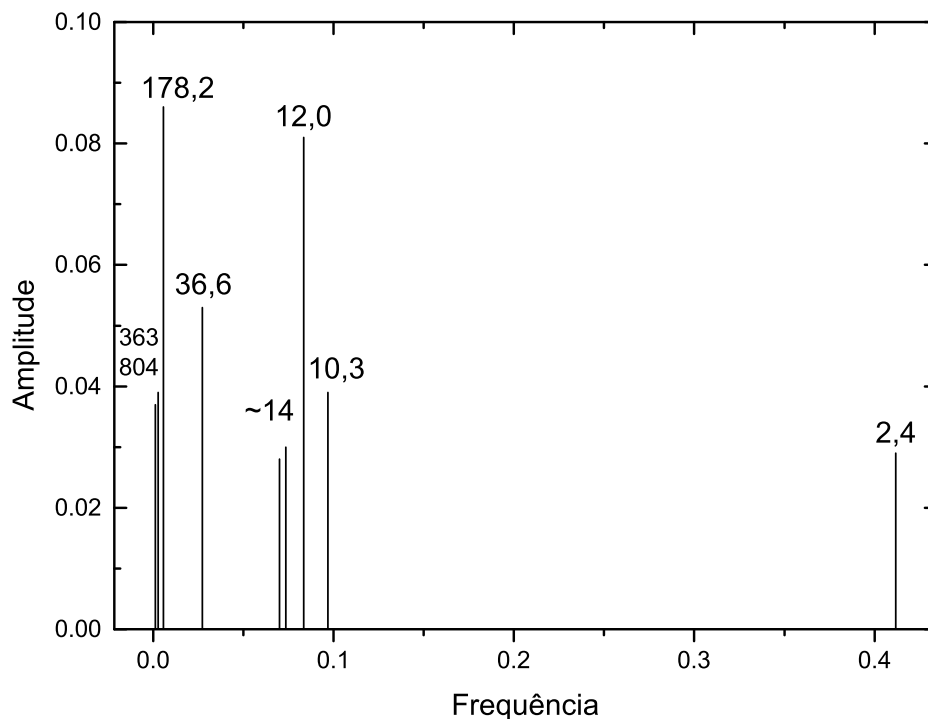
Fonte: Autor, 2016.

4.2 Análise Espectral da Série Dendrocronológica

A análise espectral aplicada na série dendrocronológica indica as periodicidades presentes na série no domínio espaço - tempo. A partir dos períodos encontrados, procura-se as fontes desses períodos, que podem ser de origem atmosféricas, oceânicas, ou geofísicas. A Figura 29 apresenta o espectro da série dendrocronológica média de imbuia de General Carneiro obtido pelo método de regressão iterativa (ARIST). Todos os períodos apresentam nível de significância de 95%.

Os períodos encontrados apresentam periodicidades similares aos apresentados na análise do ENOS (periodicidades entre 2 a 7 anos), ao ciclo de Schwabe de 11 anos (periodicidades entre 8 a 14 anos), ao ciclo climático de Brückner ~35 anos, e aos ciclos solares de ~200 anos (ciclo de Suess), ~400 e ~800 anos (DERGACHEV; RASPOPOV, 2000; RASPOPOV et al., 2001; ECHER, et al., 2003, PRESTES, 2009).

Figura 29 – Espectro da série dendrocronológica média de imbuia de General Carneiro.



Fonte: Autor, 2016.

Raspopov et al., (2001) realizaram análises espectrais da concentração de ^{14}C em uma série de anéis de árvores de 8000 anos e de séries de variações na largura dos anéis de árvores dos hemisférios norte e sul para várias centenas de anos, encontrando variações climáticas de longos períodos correspondendo a oscilações na atividade solar. Os períodos encontrados por eles foram: 2.400, 720, 420, 210, 90, e 22 - 23 anos.

Lorensi (2016), estudando uma série de anéis de crescimento de *Araucaria Angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze obtida na região de General Carneiro, obteve um espectro similar ao encontrado aqui em relação a variabilidade solar. Ela encontrou períodos relacionados ao ciclo de Schwabe: 10,5; 11,2; 11,8; 12,8; e 13,4 anos; ao ciclo de Hale: 23,3, e 27,6 anos; e também, o período relacionado ao ciclo climático de Brückner: 39,7 anos. Além desses, foi encontrado períodos correspondentes ao ciclo de Gleissberg: 66,7

e 85,4 anos, bem como, um período de 30,5 anos que pode ser a combinação do ciclo de Gleissberg e o de Hale.

Segundo Rigozo et al. (2008), é possível avaliar quantitativamente as frequências detectadas (P_i) no sinal, obtendo-se a fração de potência (fP) de cada sinal em relação ao espectro total (soma de todas as potências encontradas) por meio da expressão $fP = \frac{P_i}{\sum P_i}$.

Na Tabela 3, é apresentada a fração de potência de cada sinal de frequência encontrada em relação ao espectro total da série de dendrocronológica de General Carneiro. Pode-se observar que a maior fração de potência está relacionada ao ciclo das manchas solares de 11 anos, com um valor total de 42%. Enquanto que a frequência relacionada ao ciclo climático de Brückner de ~35 anos contribui com 13% para o espectro total. A frequência relacionada ao IOS contribui com apenas 7%.

Tabela 3 – Fração de potência encontrada na largura média das séries de anéis de árvores.

Períodos (anos)	Fração de Potência	Total (%)
806,4	0,04	8,8
362,3	0,04	9,3
178,3	0,09	20
36,6	0,05	13
14,3	0,03	42
13,6	0,03	
12	0,08	
10,3	0,04	
2,4	0,03	7

4.3 Correlações da Série Dendrocronológica com as Séries Geofísicas e Climatológicas

Para averiguar possíveis influências de forçantes geofísicas e climáticas no crescimento dos anéis de árvores, foram utilizadas as seguintes séries: número de manchas solares de 1700 a 2011; anomalias da temperatura do mar nos oceanos Pacífico (representado pela região do Niño 3.4) e Atlântico (representado pela região Equatorial-Sul - IATLS) no qual os dados dos Oceanos compreendem um período de 1854 a 2011; o Índice de Oscilação Sul (IOS) de 1868 a 2011; dados de Precipitação de 1900 à 2010; e da anomalia da temperatura do ar (ATar) de 1948 - 2010.

Em uma primeira análise, foi realizada uma correlação linear de Pearson entre os dados climatológicos, geofísicos e a cronologia dos anéis utilizando as séries limitadas ao tamanho de cada série. Os valores das correlações estão apresentados na Tabela 4, onde os valores estatisticamente significativos estão representados em negrito (teste t).

Tabela 4 – Correlação linear entre os dados climatológicos, geofísicos e a cronologia dos anéis.

Correlações	ATar	IATLS	Niño 3.4	IOS	Anéis	Manchas
Precipitação	0,81	0,46	0,15	-0,30	-0,10	-0,03
ATar	1	0,26	0,03	-0,21	-0,19	-0,08
IATLS		1	-0,13	0,03	-0,13	0,08
Niño 3.4			1	-0,79	-0,04	-0,04
IOS				1	0,09	0,02
Anéis					1	-0,02

Existe uma correlação com significância estatística de 0,81 entre a precipitação e a temperatura do ar, isso significa que existe uma forte relação entre as duas. Considerando os componentes climáticos, observa-se que dos reservatórios aqui analisados, os que mais exercem influências nas variáveis climáticas na região de estudo (precipitação e temperatura) é o oceano Atlântico que possui uma forte influência na precipitação representada através de um valor de correlação de 0,46 e na temperatura de 0,26. O IOS também altera a dinâmica da atmosfera, e verificou-se uma anti correlação de $-0,30$ com a precipitação e de $-0,21$ com a temperatura. Observa-se na [Figura 6](#), série temporal com totais anuais de precipitação, e na [Figura 13](#), série da ATSM do oceano Atlântico Sul, que ambas as séries apresentam uma tendência de aumento a partir da década 1960.

Quando considerada somente a estação chuvosa (primavera - verão, [Figura 7](#)), a correlação entre o Atlântico e a precipitação aumenta para 0,52, enquanto, para o período de menor precipitação (outono – inverno), a correlação diminui para 0,34.

A influência do oceano Atlântico na região sul, possivelmente, se dá por meio dos jatos de baixos níveis da América do Sul (“rios voadores”). A origem dos jatos de baixos níveis está associada aos ventos alísios vindos do oceano Atlântico, que adentram o território brasileiro pela ponta superior da Região Nordeste. Quando estes chegam à Amazônia, absorvem muito vapor d’água liberado pelas folhas da floresta por meio da transpiração. Na fronteira do Estado do Acre com a Bolívia, estes encontram a cordilheira dos Andes. As montanhas aumentam a velocidade de circulação dos jatos e os desviam rumo ao sul. Ao chegar à bacia do Prata, interagem com o relevo e com frentes frias nascidas no pólo Sul, fazendo surgir os Complexos Convectivos de Mesoescala. Esta soma de padrões climáticos dá origem à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A influência dos jatos é mais evidente durante o verão quando a umidade é intensa, entretanto no inverno, estação mais seca, o impacto destes tende a diminuir (BICUDO et al., 2005; RODRIGUES, 2011; MAKARIEVA, et al., 2013).

Os anéis de crescimento mostram valores significativos com a anomalia da temperatura do ar ($-0,19$), com a precipitação ($-0,10$), e com o oceano Atlântico ($-0,13$). Esta anti-correlação com a precipitação e com o Atlântico, pode ser explicada devido à

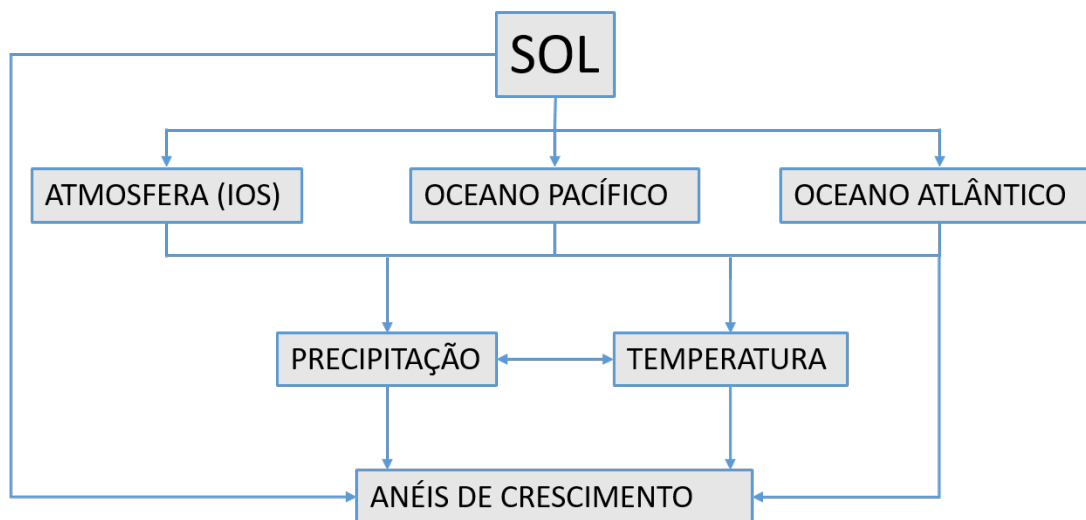
região já apresentar um alto volume pluviométrico, e como, o oceano Atlântico apresenta uma correlação positiva com a precipitação, com mais chuva há um menor crescimento, possivelmente, ligado à intolerância da espécie ao excesso água.

Souza (2013), estudando uma série de anéis de crescimento de araucária obtida na região de Campos do Jordão - SP, encontrou uma correlação negativa com a precipitação na região, o que possivelmente indica que esta espécie é intolerante a excessos de água. Ainda, Ishii (2000) avaliou o ritmo de crescimento de várias espécies do pantanal, e observou que há uma relação de crescimento com a sazonalidade das chuvas, com baixo crescimento no período de seca e de excesso de chuva, o que exemplifica o estresse hídrico nas plantas, semelhante ao encontrado nesse estudo.

4.4 Análises por Cross-Wavelets entre a Séries dendrocronológica/ Climatológica/Geofísicas

Por meio da análise de cross-wavelets, pretende-se determinar melhor as relações entre os componentes climáticos e os elementos do clima para a região da General Carneiro, e a resposta dos anéis de crescimento a essas variáveis (fluxograma da Figura 30). As séries utilizadas foram as mesmas empregadas na análise espectral pelo ARIST.

Figura 30 – Fluxograma das relações entre os componentes climáticos, os elementos e os anéis de crescimento.



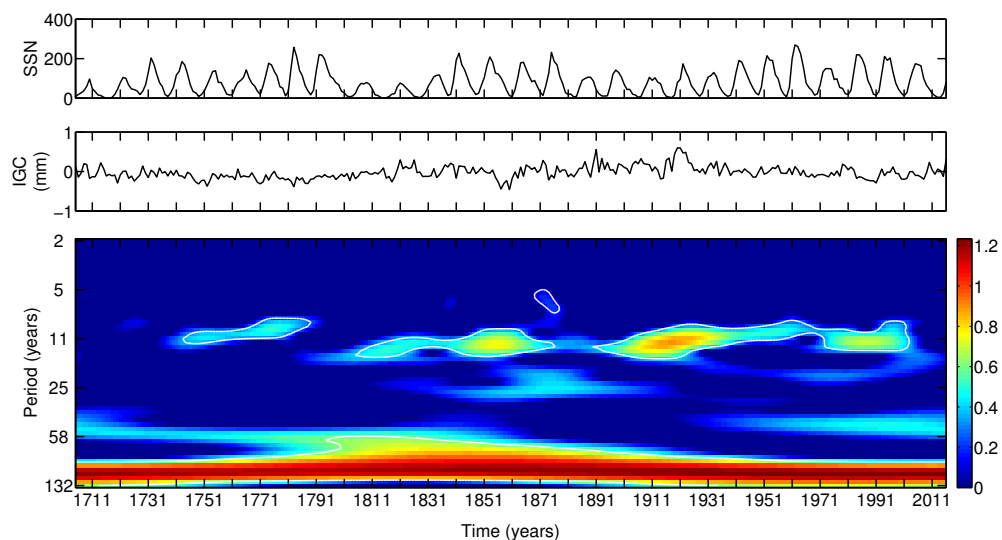
Fonte: Autor, 2016.

Segundo Torrence e Compo (1998), a interpretação dos gráficos de wavelets é: o eixo y representa o período em anos e o eixo x o tempo. A escala de cores indica a intensidade do espectro, ou seja, a amplitude do módulo dos coeficientes wavelet elevado ao quadrado no tempo. As periodicidades que atingiram 95% de significância são indicadas pelas linhas de contorno em branco nas figuras da análise por Cross-Wavelets.

4.5 Cross-Wavelet entre a Série Dendrocronológica com as Manchas Solares

A Figura 31 apresenta o mapa de cross-wavelet entre o número de manchas solares e os anéis de crescimento de imbuia de General Carneiro, entre 1700 e 2011, para os valores de escala representados por períodos entre 2 e 132 anos. Este espectro apresenta duas periodicidades predominantes: uma de ~ 11 anos e outra em torno de 90 - 100 anos. Observa-se que o período de 11 anos é intermitente, isto é, a amplitude e a potência cruzada variam com o tempo. Os intervalos significativos de ocorrência dos períodos em torno de 11 anos no espectro cruzado estão entre: 1735 - 1790, 1800 - 1880 e 1890 - 2005, aproximadamente. Espectro similar foi encontrado por Lorensi (2016) entre o número de manchas solares e a série de anéis de crescimento de araucária obtida na região de General Carneiro.

Figura 31 – Espectro de potência cruzado entre o número de manchas solares e a largura dos anéis de crescimento, com o nível de confiança de 95% (contorno branco).



Fonte: Autor, 2016.

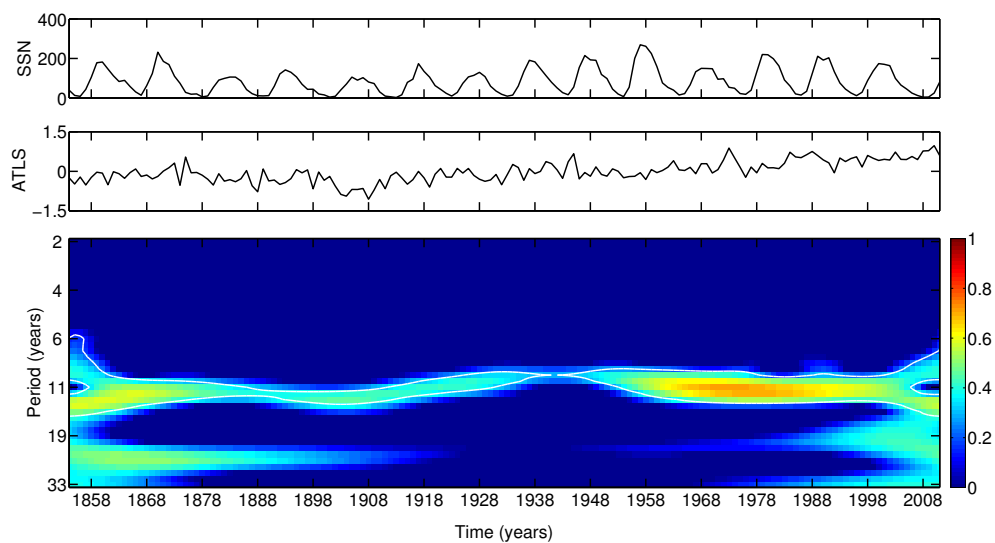
O sinal associado ao ciclo de Gleissberg, que não foi encontrado com significância de 95% na análise pelo ARIST, se mostra contínuo e com intensidade praticamente constante ao longo do tempo na análise wavelet.

Os sinais do ciclo de Schwabe (11 anos) e de Gleissberg, que foram encontrados com alta intensidade em várias séries dendrocronológicas do Sul do Brasil (RIGOZO et al., 2008; PRESTES et al., 2011; LORENSI, 2016; PRESTES et al., 2018), também apresentam aqui alta intensidade.

4.6 A influência solar nas variáveis oceânicas e climatológicas (Efeito de cima para baixo)

Os oceanos possuem um baixo albedo absorvendo em média 94% da radiação de onda curta recebida. A relação da radiação solar com temperatura da superfície dos oceanos são apresentadas nas Figuras 32 e 33, que apresentam os mapas de cross-wavelet entre o número de manchas solar e a ATSM do Atlântico e do Pacífico, respectivamente, para os valores de escala representados por períodos entre 2 e 33 anos. Observa-se uma periodicidade predominante de 11 anos em ambos os mapas, que é contínua para todo o intervalo de 1854 a 2011, com uma variação na amplitude da potência com o tempo. No mapa do Atlântico também observa-se uma periodicidade em torno de 22 anos, mas com significância abaixo de 95%.

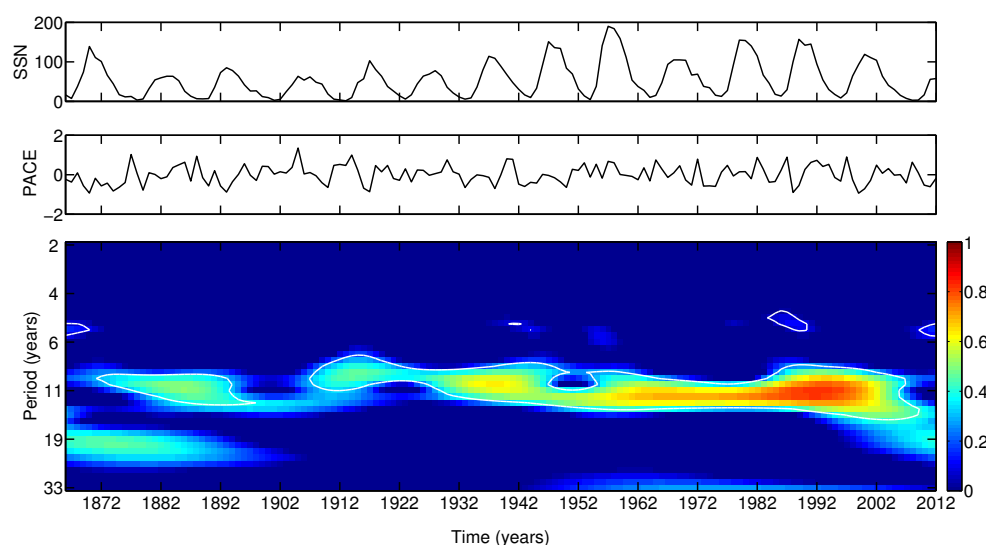
Figura 32 – Espectro de potência cruzado entre o número de manchas solares e a ATSM do Atlântico, com o nível de confiança de 95% (contorno branco).



Fonte: Autor, 2016.

Analisando o comportamento solar em períodos climatológicos de 30 anos observa-se um comportamento semelhante entre o número de manchas solares e o aquecimento da superfície do Atlântico, destaca-se os intervalos de 1901 a 1931 com 1.193 manchas e apenas um ano de ATSM positiva. Para o período de 1961 - 1990 contabilizou-se 2.097 manchas nesse mesmo período o Atlântico teve 26 anos de ATSMs positivas, Isto pode indicar que, com o Sol mais ativo, mais energia é depositada no oceano Atlântico.

Figura 33 – Espectro de potência cruzado entre o número de manchas solar e a ATSM do Pacífico, com o nível de confiança de 95% (contorno branco).



Fonte: Autor, 2016.

Analisando a relação da variabilidade solar com a do Pacífico, pode-se ver que o ciclo de Schwabe está presente em toda a base de dados, sendo mais intenso entre 1927 a 1951 e 1963 a 2011, similar ao registrado pelo Atlântico.

Verifica-se a influência do ciclo solar sobre a TSM em ambos oceanos, concordando com a Yamakawa, Inoue, Suppiah (2016), que sugere que a influência do ciclo solar sobre a troposfera ocorre pela temperatura da superfície do mar e pela estratosfera.

A relação da radiação solar com o IOS é apresentada na Figura 34 para os valores de escala representados por períodos entre 2 e 66 anos. Observa-se uma periodicidade predominante de 11 anos entre 1910 e 2011, similar ao observado no espectro cruzado entre o número de manchas e a ATSM do Pacífico.

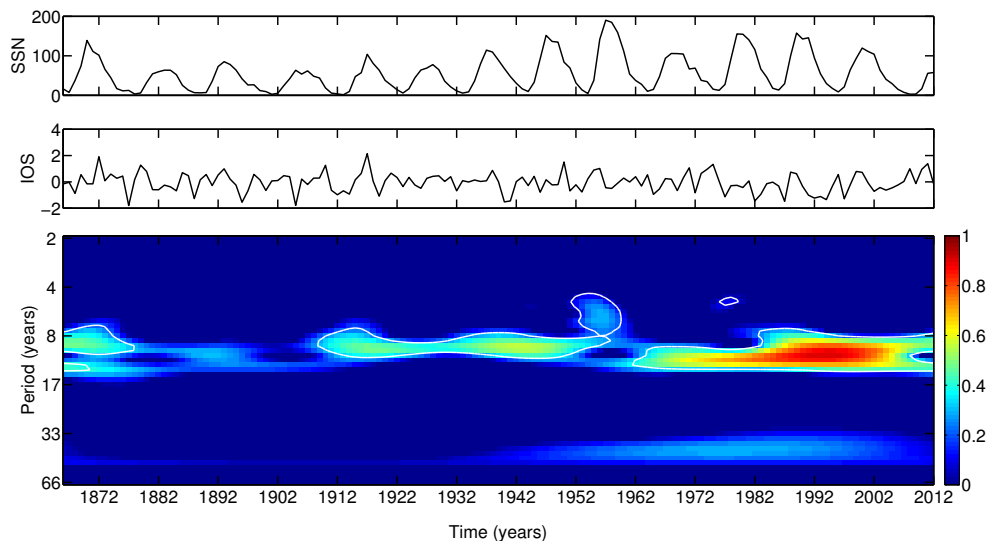
Gray et al. (2010) analisaram o sinal do ciclo solar observado na superfície da Terra por meio dos seguintes mecanismos que envolvem modulação: 1) através da irradiação solar total recebida, e 2) via modulação da parte ultravioleta do espectro solar que influencia a produção de ozônio na estratosfera. Segundo os autores, há evidências crescentes de que a variabilidade associada ao ciclo solar de 11 anos tem impacto na superfície terrestre e influência no tempo e clima. Embora a resposta direta à variabilidade do Sol seja extremamente pequena, foram sugeridos vários mecanismos diferentes que poderiam amplificar o sinal, resultando em sinais regionais que são maiores do que o esperado.

A maneira mais provável pela qual o Sol atua nos oceanos é por meio de variações na absorção direta da irradiância solar total (TSI) pelos oceanos, devido o seu grande calor específico (capacidade térmica), que pode integrar pequenas variações a longo prazo na

entrada de calor. Esta energia irá ser armazenada nos oceanos em até 80 - 100 metros de profundidade, aquecendo a troposfera com uma defasagem de 1 a 2 anos após o máximo do ciclo solar, enquanto o aquecimento da alta troposfera ocorre praticamente em fase com o ciclo solar, sendo que, parte da radiação é absorvida na atmosfera, principalmente pelo vapor de água troposférico em várias bandas de comprimentos de onda e pelo ozônio estratosférico na região do ultravioleta (GRAY et al., 2010). Em alturas estratosféricas a variação em comprimentos de onda do UV chega ~6% em relação ao ciclo solar. Esta região da atmosfera tem o potencial de afetar a troposfera abaixo e assim o clima na superfície terrestre. O efeito direto das variações na irradiância é amplificada por um mecanismo de *feedback* envolvendo a produção de ozônio, que é uma fonte adicional de calor (HAIGH, 1994; GRAY et al., 2010).

Miyahara et al. (2010) relacionou a variação do período do ciclo solar Schwabe/Hale (11-year/22-year) com o comportamento térmico da atmosfera, e observou que em períodos solares mais curtos, em torno de 9 anos, a atmosfera apresentou um maior aquecimento, ao passo que em períodos mais longos de aproximadamente 14 anos, a atmosfera apresentou um resfriamento.

Figura 34 – Espectro de potência cruzado entre o número de manchas solares e o IOS, com o nível de confiança de 95% (contorno branco).

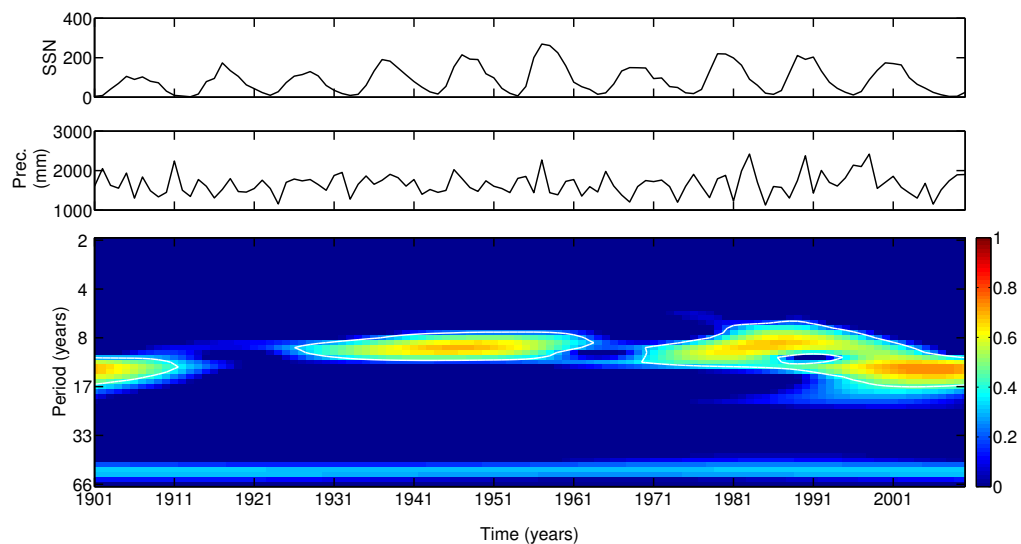


Fonte: Autor, 2016.

A relação entre as variáveis climatológicas e o número de manchas solares são apresentadas nas Figuras 35 e 36. Na Figura 35, é apresentado o mapa de cross-wavelet entre a precipitação e o número de manchas solares. Na Figura 36, é apresentado o mapa entre o número de manchas solares e a anomalia de temperatura do ar na região de General Carneiro. Ambos os mapas para os valores de escala representados por períodos entre 2 e 33 anos. Observa-se a periodicidade predominante de 11 anos em ambos os mapas, no

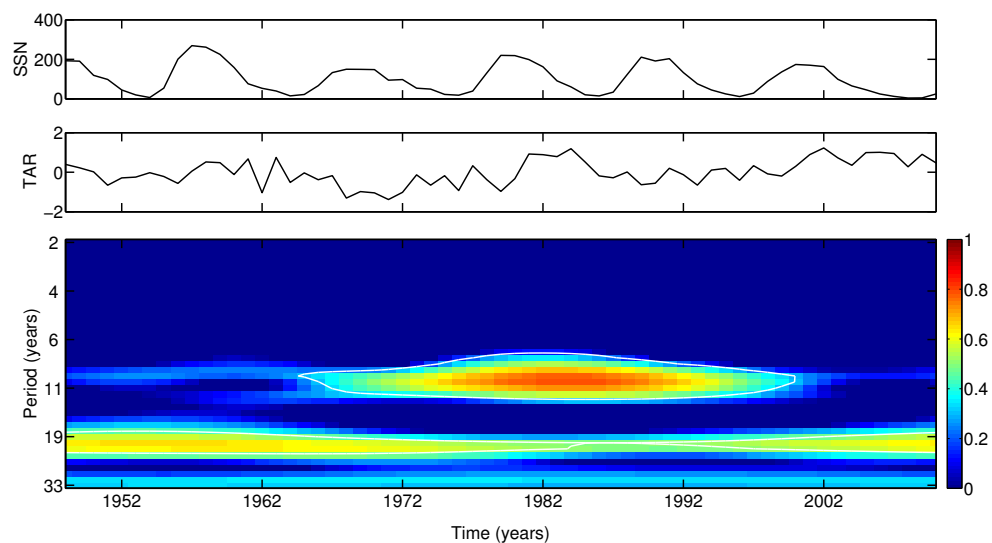
intervalo de 1925 - 1965 e 1970 - 2010 para a precipitação, e no intervalo de 1965 - 2000 para a temperatura. Além disso, no mapa entre o número de manchas solar e a anomalia de temperatura do ar observa-se uma periodicidade de ~ 22 anos ao longo de toda a série.

Figura 35 – Espectro de potência cruzado entre o número de manchas e a precipitação na região, com o nível de confiança de 95% (contorno branco).



Fonte: Autor, 2016.

Figura 36 – Espectro de potência cruzado entre o número de manchas solar e a anomalia da temperatura do ar na região, com o nível de confiança de 95% (contorno branco).



Fonte: Autor, 2016.

Souza Echer et. al. (2008), estudando a série anual total de precipitação de Pelotas-RS (1894 - 1995) e sua relação com as séries temporais do número de manchas solares

(ciclo solar de 11 anos (Rz)) e com número de manchas solares dobrado (ciclo da reversão magnética solar de 22 anos (Rz22)), por meio de cross-wavelet, encontraram que as séries de precipitação e de manchas solares (Rz) apresentaram maior potência cruzada em torno do ciclo solar de 11 anos, mas essa potência é esporadicamente alta e baixa (intervalos significativos: 1905 - 1920, 1935 - 1965 e 1970 - 1995). Por sua vez, o espectro cruzado da precipitação com o número duplo de manchas solares revelou uma alta potência cruzada em torno de 20 - 22 anos, sendo mais persistente em duração (intervalo significativo: 1915 - 1995), em comparação com o período de 11 anos como obtido no presente trabalho.

Souza Echer et al. (2012) estudando a relação da atividade solar na temperatura do ar não encontraram valores significativos para o ciclo de 22 anos atribuindo assim uma maior importância na variação do campo magnético em relação as manchas solares.

Rampelotto et al. (2012) estudaram a variabilidade da precipitação e da temperatura de Santa Maria-RS e suas conexões com as periodicidades da atividade solar de 11 anos e de 22 anos por meio de cross-wavelet. Eles encontraram que a atividade solar e a precipitação apresentaram um sinal de 11 anos nos intervalos de 1930 a 1960 e de 1970 a 2008. Ao passo que, com a temperatura a atividade solar foi significativa no mesmo período de 11 anos entre 1935 e 2008. Com o ciclo de 22 anos, eles encontraram uma correlação intensa e contínua com ambos os parâmetros meteorológicos, no intervalo de ~1925 a 2004, concordando com os valores encontrados por Souza Echer et al. (2012).

Na Tabela 5 são apresentados os intervalos para os quais a atividade solar apresentou interações nos períodos de 11 e 22 anos com as Anomalias de Temperatura dos oceanos Atlântico e Pacífico, o IOS, a precipitação e a Anomalia da Temperatura do Ar. Os intervalos da atividade solar com a precipitação e a temperatura são semelhantes aos encontrados por Souza Echer et al. (2012) e Rampelotto et al. (2012).

Tabela 5 – Intervalos com interações entre atividade solar nos períodos de 11 e 22 anos com as ATSM dos oceanos, IOS, Precipitação e Anomalia da Temperatura do ar.

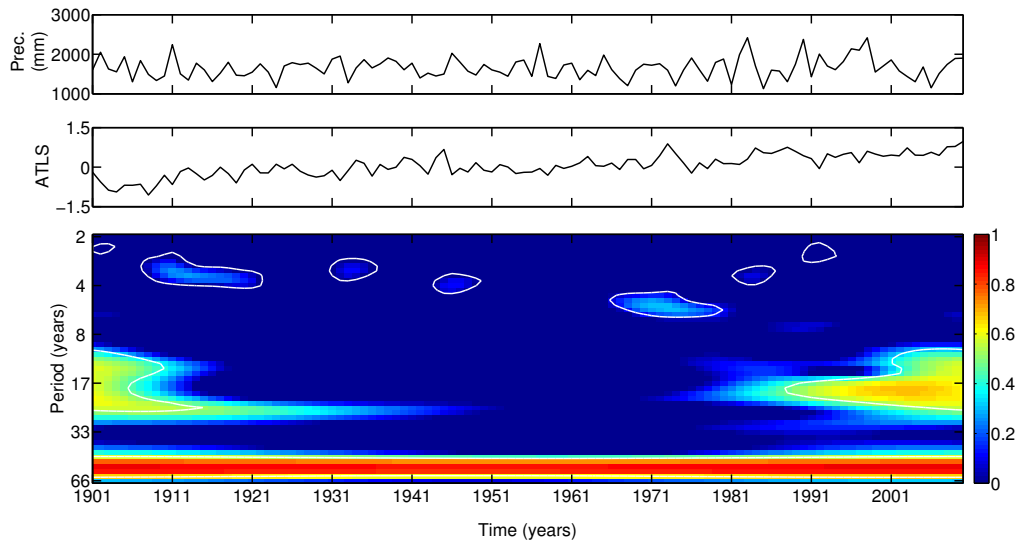
Interações	11 anos	22 anos
Sol/Atlântico	~1854-2011	~1955-1915 e 1980-2011 (significância < 95%)
Sol/Pacífico	~1854-2011	Sem sinal
Sol/IOS	~1910-2011	Sem sinal
Sol/Precipitação	~1925-1965 e 1970-2010	Sem sinal
Sol/Temperatura	~1965-2000	1948-2010

4.7 A influência dos Oceanos sobre o clima (Efeito de baixo para cima)

Os Oceanos absorvem a radiação do Sol em ondas curtas e depois a remitem na forma de ondas longas sendo uma grande fonte de energia para a manutenção da temperatura e umidade na atmosfera terrestre. As Figuras 37 e 38 apresentam os mapas de cross-wavelet entre a ATSM do Atlântico e do Pacífico com a precipitação da região de

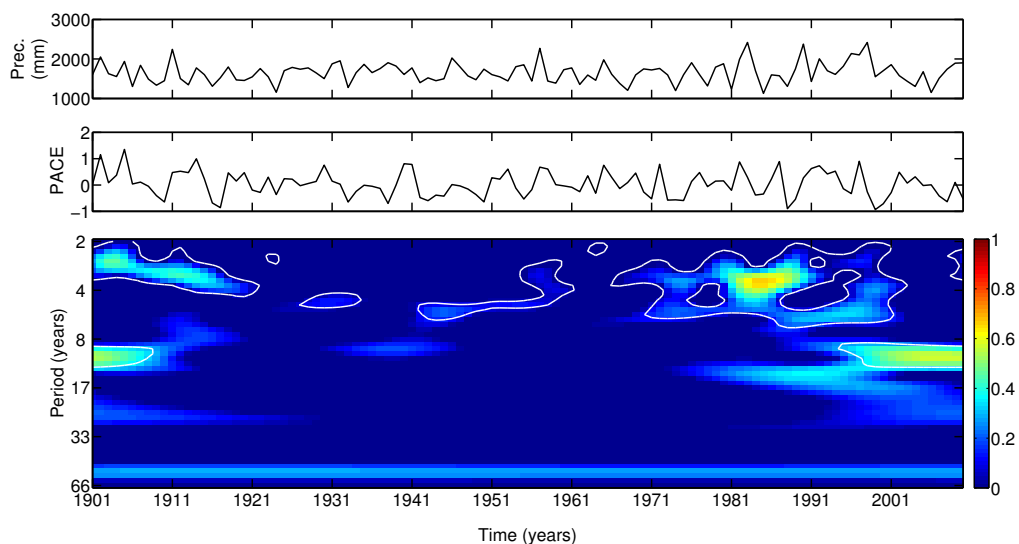
General Carneiro, respectivamente, para os valores de escala representados por períodos entre 2 e 66 anos.

Figura 37 – Espectro de potência cruzado entre a precipitação da região e a ATSM do Atlântico, com o nível de confiança de 95% (contorno branco).



Fonte: Autor, 2016.

Figura 38 – Espectro de potência cruzado entre a precipitação da região e a ATSM do Pacífico, com o nível de confiança de 95% (contorno branco).



Fonte: Autor, 2016.

As regiões de confiança apresentadas são principalmente os períodos esporádicos entre 2 e 7 anos. No espectro de potência cruzado entre a precipitação e a ATSM do Atlântico, observa-se estes períodos significativos nos intervalos de: ~1900 - 1922, 1931

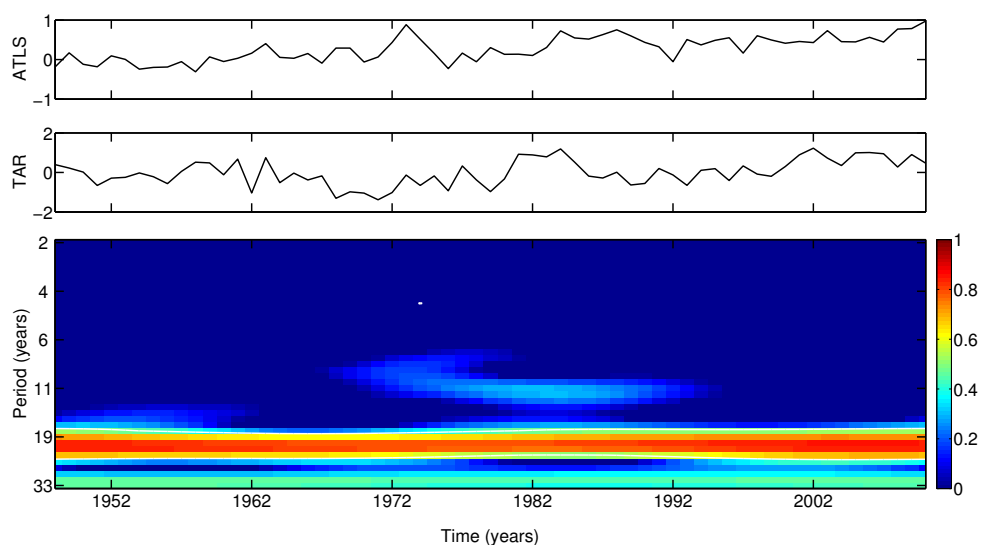
- 1935, 1944 - 1950, 1965 - 1980, 1981 - 1984 e de 1990 - 1994. No espectro entre a precipitação e a ATSM do Pacífico, os períodos significativos se encontram nos intervalos de: ~1901 - 1921, 1926 - 1934, 1941 - 1961 e de ~1965 - 2002, apresentando maiores amplitudes que com o Atlântico, sugerindo uma influência maior do fenômeno El Niño/La Niña na região de General Carneiro.

Souza Echer et. al. (2008), estudando a série anual total de precipitação de Pelotas - RS (1894 - 1995) e sua relação com o ENOS, por meio de análise de cross-wavelet, encontraram a potência cruzada significativa para períodos esporádicos em torno de 2 a 8 anos, para intervalos similares aos encontrados aqui.

Em um estudo da variabilidade da precipitação de Santa Maria - RS e sua conexão com o IOS, também usando análise de cross-wavelet, Rampelotto et al. (2012) encontraram períodos entre 2 e 8 anos nos intervalos de 1912 - 1925, 1935 - 1960, 1960 - 1980 e 1985 - 2005, com variação na amplitude da potência com o tempo. Também encontraram uma periodicidade contínua com alta amplitude em torno de 20 anos, mas com significância abaixo de 95%.

As Figuras 39 e 40 apresentam respectivamente os mapas de cross-wavelet entre a ATSM do Atlântico e do Pacífico, ambos com a anomalia de temperatura do ar da região de General Carneiro para os valores de escala representados por períodos entre 2 e 33 anos. A região de confiança apresentada entre o Atlântico e a temperatura é o período contínuo em torno de 22 anos. Para o Pacífico, observa-se uma região de confiança na banda de 2 a 6 anos nos intervalos de ~1950 - 1955 e 1960 - 2004, além de uma periodicidade em torno de 11 anos no intervalo de 1982 a 1998.

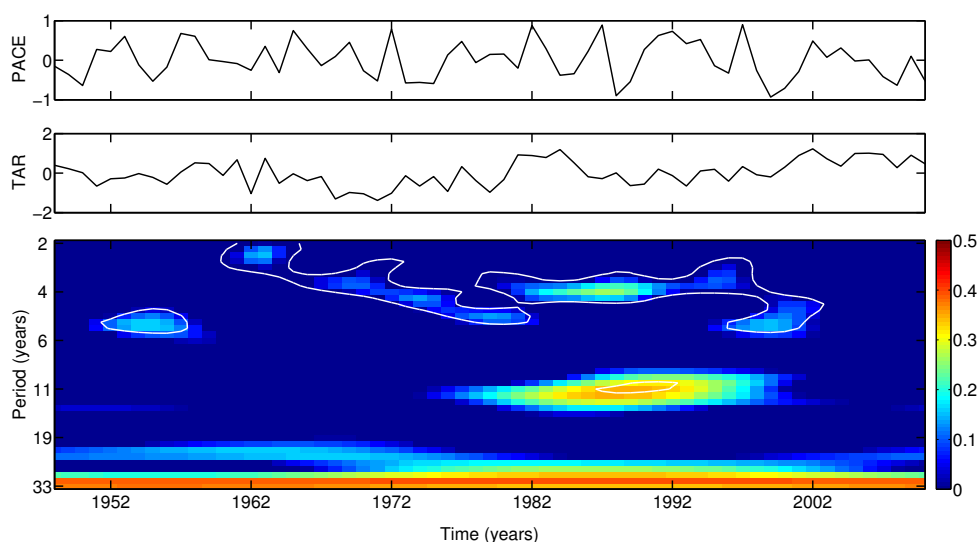
Figura 39 – Espectro de potência cruzado entre a ATSM do Atlântico e a anomalia de temperatura do ar na região, com o nível de confiança de 95% (contorno branco).



Fonte: Autor, 2016.

Rampelotto et al. (2012) encontraram períodos significativos entre 2 e 8 anos entre o IOS e a temperatura de Santa Maria, por meio de cross-wavelet, nos intervalos de 1912 - 1925, 1935 - 1960 e 1972 - 2005, apresentando variação na amplitude da potência com o tempo. Também encontraram uma periodicidade contínua em torno de 12 anos no intervalo de 1980 a 2000, além de um sinal de 19 a 21 anos (não significativo no nível de confiança de 95%), no intervalo de 1950 - 1970.

Figura 40 – Espectro de potência cruzado entre a ATSM do Pacífico e a anomalia de temperatura do ar na região, com o nível de confiança de 95% (contorno branco).



Fonte: Autor, 2016.

4.8 ATSM e IOS e os Anéis de Crescimento

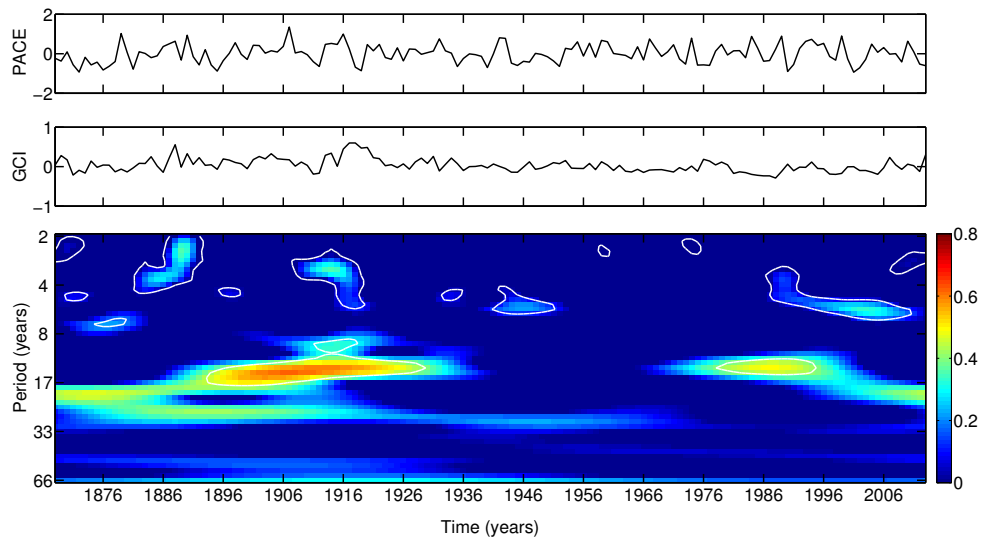
A Figura 41 apresenta o mapa de cross-wavelet entre a ATSM do Pacífico e a série dendrocronológica média de imbuia de General Carneiro, entre 1854 e 2011. Já, a Figura 42 apresenta o mapa de cross-wavelet entre o IOS (componente atmosférica do ENOS) e a série dendrocronológica média, entre 1868 e 2011.

Em ambos os mapas, os valores de escala são representados por períodos na banda de 2 a 66 anos. As principais bandas de confiança são os períodos esporádicos entre 2 e 8 anos e o período de aproximadamente 17 anos. Os períodos com maiores amplitudes entre 2 e 8 anos estão entre os intervalos: de 1880 - 1890, 1906 - 1920, 1940 - 1952 e 1985 - 2010 para a ATSM do Pacífico com a série de anéis, e de ~1868 - 1890, 1904 - 1920 e 1940 - 1950 para o IOS com os anéis. Enquanto que para o período de 17 anos, os intervalos são: 1890 - 1930 e 1970 - 1995 para ambos.

Como esperado, a região de confiança é semelhante para ambos, principalmente na banda de 2 a 8 anos, já que o ENOS se caracteriza por ser um fenômeno de interação oceano-atmosfera em que a componente oceânica está associada às variações de Tempe-

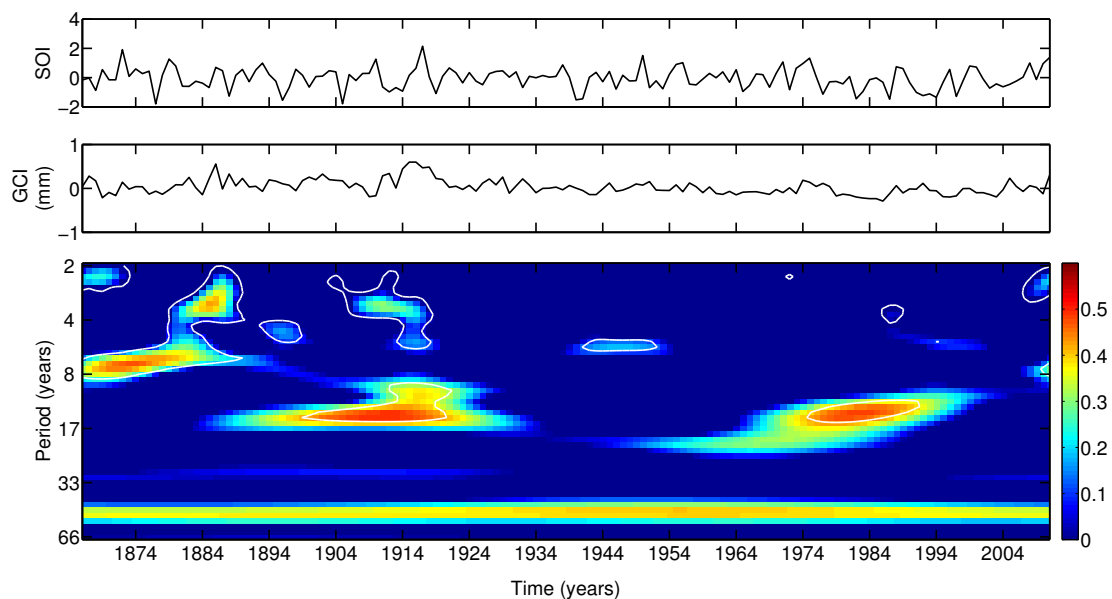
ratura da Superfície do Mar nas águas do Leste do Oceano Pacífico Equatorial. Ao passo que, a componente atmosférica associa-se às grandes variações no sentido Leste-Oeste da massa da atmosfera tropical, entre os oceanos Pacífico Oeste e Índico e o Pacífico Leste (PEIXOTO; OORT, 1992).

Figura 41 – Espectro de potência cruzado entre a ATSM do Pacífico e a largura dos anéis de crescimento, com nível de confiança de 95% (contorno branco).



Fonte: Autor, 2016.

Figura 42 – Espectro de potência cruzado entre o Índice de Oscilação Sul e a largura dos anéis de crescimento, com o nível de confiança de 95% (contorno branco).



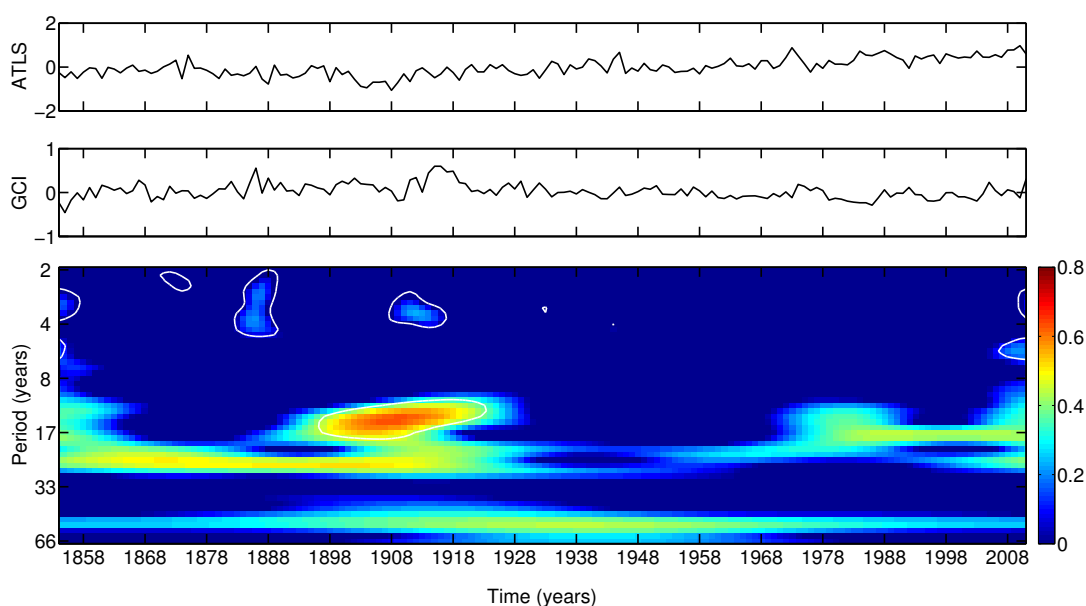
Fonte: Autor, 2016.

Prestes (2009) e Silva (2013), estudando séries dendrocronológicas de araucárias do sul do Brasil, encontraram resultados equivalentes aos encontrados aqui, tanto para os períodos de 2 a 8 anos quanto para o período de 17 anos.

Rodrigues (2011), estudando a influência dos modos de variabilidade oceânica no clima da América do Sul durante o Holoceno médio, encontrou para o clima presente observado, que o ENOS apresenta uma influência positiva no sul do Brasil com tendência a aumento da precipitação em até 2,5 mm por dia, durante o verão.

A Figura 43 apresenta o mapa de cross-wavelet entre a ATSM do Atlântico e a série dendrocronológica média de imbuia de General Carneiro, para valores de escala representados por períodos entre 2 a 66 anos. O espectro apresenta regiões esporádicas de confiança para períodos na banda de 2 a 5 anos nos intervalos de 1880 - 1890 e 1905 - 1915, em torno de 17 anos no intervalo de 1895 - 1925, além de um período com alta intensidade em torno de 22 anos, mas com significância abaixo de 95%, semelhante ao espectro entre a série dendrocronologia com ATSM do Pacífico.

Figura 43 – Espectro de potência cruzado entre a ATSM do Atlântico e a largura dos anéis de crescimento, com o nível de confiança de 95% (contorno branco).



Fonte: Autor, 2016.

Segundo Rodrigues (2011), o Atlântico equatorial (30° S a 30° N) causa aumentos nas temperaturas na região sul de até 0,3 °C durante o verão, e uma diminuição de 0,2 °C durante o inverno em parte da região. Enquanto causa um aumento da precipitação diária da ordem de 1,2 mm durante o verão e o inverno.

Prestes et al. (2018) estudaram a resposta do crescimento de araucárias do sul do Brasil com a variabilidade solar e climática, e encontraram que os períodos de ~17 e

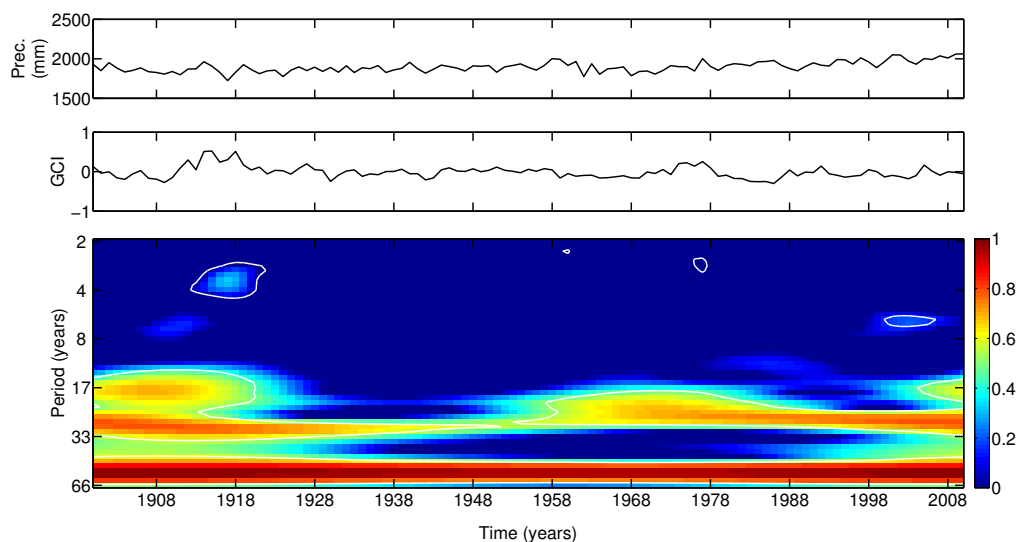
~35 anos podem ser resultado do batimento dos períodos dos ciclos solar de Hale e de Gleissberg, sendo um efeito não linear da atividade solar em processos na atmosfera.

4.9 Cross-Wavelet entre a Série Dendrocronológica com as Séries Climatológicas

O crescimento vegetal está ligado não somente à radiação solar, mas também às condições atmosféricas favoráveis durante o seu desenvolvimento. O estudo da influência atmosférica no desenvolvimento da imbuia foi realizado relacionando-se os anéis de crescimento com as variáveis atmosféricas representadas pelos totais anuais de precipitação e as anomalias anuais da temperatura do ar para a região de General Carneiro.

As Figuras 44 e 45 apresentam os mapas de cross-wavelet entre as séries da precipitação (de 1900 a 2010) e da anomalia da temperatura (de 1948 a 2010), ambas com a série dendrocronológica de General Carneiro para os valores de escala representados por períodos entre 2 e 66 anos para a precipitação, e de 2 a 33 anos para a anomalia da temperatura.

Figura 44 – Espectro de potência cruzado entre a precipitação e a largura dos anéis de crescimento, com nível de confiança de 95% (contorno branco).



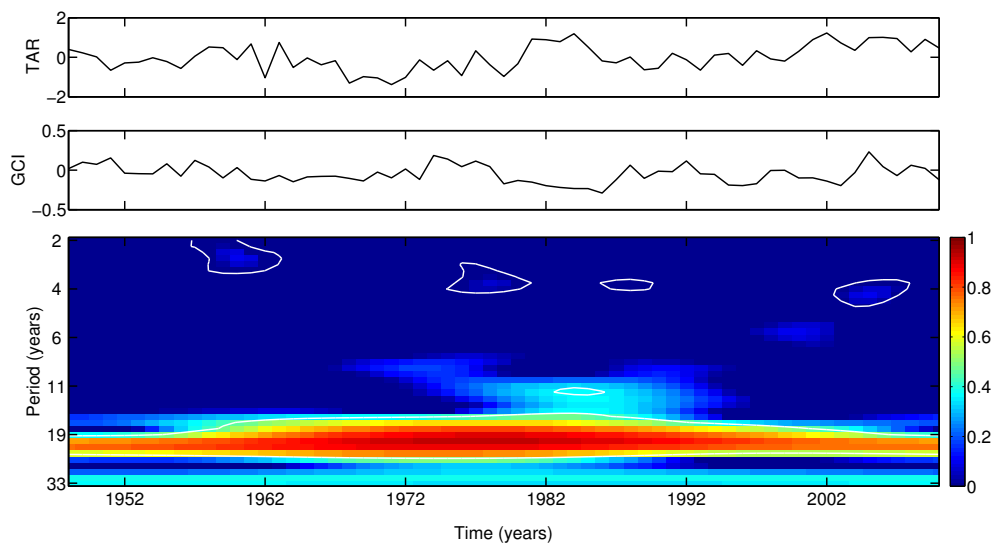
Fonte: Autor, 2016.

As regiões de confiança apresentadas são os períodos esporádicos entre 3 e 5 anos para a precipitação no intervalo de 1912 - 1922, e de 2 - 5 anos com a temperatura nos intervalos de 1955 - 1965, 1975 - 1980, 1986 - 1990 e 2002 - 2008. Principalmente, se observa uma forte correlação no período em torno de 22 anos ao longo de todo intervalo nas Figuras 44 e 45. Este sinal, associado ao ciclo de Hale, não foi encontrado com significância

de 95% na análise pelo ARIST, mas se mostra contínuo e com intensidade praticamente constante ao longo do tempo.

White et al. (1997) encontraram sinais de forçantes solares em escala decadal (período de ~11 anos) e interdecadal (período de ~22 anos) em regiões particulares analisando a temperatura média dos oceanos. Eles encontraram variações com a atividade solar nos oceanos Índico, Pacífico e Atlântico. As mais altas correlações foram encontradas com uma defasagem de 1 - 2 anos entre as temperaturas dos oceanos com a atividade solar, que é aproximadamente a escala de tempo esperada para as camadas superiores do oceano (< 100 m) atingirem o equilíbrio.

Figura 45 – Espectro de potência cruzado entre a anomalia da temperatura do ar na região e a largura dos anéis de crescimento, com nível de confiança de 95% (contorno branco).



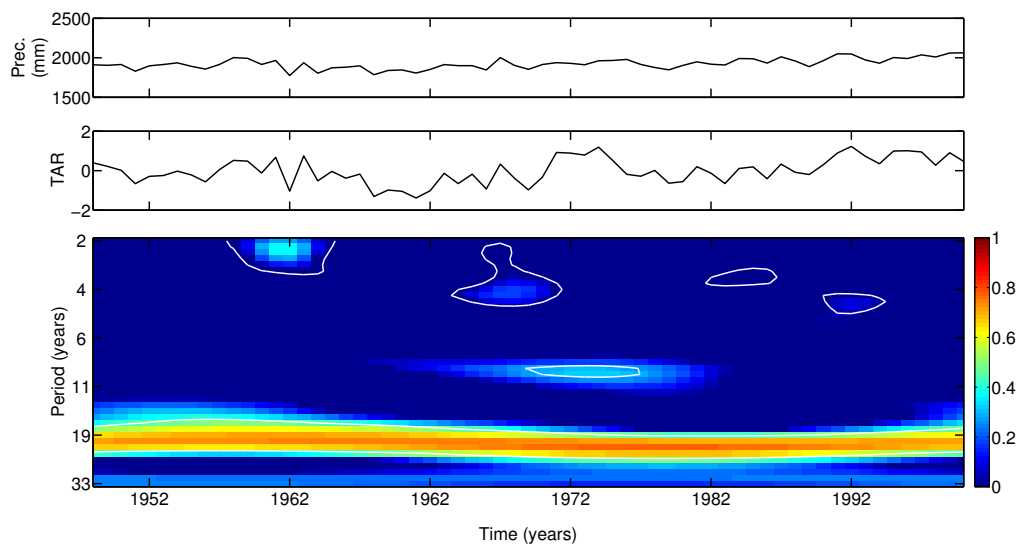
Fonte: Autor, 2016.

No estudo da resposta do crescimento de araucárias do sul do Brasil com a variabilidade solar e climática, Prestes et al. (2018) encontraram períodos entre 2 e 7 anos, que foi relacionado aos fenômenos El Niño e La Niña. Também encontraram um período de ~23 anos relacionado com variações na temperatura, apresentando uma defasagem de 3 anos com a série de anéis de crescimento. Além de ter encontrado os períodos de ~11, ~80 e ~200 anos, relacionados com a atividade solar, bem como o período de ~35 anos, ciclo climático de Brückner, que pode ser uma combinação entre os ciclos de Gleissberg e de Hale, mostrando assim, um efeito não linear da atividade solar no ambiente terrestre.

A Figura 46 apresenta o mapa de cross-wavelet entre a precipitação e a anomalia da temperatura do ar para a região de General Carneiro, de 1948 a 2010, para valores de escala representados por períodos entre 2 a 33 anos. O espectro apresenta regiões esporádicas de confiança para períodos na banda de 2 a 6 anos nos intervalos de ~1960 -

1965, 1974 - 1980, 1992 - 1996 e 2000 - 2005, para o período de ~ 11 anos no intervalo de 1980 - 1988, e principalmente um período com alta intensidade em torno de 22 anos em todo o intervalo. Os intervalos significantes nos espectros cruzados entre a temperatura e a série dendrocronológica são coincidentes com os encontrados aqui. Da correlação entre a precipitação e a temperatura, que apresentou um coeficiente de correlação de 0,81, e do espectro cruzado entre as variáveis, pode-se inferir que a relação se dá principalmente com periodicidade de 22 anos.

Figura 46 – Espectro de potência cruzado entre a precipitação e a anomalia da temperatura do ar na região, com o nível de confiança de 95% (contorno branco).



Fonte: Autor, 2016.

5 CONCLUSÃO

Pode-se dizer que esta tese teve como conclusões que:

1) É possível selecionar os melhores raios de anéis de crescimento dentre as amostras de árvores através do uso de análise de agrupamento. A série dendrocronológica média de General Carneiro foi obtida de 34 amostras de 14 árvores após a verificação do comportamento dos dendrogramas das 64 amostras de um total de 21 árvores. Esta série corresponde ao período dos anos entre 1446 e 2011, sendo esta a série dendrocronológica, possivelmente, a mais longínqua obtida no Brasil com 565 anos. Portanto, o método de análise de agrupamento mostrou ser uma ferramenta bastante útil para a obtenção da série dendrocronológica, especialmente quando aplicada a muitas cronologias, no qual é possível selecionar subamostras de séries, descartar aquelas que não se correlacionam e avaliar o grau de homogeneidade entre os diferentes subconjuntos. Ainda, esta análise confirma que o método aplicado neste estudo e utilizado por Prestes (2009) e Lorensi (2016) na obtenção de séries dendrocronológicas é uma metodologia consistente e com resultados válidos, já que mais 95% de todas as amostras que obtiveram as maiores correlações, foram as que formaram os grupos homogêneos e que foram utilizadas para a obtenção da série dendrocronológica de General Carneiro.

2) A técnica de simetrização foi utilizada aqui pela primeira vez na construção dos escalogramas wavelet a fim de eliminar o COI. Esta técnica mostrou resultados válidos, e é uma contribuição inovadora para a análise espectral de séries dendrocronológicas correlacionadas com parâmetros climáticos e geofísicos.

3) A análise espectral e a cross-wavelet mostraram que:

- Os períodos de 2 - 8 anos encontrados nos anéis de crescimento são provavelmente devido à variabilidade de ATSM do Pacífico, por meio do ENOS, que atua tanto na variabilidade da precipitação quanto na da temperatura.

- Os períodos em torno de 11 anos encontrados nos anéis de crescimento podem ser devido à variabilidade solar que atua tanto diretamente, quanto através da influência na temperatura e na precipitação.

- O período de ~17 anos entre a ATSM do Pacífico e Atlântico com a série dendrocronológica pode ser resultado do batimento dos períodos dos ciclos solar de Hale e de Gleissberg, sendo um efeito não linear da atividade solar em processos na atmosfera.

- O período de ~22 anos encontrado na série dendrocronológica está relacionado principalmente a variação de temperatura, e conseqüentemente, a precipitação devido à alta correlação entre ambas, que provavelmente tem sua origem no oceano Atlântico.

- Os períodos de ~200, ~360 e ~800 anos encontrados na série dendrocronológica pelo ARIST, e o período de ~90 anos encontrado no espectro cruzado entre o número de manchas solar e a série dendrocronológica são possivelmente de origem solar.

4) Em relação ao crescimento dos anéis de árvores com o clima local, tendo como base o estudo da precipitação e da temperatura pode-se dizer a cross-correlação apresenta um periodicidade de 22 anos associado ao ciclo de Hale ao longo de todo o período de análise, e periodicidades intermitentes entre 2 e 7 anos semelhantes aos ciclos atmosféricos do ENOS.

5) O regime da precipitação na região possui valores com baixa variabilidade anual, oscilando entre $\pm 10\%$ do valor da média. Considerando a evolução da série anual, tem-se um aumento na segunda metade do século, que é coerente com o aumento das manchas solar e o aumento de ATSM dos oceanos, principalmente em relação ao oceano Atlântico. A distribuição mensal da precipitação também ocorre de forma regular, com a média climatológica mensal oscilando entre 111 mm e 163 mm, o que indica estações preferencialmente mais secas (outono-inverno) e preferencialmente mais chuvosas (primavera-verão).

6) O comportamento térmico apresenta um papel importante na caracterização do clima da região de General Carneiro devido às maiores variabilidades encontradas em regiões de latitudes médias. A amplitude térmica anual oscilou entre $16,5^{\circ}\text{C}$ e $19,1^{\circ}\text{C}$ de 1948 a 2010. Já, a média das temperaturas anuais de 1948 a 1976 de $17,6^{\circ}\text{C}$, enquanto que de 1977 a 2010, média foi de $18,2^{\circ}\text{C}$. A média para as estações frias (outono-inverno) foi de $13,7^{\circ}\text{C}$ e para as estações quentes (primavera-verão) de $19,2^{\circ}\text{C}$. Pode-se observar que a amplitude térmica possui uma maior variabilidade do que a distribuição da precipitação, sugerindo uma maior dependência do crescimento das árvores em relação à temperatura.

7) Os oceanos possuem um baixo albedo, portanto acabam captando grande parte da energia recebida do Sol. Devido a esse aspecto é esperado que as variabilidades solares estejam refletidas nas TSM. Nesta tese, verificou-se que existem correlações significativas em relação ao número de manchas solar e as ATSM do Atlântico, uma vez que a cross-wavelet mostrou uma periodicidade de 11 anos ao longo de todo o período de análise. Esta correlação foi intensificada na segunda metade do século 21. O ciclo de 22 anos também encontrado ao longo de todo o período de análise, porém de forma menos intensa. Para o oceano Pacífico, foi também encontrada uma periodicidade referente ao ciclo solar de 11 anos, enquanto periodicidades 2 a 7 anos apareceram de forma intermitente.

8) As correlações das ATSM dos oceanos com a temperatura do ar e a precipitação ocorrem de forma semelhante, tendo periodicidades significativos de 11 e 22 anos ao longo de toda a série, e tendo ciclos menores esporádicos de 2 a 7 anos.

5.1 **Trabalhos Futuros**

Será feito um levantamento de novos locais em regiões do Brasil onde pretende-se realizar coletas de amostras de outras espécies de árvores. Serão determinados os locais onde se realizarão pesquisas de campo no Brasil, bem como os contatos com as prefeituras dos municípios selecionados, a fim de agendar as datas e os auxílios que as prefeituras poderão prestar para a realização das coletas de amostras. Para a obtenção das amostras, quando pertinente, será adquirida a permissão do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA, órgão Federal que legalmente concede essas licenças. Também será feito um levantamento de dados meteorológicos dos locais de coletas, no qual serão utilizados posteriormente nas análises e interpretação dos resultados.

Após, será obtida as séries dendrocronológicas das novas amostras e serão feitas correlações mensais, sazonais e semestrais com variáveis climáticas a fim de reconstruir os padrões climáticos passados da região, o que não foi abordado aqui.

REFERÊNCIAS

- ACEITUNO, P. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I: Surface climate. **Weather Review**, v. 116, n. 3, p. 505-524, 1988.
- ALVES, P. A. et al. Caracterização da Forte Onda de calor de 2014 em Santa Catarina. **Ciência e Natura**, v. 38, n. 1, 2016.
- ANDRADE, K. M. **Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, INPE-14056-TDI/1067, 2005.
- ARAÚJO, L. C. **Memória sobre o clima do Rio Grande do Sul**. Ministério da Agricultura, Indústria e Comércio, Diretoria de Meteorologia, Rio de Janeiro, 1930.
- AYOADE, J. O. **Introdução à Climatologia para os Trópicos**. Bertrand-Brasil. Rio de Janeiro. Brasil, 1988.
- BABUSHKINA, E. A. et al. The effect of individual genetic heterozygosity on general homeostasis, heterosis and resilience in Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.) using dendrochronology and microsatellite loci genotyping. **Dendrochronologia**, v. 38, p. 26-37, 2016.
- BEVINGTON, P. R. **Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences**, McGraw-Hill, New York, 1969.
- BERRÊDO, V. D. **Vulnerabilidade de biomas às mudanças climáticas: o caso da Mata Atlântica no estado do Paraná**. Tese de doutorado. UFRJ/COOPE. Programa de Planejamento Energético, 2015.
- BHALME, et al. Tropical quasi-biennial oscillation of the 10 mb wind and Indian monsoon rainfall implication for forecasting. **Journal of Climatology**. v.7, p. 345-353, 1987.
- BICUDO, F. et al. O mapa dos ventos. **Pesquisa FAPESP**, n. 114, p. 48, 2005.
- BOTOSSO, C. P.; MATTOS, P. P. **Conhecer a idade das árvores: importância e aplicação**. [S.l.]: Embrapa Florestas, 2002.
- BROWING, K. A. Conceptual models of precipitation systems. **Meteorological Magazine**. v. 114, n. 1359, p. 293-319, 1985.
- BRYSON, R. A.; DUTTON, J. A. Some aspects of the variance spectra of tree rings and varves. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 95, n. 1, p. 580-604, 1961.
- BUENO, Y. M.; AGUIAR, D. R. Determinantes do grau de envolvimento na exportadora e suas implicações nas exportações brasileiras de carne de frigidadeango. **Gestão e Produção**, v. 11, n. 2, p. 211-220, 2004.

- CAMARGO, R. et al. Modulation mechanisms of marine atmospheric boundary layer at the Brazil-Malvinas Confluence region. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 118, n. 12, p. 6266-6280, 2013.
- CAMPBELL, R. et al. Blue intensity in *Pinus sylvestris* tree-rings: developing a new palaeoclimate proxy. **The Holocene**, v. 17, n. 6, p. 821-828, 2007.
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras: Embrapa Informação Tecnológica**; Colombo: Embrapa Florestas. v. 1, 2003.
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira**. Colombo: EMBRAPA. 1994.
- CAVALCANTI, I. F. A. **Casos de intensa precipitação nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil no período de inverno de 1979 a 1983**. São José dos Campos: INPE, 1985.
- CLIMATE EXPLORER disponível em: <<https://climexp.knmi.nl/start.cgi?id=someone@somewhere>>. Acesso em: 10 mar.2016.
- COELHO, C. A. S. et al. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics**, p. 1-16, 2015.
- COOK, E. R.; KAIRIUKSTIS, L. A. (Ed.). **Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences**. Springer Science & Business Media, 2013.
- COSMO, N. L. et al. Morfologia do fruto, da semente e morfo-anatomia da plântula de *Vitex megapotamica* (Spreng.) Moldenke (Lamiaceae). **Acta Botanica Brasilica**, v. 23, p. 389-397, 2009.
- COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. São Paulo, Editora Edgard Blucher, 1977.
- DEGOLA, T. S. D. **Impactos e Variabilidade do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul sobre o Brasil no Clima Presente e em Cenários Futuros**. Dissertação (dissertação de Mestrado) – Universidade de São Paulo. 2013.
- DERGACHEV, V. A.; RASPOPOV, O. M. Long-term processes on the Sun controlling trends in the solar irradiance and the Earth's surface temperature. **Geomagnetism and Aeronomy C/C of Geomagnetizm i Aeronomia**, v. 40, n. 3, p. 279-283, 2000.
- DIAZ, A. F. et al. Relationship between precipitation anomalies in Uruguay and southern Brazil and sea surface temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. **Journal of Climate**, v. 11, p. 251-271, 1998.
- DITTBERNER, M. R. **Causas e Efeitos das Turbulências nas Operações Aéreas do Aeroporto Internacional Hercílio Luz**. Monografia (Monografia de Graduação). Departamento de Geografia- UFSC. 2001.
- DOUGLASS, A. E. Dating our prehistoric ruins: how growth rings in trees aid in the establishing the relative ages of the ruined pueblos of the southwest. **Natural History**

v. 21. p 27-30, 1921.

ECHER, E. et al. Sunspot number, solar activity index. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, n. 2, p. 157-163, 2003.

FLOWER, A; SMITH, D. J. A dendroclimatic reconstruction of June-July mean temperature in the northern Canadian Rocky Mountains. **Dendrochronologia**, v. 29, p. 55-63, 2010.

FRITTS, H. C. **Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data**. Arizona: The University of Arizona Press, 1991.

FRITTS, H. C. *Tree rings and Climate*. [S.l.]: London: Academic Press, 1976.

FYE, F. K.; CLEAVELAND, M. K. Paleoclimatic analyses of tree-ring reconstructed summer drought in the United States, 1700-1978. **Tree-Ring Research**, v. 57, n.1, p.31-34, 2001.

GARCÍA-GONZÁLEZ, I. Comparison of different distance measures for cluster analysis of tree-ring series. **Tree-Ring Research**, v. 64, n. 1, p. 27-37, 2008.

GARCÍA-GONZÁLEZ, I.; FONTI, P. Ensuring a representative sample of earlywood vessels for dendroecological studies: an example from two ring-porous species. **Trees**, v. 22, n. 2, p. 237-244, 2008.

GASQUEZ, M.; MAGALHÃES, A. R. Climate anomalies and their impacts in Brazil during the 1982-1983 ENSO event. **The societal impacts associated**. C. 5, p 30-36, 1987.

GONÇALVES, G. V. Dendrocronologia: princípios teóricos, problemas práticos e aplicabilidade. **CIDEHUS - Universidade de Évora**. v 23. p. 2012-228, 2007.

GRAY, L. J. et al. Solar influences on climate. **Reviews of Geophysics**, v. 48, n. 4, 2010.

GRIMM, A. M. et al. Influência de Fases Extremas da Oscilação Sul Sobre a Intensidade e Frequência das Chuvas no Sul do Brasil. **Congresso Brasileiro de Meteorologia** v. 11, 2000.

GRIMM, A. M. et al. Precipitation anomalies in southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. **Journal Climate**, v. 11, p. 2863-2880, 1998.

GRIMM, A. M.; FEUSER, V. R. Relações entre temperaturas da superfície do mar sobre o Atlântico e precipitação no sul e sudeste do Brasil. **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 1998.

GUEDES, R. L. et al. The observed synoptic scale structure in the presence of the mesoscale convective complexes over South America. **2º Meeting of Brasil-USA Cooperative Program on the Role of Convection in the Amazon region**, São José dos

Campos, SP, Brasil, 1985.

HAIGH, J. D. The role of stratospheric ozone in modulating the solar radiative forcing of climate. **Nature**, v. 370, n. 6490, p. 544, 1994.

HIERA, M. D. S.; EDVARD E. A. V. As chuvas de junho e a primeira onda de frio intenso de 2013: A atuação dos sistemas atmosféricos e o ritmo climático para a região de Maringá. Geoinfó: **Revista do Programa de PósGraduação em Geografia**, v. 6, n. 1, p. 78-94, 2014.

HOLTON, J. R. **The quasi-biennial oscillations in the Earth's atmosphere and it's link to longer period variability. The solar engine and its influence on terrestrial atmosphere and climate.** Springer Berlin Heidelberg. p. 259-273, 1994.

HOLTON, J. R.; AUSTIN, J. The influence of the equatorial QBO on sudden stratospheric warmings. **Journal of the atmospheric sciences**, v. 48, n. 4, p. 607-618, 1991.

HOYT, D. V.; SCHATTEN, K. H. **The Role fo Sun in Climate Change.** Oxford University Press, 1997.

HUGHES, M. K.; SWETNAM, T. W.; DIAZ, H. F. **Dendroclimatology, Progress and Prospects.** Vol. 11. Springer Science & Business Media, 2011.

IAPAR, Paraná Secretaria da Agricultura e do Abastecimento. **Cartas climáticas do Paraná**, 2000. Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=597>>. Acesso em 21 fev. 2016.

IBGE. **Mapa de Biomas do Brasil.** Rio de Janeiro: IBGE 2004. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/vegetacao/mapas/brasil/vegetacao.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2016.

INMET. **Normais Climatológicas 1931/1990.** Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 9 fev. 2015.

IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change]. **Climate change – The IPCC scientific assessment.** Cambridge: Cambridge University, 288 p, 1995.

ISHII, I. H. **Estudos dendrocronológicos em matas ciliares do pantanal.** In: Coletânea de Seminários Técnicos do CPA-PANTANAL, 1996/1997. Corumbá, MS. Embrapa Pantanal. Doc. 23, p. 43-44, Out., 2000.

KAROLY, D. (Ed.). **Meteorology of the Southern Hemisphere.** Springer, 2015.

KAYANO, M. T.; CAPISTRANO, V. B. How the Atlantic multidecadal oscillation (AMO) modifies the ENSO influence on the South American rainfall. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 1, p. 162-178, 2014.

Kivelson, M. G. and Russell, C. T.: **Introduction to Space Physics**, Cambridge University Press, 588 pp. 1995.

- KLEIN, R. M. Importância prática da fitossociologia para a silvicultura brasileira. **Anais do I Simpósio de reflorestamento da região da araucária**, Curitiba, Brasil, p. 1-61, 1963.
- KOPROWSKI, M.; ZIELSKI, A. Dendrochronology of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) from two range centres in lowland Poland. **Trees**, v. 20, n. 3, p. 383-390, 2006.
- KOUSKY, V. E.; CAVALCANTI, I. F. A. Eventos Oscilação Sul - El Niño: características, evolução e anomalias de precipitação. **Revista Ciência e Cultura**. p. 1888-1889, 1984.
- LEAL, P. C. **Sistema Praial Moçambique – Barra da Lagoa – Ilha de Santa Catarina – Brasil: Aspectos Morfológicos, Morfodinâmicos, Sedimentológicos e Ambientais**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.
- LIMA, V. C.; LIMA, M. R.; MELO, V. F. **Conhecendo os principais solos do Paraná: abordagem para professores do ensino fundamental e médio**. Curitiba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Estadual do Paraná, 2012.
- LOPES, M. C. et al. Agrupamento de árvores matrizes de *Eucalyptus grandis* em função das variáveis dendrométricas e das características tecnológicas da madeira. **Ciência Florestal**, v. 14, n. 2, p. 133-144, 2004.
- LORENSI, C. **Resposta dos anéis de crescimento de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze da região sul do Brasil aos forçantes geofísicos e climáticos**. Universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP, Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, 2016.
- LORENSI, C.; PRESTES, A. Dendroclimatological Reconstruction of Spring-Summer Precipitation for Fazenda Rio Grande, PR, With Samples of *Araucaria Angustifolia* (Bertol.) Kuntze. **Revista Árvore**, v. 40, n. 2, p. 347-354, 2016.
- MAACK, R. **Geografia física do Estado do Paraná**. 3.ed. Curitiba: Imprensa oficial, 2002.
- MAKARIEVA, A. M. et al. Where do winds come from? A new theory on how water vapor condensation influences atmospheric pressure and dynamics. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 13, n. 2, p. 1039-1056, 2013.
- MARCHESAN, R. et al. **Caracterização Física, Química e Anatômica da Madeira de *Ocotea porosa* (Nees & C. Mart.) Barroso**. Embrapa Florestas. Comunicado Técnico 161. ISSN 1517-5030 Colombo, PR, 2006.
- MESSETTI, A. V. L. **Utilização de técnicas multivariadas na avaliação da divergência genética de populações de girassol (*Helianthus annuus* L.)**. Dissertação (Tese de Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, 2007.

MIYAHARA, H. et al. Is the sun heading for another Maunder minimum? Precursors of the Grand solar minima. **J. Cosmol**, v. 8, p. 1970-1982, 2010.

MOURA, P. C. **Construindo o futuro: o impacto global do novo paradigma**. Mauad Ed. Ltda, 1994.

MURPHY, J. O. Australian tree ring chronologies a proxy data for solar variability. **ASA**, v. 8, p. 292-297, 1990.

NEELIN, D. J.; LATIF, M. El Nino Dynamics. **Physics Today**, v. 51, n. 12, p. 32-36, 1998.

NEIRA, E.; LARA, A. Desarrollo de cronologías de ancho de anillos para alerce (Fitzroya cupressoides) en Contao y Mirador, Chile. **Revista chilena de historia natural**, v. 73, n. 4, p. 693-703, 2000.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro, IBGE, 1989.

NORDEMANN, D. J. R.; RIGOZO, N. R.; FARIA, H. H. Solar activity and El-Niño signals observed in Brazil and Chile tree ring records. **Advances in Space Research**. v.35, n. 5, p. 891-896, 2005.

OLIVEIRA, A. S. **Interações entre sistemas na América do Sul e convecção na Amazônia**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1986.

OLIVEIRA, G. S. **O El Niño e você: o fenômeno climático**. Transtec Editorial, São José dos Campos, Brasil. 2001.

PALERMO, G. P. M.; LATORRACA, J. V. F.; ABREU, H. S. Métodos e técnicas de diagnose de identificação dos anéis de crescimento de árvores tropicais. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 9, n.1, p. 165-175, 2002.

PEIXOTO, J. P.; OORT, A. H. **Physics of Climate**. [S.l.]: Springer Verlag, USA: American Institute of Physics, 1992.

PERCIVAL, D. B.; WALDEN, A. T. **Wavelet methods for time series analysis**, vol. 4 of Cambridge Series in Statistical and Probabilistic Mathematics. 2000.

PERONE, A. et al. Evidence of solar activity and El Niño signals in tree rings of Araucaria araucana and A. angustifolia in South America. **Global and Planetary Change**, v. 145, p. 1-10, 2016.

PEZZI, L. P.; UBARANA, V.; REPELLI, C. Desempenho e Previsões de um Modelo Regional Estatístico para a Região Sul do Brasil. **Revista Brasileira Geofísica**, v. 18, n. 2, p. 129-146, 2000.

PHILANDER, S. G. **El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation**. New York: Academic Press, v. 46 International Geophysics Series, 239p 1989.

- PIRAINO, S. et al. A dendrochronological analysis of *Pinus pinea* L. on the Italian mid-Tyrrhenian coast. **Geochronometria**, v. 40, n. 1, p. 77-89, 2013.
- PRESTES, A. **Relação Sol-Terra estudada através de anéis de crescimento e coníferas de holoceno recente e do triássico**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos: (INPE-15756-TDI/1499), 2009.
- PRESTES, A. et al. Sun-earth relationship inferred by tree growth rings in conifers from Severiano de Almeida, Southern Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, p. 1587–1593, 2011.
- PRESTES, A. et al. Imprint of climate variability on Mesozoic Fossil tree rings: Evidences of solar activity signals on environmental records around 200 million years ago? **Pure and applied Geophysics**, v. 171, p. 1983–1991, 2013.
- PRESTES, A. et al. Araucaria growth response to solar and climate variability in South Brazil. **Annales Geophysicae**. p. 717–729, 2018.
- PRIEST, E. R. Solar magneto-hydrodynamics. [S.l.]: Dordrecht: D. Reidel, **Geophysics and Astrophysics Monographs**, 1987.
- RAMPELOTTO, P. et al. Variability of rainfall and temperature (1912–2008) parameters measured from Santa Maria (29.410 S, 53.480 W) and their connections with ENSO and solar activity, **J. Atmos. Sol.-Terr. Phy.**, 77, p. 152–160, 2012.
- RAO, V. B.; HADA, K. Characteristics of Rainfall over Brazil: Annual Variations and Connections with the Southern Oscillations. **Theor. Appl. Climatol.** v. 42, p. 81-91, 1990.
- RASPOPOV, O. et al. Dendrochronological evidence of long-term variations in solar activity and climate, in: International Conference Tree Rings and People – Abstracts, edited by: Kaennel, D. M. and Bräker, O. U., **Swiss Federal Research Institute WSL, Davos**, 22–26, 2001.
- REBOITA, M. S. et al. **Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul**. 2012.
- REED, R. J. The quasi-biennial oscillation of the atmosphere between 30 and 50 km over Ascension Island. **Journal of the Atmospheric Sciences**. v. 22, p. 331-333, 1965.
- REITZ, R.; KLEIN, R. M.; REIS, A. Projeto madeiras de Santa Catarina. **Herbário Barbosa Rodrigues**, Itajaí. 320p, 1978.
- RIGOZO, N. R. et al. Solar maximum epoch imprints in tree-ring width from Passo Fundo, Brazil (1741-2004). **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 70, p. 1025–1033, 2008.
- RIGOZO, N. R.; NORDEMANN, D. J. R. Análise por Regressão Iterativa de Periodicidades em Séries Temporais de Registros Geofísicos. **Revista Brasileira de Geofísica**,

v. 16, p. 149–158, 1998.

RODRIGUES, J. M. **Influência dos modos de variabilidade oceânica no clima da América do Sul durante o holoceno médio**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. MG . 2011.

ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. S. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. **Monthly Weather Review**, v. 115, p. 1606-1626, 1987.

ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. S. Precipitation patterns associated with the high index phase of the Southern Oscillation, **Journal Climate**, v. 2, p. 268-283, 1989.

RUDDIMAN, W. F. **Earth's climate: past and future**. New York: W.H. Freeman e Sons, 2001.

SCHWEINGRUBER, F. H. **Tree rings: basics and applications of dendrochronology**. Dordrech: D. REIDEL, 273p, 1988.

SEMA, Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Bacias Hidrográficas. série histórica**. Curitiba, 2010.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric Chemistry and Physics**. New York, John Wiley e Sons, Inc., 1998.

SILVA, A. C. **Análise dendroclimática da região de Três Barras e Canoinhas-SC**. Dissertação — Universidade do Vale do Paraíba, 2013.

SILVA, I. R. **Variabilidade sazonal e interanual das precipitações na região sul do Brasil associadas às temperaturas dos oceanos Atlântico e Pacífico**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001.

SOUZA, E. M. P. et al. Wavelet analysis of a centennial (1895–1994) southern Brazil rainfall series Pelotas. **Climatic Change**, v. 87, n. 3, p. 489-497, 2008.

SOUZA, E. M. P. et al. On the relationship between global, hemispheric and latitudinal averaged air surface temperature (GISS time series) and solar activity. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 74, p. 87-93, 2012.

SOUZA, T. G. G. **Estudo dendroclimático da região de Campos do Jordão - SP**; Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) - Universidade do Vale do Paraíba, 2013.

STEARNS, S. D.; DAVID, R. U. **Signal Processing Algorithms in Matlab**, Prentice Hall, 1993.

STEPKA, T. F. **Modelagem do crescimento e dendrocronologia em árvores nativas de Araucaria angustifolia, Cedrela fissilis e Ocotea porosa no sul do Brasil**. Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. 2013.

- STUDZINSKI, C. D. **Um estudo da precipitação na Região Sul do Brasil e sua Relação com os Oceanos Pacífico e Atlântico Tropical Sul**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1995.
- TALJAARD, J. J. Synoptic meteorology of the Southern Hemisphere. In: *Meteorology of the Southern Hemisphere*. **American Meteorological Society**, Boston, MA, 1972. p. 139-213.
- TOMAZELLO FILHO, et al. Anatomical features of increment zones in different tree species in the State of São Paulo, Brazil. **Scientia Forestalis**, p. 46-55, 2004.
- TORRENCE, C.; COMPO, G. P. A practical guide to wavelet analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 79, n. 1, p. 61-78, 1998.
- TRENBERTH, K. E. The definition of El Niño. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 12, p. 2771-2777, 1997.
- VERYARD, R. G.; EBDON, R. A. Fluctuations in tropical stratospheric winds. **Meteor. Mag.** p. 125-143, 1961.
- VIANELLO, R. L. **Meteorologia básica e aplicações**. UFV, 1991.
- VICINI, L.; SOUZA, A. M. **Análise multivariada da teoria à prática**. Santa Maria: UFSM, CCNE, 2005.
- VILLALBA R. et al. **Dendroclimatology from Regional to Continental Scales: Understanding Regional Processes to Reconstruct Large-Scale Climatic Variations Across the Western Americas**. Chapter 7 Dendroclimatology Progress and Prospects, 2011.
- WHITE, W. B. et al. Response of global upper ocean temperature to changing solar irradiance. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 102, n. C2, p. 3255-3266, 1997.
- WATTS, D. G. **Kinetic Data Analysis**, Plenum Press, New York, 1981.
- WILSON, P. R. **Solar and stellar activity cycles**. Cambridge University Press, 1994.
- WILCZYŃSKI, S.; FELIKSIK, E. Local chronologies and regional diversity of dendrochronological signal of Douglas fir in Poland. **Geochronometria**, v. 26, n. 1, p. 69-80, 2007.
- WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. Academic press, 2011.
- WIMMER, R.; GRABNER, M. A comparison of tree-ring features in *Picea abies* as correlated with climate. **IAWA Journal**, v. 21, n. 4, p. 403-416, 2000.
- WOLBERG, J. R. **Prediction analysis**. Princeton: Van Nostrand Company, N. J. 291p.,

1967.

WORBES, M. One hundred years of tree-ring research in the tropics—a brief history and an outlook to future challenges. **Dendrochronologia**, v. 20, n. 1, p. 217-231, 2002.

YAMAKAWA, S.; INOUE, M.; SUPPIAH, R. Relationships between solar activity and variations in SST and atmospheric circulation in the stratosphere and troposphere. **Quaternary International**, v. 397, p. 289-299, 2016.