



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro Biomédico

Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes

Victor Cordeiro de Moura


**Dendrocronologia e composição isotópica de anéis de crescimento de  
*Araucaria angustifolia* do Sul do estado do Paraná nos últimos quatro  
séculos**

Rio de Janeiro

2021

Victor Cordeiro de Moura

**Dendrocronologia e composição isotópica de anéis de crescimento de *Araucaria angustifolia* do Sul do estado do Paraná nos últimos quatro séculos**



Dissertação apresentada, como requisito parcial da obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Evolução, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof. Dr. Heitor Evangelista da Silva

Rio de Janeiro

2021

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC-A

M929 Moura, Victor Cordeiro de.  
Dendrocronologia e composição isotópica de anéis de crescimento de  
*Araucaria angustifolia* do Sul do estado do Paraná nos últimos quatro  
séculos / Victor Cordeiro de Moura – 2021.

55 f. ; il.

Orientador: Heitor Evangelista da Silva.

Dissertação (Mestrado em Ecologia e Evolução) - Universidade do  
Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes.

1. Dendrocronologia - Teses. 2. Araucariaceas - Teses. I. Silva, Heitor  
Evangelista da. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto de  
Biologia Roberto Alcântara Gomes. III. Título.

CDU 582.473

Márcia França Ribeiro - CRB7/3669 - Bibliotecária responsável pela elaboração da ficha catalográfica

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta  
dissertação desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Victor Cordeiro de Moura

**Dendrocronologia e composição isotópica de anéis de crescimento de *Araucaria angustifolia* do Sul do estado do Paraná nos últimos quatro séculos**

Dissertação apresentada, como requisito parcial da obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Evolução, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovada em 30 de setembro de 2021.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Heitor Evangelista da Silva (Orientador)  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Cátia Henriques Callado  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

---

Prof. Dr. Nicolás Misailidis Stríkis  
Universidade Federal Fluminense

Rio de Janeiro

2021

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais, minha irmã e a toda minha família que, com muito amor e carinho, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Sandra e Joel, pelo amor, apoio e incentivo incondicionais. Obrigado por cada ensinamento, conselho e palavra de carinho e sabedoria.

À minha irmã Priscila e meu cunhado Sylvio, pela parceria e cumplicidade. Obrigado por sempre me acompanharem em todos os momentos, tanto nas vitórias quanto nas furadas.

À todos os familiares e amigos, que são a razão de tudo valer a pena.

Ao Dr. Eduardo pela valiosa ajuda em campo e no laboratório.

Ao Dr. Alan Prestes pelo incentivo e apoio logístico.

Aos proprietários e equipe da Fazenda Pizzato, por abrirem suas portas a esse projeto e apoiarem a pesquisa científica no Brasil e proverem apoio logístico essencial.

Aos professores Dr. Markus Stoffel e Dra. Olga Churakova (Sidorova) e suas equipes na Universidade de Bern, Suíça pela valiosa colaboração, sem a qual este trabalho não seria possível.

À Dra. Juliana Nogueira pela ajuda no levantamento de dados e valiosas discussões.

Ao Dr. Alexandre Castagna pelo valioso auxílio com a estatística.

Ao professor Heitor Evangelista, por ter me orientado neste trabalho. Obrigado pelas incansáveis horas que dedicou a este trabalho, com discussões, críticas e sugestões acerca deste trabalho e da vida.

Ao Dr. Bruno Cintra, pelas valiosas aulas de dendrocronologia, pela dedicação e paciência em me ensinar desde o básico até os assuntos mais complexos.

À toda equipe do LARAMG pela amizade e companheirismo. Obrigado por todas as confraternizações, conversas e apoio.

À equipe administrativa e docente do PPGEE/UERJ pela atenção e dedicação para com o programa e seus alunos.

À todos os professores, funcionários e terceirizados da UERJ. Obrigado por se dedicarem diariamente em prol da educação e pesquisa no nosso país.

Árvores são poemas que a terra escreve para o céu.

*Khalil Gibran*

## RESUMO

MOURA, Victor Cordeiro de. *Dendrocronologia e composição isotópica de anéis de crescimento de Araucaria angustifolia do Sul do estado do Paraná nos últimos quatro séculos*. 2021. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Evolução) – Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

O clima na Terra sempre esteve em constante mutação e a vida no planeta evoluiu de forma a se adaptar a essa constante mudança. No entanto, nos últimos 150 anos as mudanças climáticas tomaram um ritmo nunca antes experienciado pelos seres vivos. A velocidade com que as temperaturas e as dinâmicas hídricas tem se modificado ao redor do globo estimulou pesquisas das mais diversas áreas do conhecimento a tentarem elucidar suas causas e efeitos. Nesse contexto de mudanças globais, estudos dendrocronológicos se destacam na elucidação das mudanças climáticas por permitirem estudos paleoclimáticos com resolução anual e ampla distribuição ao redor do globo. O presente trabalho utilizou técnicas modernas de mensuração de anéis e análises de isótopos estáveis em árvores da espécie *Araucaria angustifolia* do sul do Brasil para identificar os padrões regionais de variação climática nos últimos 420 anos e suas influências no crescimento da *A. angustifolia*. Os resultados obtidos mostram períodos alternados de crescimento acentuado e limitado das árvores, e forte relação com os padrões da Zona de Convergência Intertropical e da Zona de Convergência do Atlântico Sul, além de um conspicuo aumento na taxa de crescimento anual da *A. angustifolia* no período recente.

Palavras-chave: Anéis de crescimento. Dendrocronologia. Isótopos estáveis. Paleoclimatologia. *Araucaria angustifolia*.



## ABSTRACT

MOURA, Victor Cordeiro de. *Dendrochronology and isotopic composition of Araucaria angustifolia's growth rings from south Paraná state in the past four centuries*. 2021. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Evolução) – Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

Earth climate have been changing ever since and life in the planet has evolved to adapt to its constant change. However, in the last 150 years, climate changes have accelerated in a way never experienced by lifeforms. The speed temperatures and hydric dynamics have been changing around the globe has stimulated researchers of the most diverse fields of knowledge to try to elucidate its causes and effects. In this context of global changes, dendrochronology studies have stood out in the elucidation of climate changes for allowing annual resolution paleoclimatic studies around the globe. This study used modern ring measure techniques and stable isotope analysis in *Araucaria angustifolia* tree species from south Brazil to identify regional climatic patterns and its influence on *A. angustifolia*. The obtained results showed alternated periods of increased and limited growth of the studied trees and strong relation with Intertropical Convergence Zone and South Atlantic Convergence Zone patterns, in addition to a conspicuous increase in *A. angustifolia's* growth rate in the recent period.

Keywords: Tree rings. Dendrochronology. Stable isotopes. Paleoclimatology. *Araucaria angustifolia*.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Anatomia do tronco de uma árvore .....	14
Figura 2 –	Amostra de tronco de árvore e detalhe dos anéis de crescimento .....	14
Figura 3 –	Processos fisiológicos que levam ao fracionamento dos isótopos estáveis de carbono e oxigênio em uma árvore .....	17
Figura 4 –	Mapas geopolíticos do Brasil e do Paraná, destacando o município de General Carneiro .....	20
Figura 5 –	Área de coleta em General Carneiro .....	22
Figura 6 –	Amostras de <i>Araucaria angustifolia</i> .....	23
Figura 7 –	Mapa de Correlação $TRWi$ correlacionado a precipitação .....	31
Figura 8 –	Mapas de Correlação, $WUEi$ comparado à evaporação potencial (a) e à precipitação potencial (b) .....	34
Figura 9 –	Figura: Mapas de Correlação, $\delta^{18}O$ comparado à evaporação potencial (a) e à precipitação potencial (b) .....	36
Figura 10 –	Gráfico do Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração, $SPEI$ , em comparação ao gráfico do Índice de largura do anel, $TRWi$ .....	38
Figura 11 –	Mapa de Correlação, $TRWi$ comparado à precipitação potencial e atividade do sistema de monções da América do Sul .....	42
Figura 12 –	Localização das áreas de amostragem dos dados expostos na figura 23 ..	46
Figura 13 –	Média móvel de $\delta^{18}O$ comparada a $AMO$ .....	47

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Análises móveis de Rbar e EPS .....	28
Gráfico 2 - Séries de largura de anéis de crescimento das cinco árvores analisadas .....	29
Gráfico 3 - Séries de índice de crescimento, <i>TRWi</i> e <i>BAI</i> .....	30
Gráfico 4 - Gráfico das séries temporais de Ca, Ci e <i>WUEi</i> .....	32
Gráfico 5 - Gráfico do modelo de regressão linear entre a <i>WUEi</i> e o CO <sub>2</sub> atmosférico .....	33
Gráfico 6 - Série histórica de $\delta^{18}\text{O}$ e média móvel de 41 pontos da série histórica .....	35
Gráfico 7 - Ondaleta para série histórica de $\delta^{18}\text{O}$ .....	35
Gráfico 8: <i>BAI</i> em comparação ao CO <sub>2</sub> atmosférico .....	39
Gráfico 9 - Série histórica de <i>BAI</i> em comparação a reconstruções de anomalia da temperatura dos últimos 1000 anos .....	40
Gráfico 10 - <i>TRWi</i> comparado a índices de precipitação ligados ao <i>El Niñ</i> .....	41
Gráfico 11 - Gráficos comparando <i>TRWi</i> , <i>BAI</i> , CO <sub>2</sub> atmosférico, CO <sub>2</sub> intrafoliar e <i>WUEi</i> .....	43
Gráfico 12 - Comparação entre o <i>TRWi</i> da <i>A. angustifolia</i> e diversos outros <i>proxys</i> da América do Sul .....	45

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	11
1.	<b>OBJETIVOS</b> .....	19
1.1	<b>Geral</b> .....	19
1.1	<b>Específicos</b> .....	19
2.	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	20
2.1	<b>Local de estudo</b> .....	20
2.2	<b>Procedimentos de coleta e construção de cronologias</b> .....	21
2.3	<b>Análise isotópica</b> .....	25
2.4	<b>Isótopos de Carbono</b> .....	26
2.5	<b>Análise estatística</b> .....	27
3	<b>RESULTADOS</b> .....	28
3.1	<b>Séries dendrocronológicas</b> .....	28
3.2	<b>Isótopos de carbono</b> .....	31
3.3	<b>Isótopos de oxigênio</b> .....	34
4	<b>DISCUSSÃO</b> .....	37
	<b>CONCLUSÕES</b> .....	48
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	50

## INTRODUÇÃO

O clima no planeta Terra sempre esteve em constante mudança, afetando as diversas formas de vida e seus habitats naturais. Os principais fatores que influenciam o clima do planeta são o posicionamento dos continentes, os ciclos solares, a composição da atmosfera e grandes eventos extraterrenos (Teixeira, 2000, p. 244, 245). Desses, os fatores com maior constância são o posicionamento dos continentes e os ciclos solares. Os ciclos solares conduzem a Terra em períodos alternados de glaciação, conhecidos como “Éras do gelo” e períodos interglaciais. Já a disposição dos continentes, associada a composição atmosférica determinam a dinâmica hídrica e a circulação dos ventos no planeta. (Teixeira, 2000, p. 244, 245).

Desde de o surgimento das primeiras civilizações, a espécie humana tem alterado o ambiente ao seu redor em uma escala muito superior à dos demais seres vivos. Da implementação de sistemas de agricultura ao manejo e reposicionamento de cursos naturais de água, há milhares de anos o ser humano vem alterando a paisagem terrestre e impactando também nas dinâmicas climáticas. Estudos recentes apontam que nos últimos 150 anos a humanidade tem impactado o meio ambiente e alterado a composição da atmosfera de modo a afetar os ciclos biogeoquímicos e as dinâmicas climáticas da Terra. (IPCC 2014)

Um dos principais fatores que contribuem para as mudanças climáticas é o aumento do CO<sub>2</sub> atmosférico, o principal gás do efeito estufa. Nos últimos 150 anos o CO<sub>2</sub> livre na atmosfera aumentou de 287 ppm para 419 ppm (MacFarling, 2006; MaunaLoa, 2021<sup>1</sup>). Esse aumento abrupto na concentração de CO<sub>2</sub> aumenta a temperatura da atmosfera, o que leva a uma alteração nos padrões de precipitação e dinâmicas atmosféricas.

Efeitos do aumento expressivo do CO<sub>2</sub> nos últimos 150 anos, já podem ser observados ao redor do globo, como a alteração do potencial agrícola de grandes áreas rurais no Canadá (Shen, 2005) e alteração na composição de comunidades vegetais, com algumas espécies se tornando mais abundantes enquanto outras desaparecem (Klanderud,

---

<sup>1</sup> Consultado em: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>

2003). Regiões tipicamente áridas tem recebido mais precipitação do que o normal, levando a mudanças ecossistêmicas (Brown, 1997).

Devido a suas dimensões continentais, o Brasil apresenta diferentes biomas, definidos pelas dinâmicas climáticas que operam no país. A temperatura nas diferentes regiões do país é definida principalmente pelos gradientes de latitude e altitude, quanto mais alta e afastada dos trópicos for uma região, menor é a temperatura observada. Já as dinâmicas hidrológicas do Brasil estão relacionadas à circulação de ventos que formam o sistema *ITCZ/SACZ* (*Intertropical Convergence Zone* e *South Atlantic Coverage Zone*) e ao fenômeno *El Niño* (Climatologia de precipitação e temperatura – CPTEC/INPE)<sup>2</sup>.

O sistema *ITCZ/SACZ* transporta umidade do Oceano Atlântico, ao redor da linha do equador, para a Região Norte do Brasil via *ITCZ*, passando pela região nordeste, o que implica na alta pluviosidade da região amazônica. Grande parte dessa umidade retorna a atmosfera devido a evapotranspiração da floresta amazônica e é transportada, via *SACZ*, para o sul e sudeste do Brasil (Climatologia de precipitação e temperatura – CPTEC/INPE)<sup>3</sup>. Já o fenômeno *El Niño*, periodicamente aquece as águas do Oceano Pacífico, aumentando a quantidade de água na atmosfera acima do Pacífico Sul, o que acarreta na ocorrência de correntes subtropicais que atravessam a Cordilheira dos Andes, levando umidade as regiões sul e sudeste do Brasil (Wenju Cai et al, 2020).

Com o avanço das mudanças climáticas, é previsto que no Brasil haja a transição da maior parte da floresta amazônica para um ambiente semiárido semelhante à savana e que haja redução drástica de precipitação nas regiões centro-oeste e sudeste e aumento na precipitação da região sul. Tais mudanças reduziriam a quantidade de terras cultiváveis no país, e induziriam a extinção de diversas espécies e a mudanças nas composições das comunidades dos biomas brasileiros (PBMC 2013).

Para melhor entender as dinâmicas climáticas do Brasil, diversos parâmetros (*proxys*) climáticos são estudados em diferentes regiões do país, tais como, espeleotemas de cavernas, esqueletos de corais, testemunhos de sedimento e anéis de crescimento de árvores. Ainda que seja uma ciência jovem, a Dendrocronologia, ou o estudo dos anéis de crescimento das árvores, contribuiu valiosamente para o entendimento das dinâmicas climáticas.

---

<sup>22</sup> Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/chuesp.html>

<sup>33</sup> Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/chuesp.html>

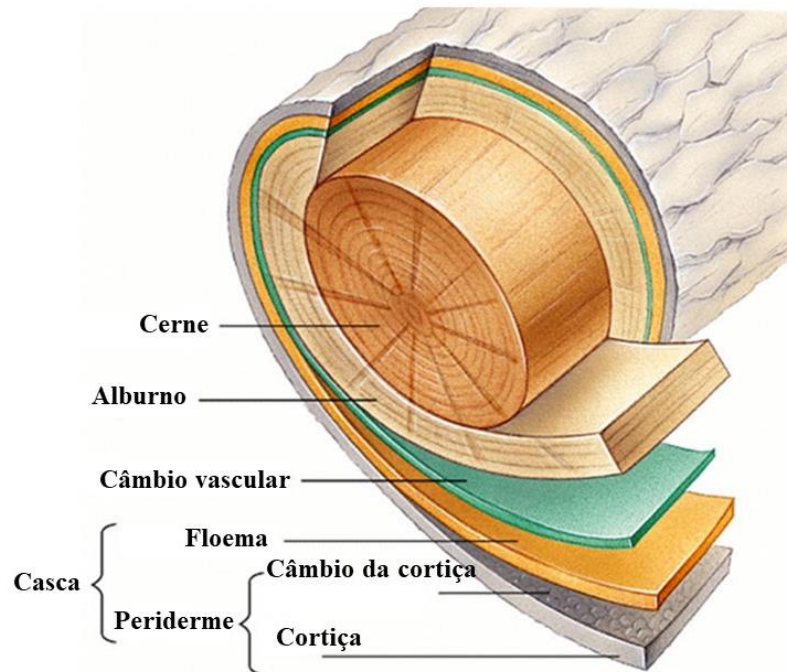
## **DENDROCRONOLOGIA**

As árvores podem ser classificadas em gimnospermas, que produzem sementes nuas, sem a presença de um fruto, e angiospermas, cujas flores produzem sementes protegidas por um fruto.(Speer, 2012, p. 74).

Ao longo de suas vidas as árvores crescem tanto em altura quanto em espessura. Estruturas especializadas conhecidas como Meristema Primário e Meristema Secundário são responsáveis pelo crescimento em altura e em espessura, respectivamente(Cyrille 2016).

Como demonstrado na figura 1, o Meristema Secundário, também chamado de câmbio vascular, localizado ao redor de todo tronco, entre o xilema e o floema, produz novas células de xilema a cada estação de crescimento, o que faz com que árvores que possuam uma estação de crescimento por ano, produzam anéis de crescimento anuais, como os presentes nas amostras da figura 2. O estudo dos anéis de crescimento denomina-se Dendrocronologia (Cyrille 2016).

Figura 1: Anatomia do tronco de uma árvore.



Legenda: anatomia do tronco de uma árvore identificando o xilema (cerne e alburno), o meristema secundário (câmbio vascular) e as partes da casca com o floema e a periderme, composta pela cortiça e pelo felogênio (câmbio da cortiça). Fonte: Reece et al 2011

Figura 2: Amostra de tronco de árvore e detalhe dos anéis de crescimento.



Fonte: O autor, 2019.

Apesar da dendrocronologia, ser uma ciência relativamente jovem, com o primeiro laboratório de pesquisa em anéis de árvores sendo fundado em 1937 no Arizona, Estados Unidos da América por A. E Douglass (Speer, 2012, p. 48), a ideia de que as árvores



produzem anéis de crescimento anualmente remonta a mais de dois mil anos (Studhalter, 1956, *apud*. Speer, 2012).

Além da premissa básica de se descobrir a idade de uma árvore através da contagem de seus anéis de crescimento, a anatomia dos anéis de árvores pode revelar muito sobre o ambiente no qual aquela árvore vive. A largura e a densidade dos anéis podem indicar as condições de temperatura e precipitação de anos passados. Cicatrizes de congelamento podem indicar anos de temperaturas extremas, cicatrizes de queimadura indicam a ocorrência de incêndios. São diversas as informações que as árvores podem fornecer através de seus anéis de crescimento. Tais contribuições fizeram com que a dendrocronologia seja um dos campos de pesquisa que mais tem crescido, especialmente com o desenvolvimento de novas técnicas nas últimas décadas, como a análise de isótopos estáveis.

## ISÓTOPOS ESTÁVEIS

Toda a matéria é composta por uma combinação de átomos, que por sua vez são compostos por uma combinação de partículas subatômicas denominadas prótons, nêutrons e elétrons. A quantidade de prótons no núcleo de um átomo é o que determina o elemento químico desse átomo e comumente os átomos apresentam a mesma quantidade de prótons e nêutrons no interior do núcleo (Sharp 2017).

Os átomos de um mesmo elemento podem, no entanto, possuir quantidades distintas de nêutrons, sendo chamados de isótopos, como por exemplo o  $^{12}\text{C}_6$  e o  $^{13}\text{C}_6$  são isótopos do elemento Carbono, com 6 e 7 nêutrons respectivamente.

A diferença na massa dos isótopos confere algumas diferenças nas substâncias por eles formadas. Por exemplo, uma molécula de água formada por um isótopo de oxigênio mais pesado evaporará com mais dificuldade e precipitará com mais facilidade que a molécula de água formada com o isótopo mais leve. A diferença na razão isotópica de determinada substância causada pela diferença de massa nas moléculas formadas por isótopos distintos é um processo conhecido como fracionamento isotópico (Speer 2012, p. 382 – 384).

O fracionamento isotópico pode ser utilizado para aferir as condições de determinado ambiente no momento em que esses isótopos foram incorporados às estruturas das quais fazem parte, como espeleotemas de cavernas, blocos de gelo ou anéis de crescimento de árvores.

A análise de isótopos estáveis em anéis de crescimento é uma das aplicações que mais cresce em dendrocronologia (Speer, 2012, p. 373). Uma vez que os anéis de crescimento possuem em sua composição, diversos elementos que foram absorvidos do ambiente pela árvore, a fisiologia desta se soma aos processos físicos de fracionamento dos isótopos estáveis.

Os processos fisiológicos que interferem no fracionamento e incorporam os isótopos estáveis de carbono e oxigênio nos anéis de crescimento são bem conhecidos e sua análise permite a reconstrução mais acurada do ambiente no qual as árvores cresceram (McCarrol, 2004).

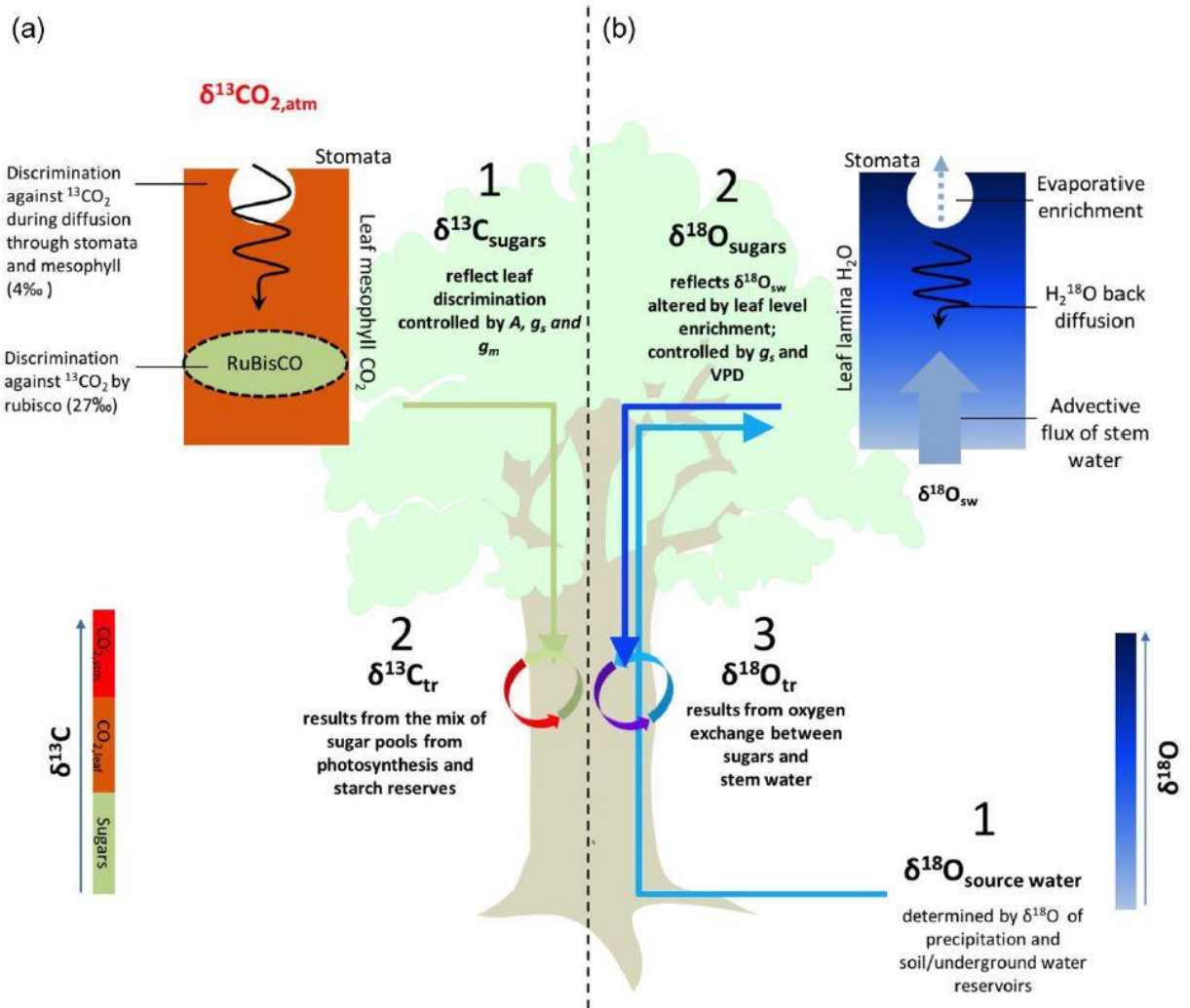
Os isótopos de carbono,  $^{13}\text{C}$ , mais pesados do que o isótopo  $^{12}\text{C}$ , por exemplo sofrem um primeiro fracionamento ao entrarem nas folhas através dos estômatos, as moléculas de  $\text{CO}_2$  com isótopos  $^{13}\text{C}$ , mais pesados, possuem taxa de difusão mais baixa, penetrando no espaço intrafoliar em menor quantidade. Dentro da folha, a enzima RuBisCo, responsável pela captação de  $\text{CO}_2$  apresenta taxa de reação mais elevada com a molécula de  $\text{CO}_2$  do que com  $^{13}\text{C}$ , acarretando em mais um fracionamento do  $^{13}\text{C}$  (Cintra 2019).

Já os isótopos de oxigênio,  $^{18}\text{O}$ , mais pesados do que o isótopo  $^{16}\text{O}$ , são absorvidos pela árvore a partir da água do solo e viajam pelo tronco até as folhas, onde sofrem fracionamento devido a maior facilidade da água com  $^{16}\text{O}$  em evaporar e escapar da folha pelos estômatos (Cintra 2019). A figura 3 ilustra os processos fisiológicos de uma árvore que resultam no fracionamento dos isótopos estáveis de carbono e oxigênio.

O fracionamento dos isótopos estáveis em relação aos seus elementos padrão em razão de variáveis físicas e fisiológicas é o que torna possível o estudo dessas variáveis através da análise dos isótopos estáveis.

Figura 3: Processos fisiológicos que levam ao fracionamento dos isótopos estáveis de carbono e oxigênio em uma

árvore.



Legenda: Processos fisiológicos que atuam no fracionamento dos átomos de Carbono (a); processos fisiológicos que atuam no fracionamento dos átomos de Oxigênio (b). Fonte: Cintra 2019.

Como organismos vivos, as árvores, além de responderem as mudanças climáticas e ambientais, as registram durante seu crescimento. Alguns autores, como Lloyd e Farquhar (2008) discutiram a possibilidade das árvores adequarem-se rapidamente às mudanças na temperatura global e se beneficiarem de uma atmosfera mais rica em  $\text{CO}_2$ , potencializando sua produtividade primária e sua capacidade de sequestro de  $\text{CO}_2$ . No entanto, estudos recentes como Silva (2010), Peñuelas (2011), e Van der Sleen (2015) tem apontado um decréscimo na captura de carbono e no crescimento das árvores ao redor do globo.

Na Região Sul do Brasil, interessante pelos sistemas climáticos que a influenciam, encontra-se a maior densidade populacional da espécie *Araucaria angustifolia*, também conhecida como Pinheiro Brasileiro. A *A. angustifolia* pertence ao grupo das gimnospermas e é a árvore mais icônica do sul do Brasil, sendo árvore símbolo do estado do Paraná.

O interesse econômico e cultural, tanto em suas sementes, conhecidas popularmente como pinhão, quanto pela sua madeira, levaram a exploração predatória da espécie no passado. Hoje, a espécie é protegida por lei e possui grande valor para pesquisas científicas, tanto nas áreas da ecologia quanto da dendrocronologia.

Devido a intensa exploração no passado, poucos indivíduos monumentais, com mais de 300 anos de idade, permanecem de pé no Brasil. Devido à sua longevidade, a espécie representa uma grande oportunidade para estudos dendrocronológicos de longo prazo.

Desta forma, considerando a necessidade de melhor entender as mudanças climáticas e seus efeitos nos organismos vegetais e a oportunidade de desenvolver cronologias longas e com resolução anual através do estudo de anéis de crescimento da *A. angustifolia*, o presente trabalho se propõe a estudar a dendrocronologia da *A. angustifolia* de uma área rural no sul do estado do Paraná, contribuindo assim com a discussão dos efeitos das mudanças climáticas observados no Brasil e seus efeitos na *A. angustifolia*.

## 1 OBJETIVOS

### 1.1 OBJETIVO GERAL

Identificar padrões climáticos de longo prazo através da análise dendrocronológica e isotópica de anéis de crescimento de *Araucaria angustifolia* do Sul do Brasil.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Gerar séries temporais através da análise dendrocronológica e isotópica de *A. angustifolia*.

Averiguar respostas da *A. angustifolia* às mudanças climáticas e seus efeitos na formação e composição isotópica dos anéis de crescimento.

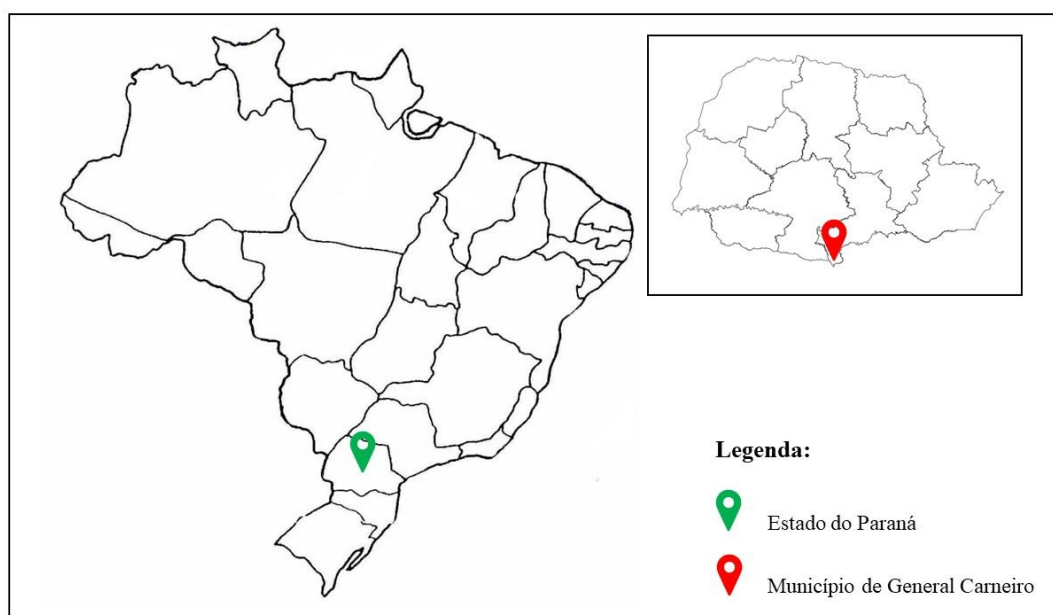
## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Local de estudo

O local de estudo é uma propriedade rural privada localizada nas imediações do município de General Carneiro, Sul do estado do Paraná, Sul do Brasil (Figura 4). A Região Sul do Brasil, composta pelos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, é composta principalmente de dois biomas, a Floresta Ombrófila Mista e os Pampas Gaúchos.

Segundo a classificação climática de Koppen<sup>4</sup>, a região é do tipo climático Cfb – Subtropical úmido mesotérmico. O clima da região recebe influências do Sistema de Monções da América do Sul, do El Niño e de frentes frias vindas da Antártica, o que torna a região interessante para o estudo desses fenômenos e dos padrões de mudanças climáticas.

Figura 4: Mapas geopolíticos do Brasil e do Paraná, destacando o município de General Carneiro.



Fonte: O autor, 2019.

<sup>4</sup> Consultado em: <https://www.britannica.com/science/Koppen-climate-classification>

A cidade de General Carneiro localiza-se em um vale e apresenta temperatura média anual de 17,2 °C, no verão a temperatura média é de 20,4 °C e no inverno de 13,5 °C. A precipitação anual média é de 1540 mm, a estação mais chuvosa é o verão com média de 576 mm e a mais seca é o inverno com média de 327 mm de precipitação (dados INMET<sup>5</sup> dos últimos 60 anos).

## 2.2 Procedimentos de coleta e construção de cronologias

Amostras de cinco árvores da espécie *Araucaria angustifolia* foram coletadas de forma oportunista, aproveitando-se a derrubada, em 2015, para manobras de manejo florestal na Fazenda Pizzato no Município de General Carneiro – PR. Das cinco árvores amostradas, foram obtidas cinco secções transversais dos troncos e 16 amostras com trado de incremento. Os critérios para a escolha dos indivíduos amostrados foram o tamanho, os maiores possíveis, e o seu estado de conservação, evitando-se indivíduos danificados, inclinados ou com sinais de apodrecimento. As secções transversais foram cortadas em pedaços menores para facilitar o transporte (Figura 6).

---

<sup>5</sup> Consultado em: <https://portal.inmet.gov.br/>

Figura5: Área de coleta em General Carneiro



Legenda: Indivíduos de *A. angustifolia* na área de coleta(a); amostragem com trado de incremento (b); detalhe do indivíduo amostrado (c). Fonte: Heitor Evangelista, 2015.



Figura 6: Amostras de *Araucaria angustifolia*.



Legenda: Amostras de *A. angustifolia* utilizadas neste trabalho. Amostras originais cedidas pela Fazenda Pizzato (a); secções radiais das amostras (b). Fonte: Heitor Evangelista 2015.

As amostras foram lixadas e polidas com o auxílio de uma lixadeira e de lixas para madeira de grão 200 a 800, seguindo procedimentos padrão de dendrocronologia (Cook, 1990, p. 41, 42), para permitir a visualização dos anéis de crescimento.

Posteriormente, as amostras foram enviadas ao *Dendrolab, University of Bern*, Suíça para mensuração dos anéis de crescimento e análise de isótopos estáveis de  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ . A mensuração das amostras (4 a 5 raios por secção transversal e 1 raio por amostra de trado de incremento) foi realizada em um sistema LINTAB5 com resolução de  $1\mu\text{m}$ , acoplado a um

estereomicroscópio Leica e a um computador, no qual as séries temporais foram registradas através do sistema TSAP-Win Scientific Software (RINNTECH 2014).

Foi então realizada a datação cruzada (*cross-dating*) baseada em uma cronologia-mestra previamente publicada (Oliveira et al. 2010) e uma verificação estatística foi utilizada para verificar possíveis erros de contagem com o software COFECHA (Holmes 1983). Esse procedimento visou identificação de anéis falsos ou faltosos, permitindo a obtenção de uma melhor datação dos anéis de crescimento e uma série temporal com maior resolução.

Em estudos dendrocronológicos é desejável que se possuam amostras abundantes de diversos indivíduos, não apenas para facilitar a datação cruzada da série cronológica, mas também para se obter valores significativos de parâmetros estatísticos (Cook et al. 2000). *ORbar* (correlação entre os indivíduos) e *EPS* (*Expressed Population Signal*), são dois parâmetros que representam respectivamente, a correlação entre as árvores estudadas e o sinal populacional expresso pelo conjunto das árvores.

Um processo essencial em estudos dendrocronológicos é a padronização das séries de largura de anéis. A padronização consiste em uma correção matemática que remove as tendências de longo prazo e variações intrínsecas de crescimento ligadas ao desenvolvimento das árvores. Esse processo potencializa sinais ligados a fatores ambientais, principalmente às variações climáticas (Speer, 2012, p. 43)

Para a série temporal de cada árvore foi realizada a padronização, aplicando uma interpolação cúbica com resposta frequência de 50% em intervalos de 50 anos (*cubic smoothed spline function, 50% frequency response cut-off for 50 years segment length*), método que se provou eficiente para maximizar sinais climáticos em *A. angustifolia* (Oliveira, 2010). Este processo resultou no índice de largura de anel, ou *TRWi* (*Tree-Ring Width index*), utilizado para estudos climáticos baseados em anéis de crescimento.

A série temporal de largura de anéis de cada árvore também foi utilizada para calcular o incremento de área basal do lenho, *BAI* (*Basal Area Increment*). O *BAI* é um método de padronização, calculado subtraindo-se da medida do raio total no ano calculado, a medida do raio total do ano anterior. O *BAI* é interessante por remover tendências de longo prazo ligadas a idade da árvore enquanto potencializa eventos de liberação e supressão causados por variações ambientais (Speer, 2012, p. 300).

A equação abaixo demonstra o cálculo de obtenção do BAI (*Basal área increment*), onde “ $r_t$ ” é o raio da árvore medido até o anel para o qual se pretende calcular o BAI e “ $r_{t-1}$ ” é o raio medido até o anel anterior.

$$BAI_t = \pi(r_t^2 - r_{t-1}^2)$$

(1)

### 2.3 Análise Isotópica

Uma amostras de cada indivíduo, com as melhores datações, foi selecionada para as análises de isótopos estáveis de carbono e oxigênio. O período analisado foi de 1594 a 2014. Cada anel foi removido individualmente de sua amostra utilizando-se um bisturi e uma lupa binocular e então os anéis das diferentes amostras foram agrupados de acordo com seus respectivos anos. Os anéis, agrupados por ano, foram então acondicionados em recipientes filtrantes identificados para o processo de extração da  $\alpha$ -celulose, realizada de acordo com o protocolo estabelecido por Boettger (2007). Uma vez prontas, as amostras de celulose foram acondicionadas em capsulas de prata e pirolisadas a 1420°C em um *PYROCUBE* (Elementar) e analisadas com um Espectrômetro de massa Delta Plus XP (Thermo Finnigan).

A composição isotópica obtida de uma amostra é expressa em uma razão do isótopo mais pesado dividido pelo mais leve, conhecida como  $\delta^{13}\text{C}$  para isótopos de carbono e  $\delta^{18}\text{O}$  para os isótopos de oxigênio. Esse resultado deve ser normalizado com o uso de um padrão internacional para garantir a comparabilidade entre composições isotópicas de diferentes amostras, de acordo com a equação abaixo.

$$\delta_{amostra} = (R_{amostra}/R_{padr\tilde{a}o} - 1) * 1000) \text{‰}$$

(2)

A equação representa a normalização matemática de razões isotópicas de carbono e oxigênio por meio de padrões internacionais. O padrão internacional para o  $\delta^{13}\text{C}$  é o *Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB)* e para o  $\delta^{18}\text{O}$  é a *Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW)*, ambos promulgados pela Agência Internacional de Energia Atômica.

## 2.4 Isótopos de Carbono

Um dos principais usos dos estudos de isótopos de carbono em anéis de árvores é calcular a eficiência intrínseca do uso da água, o *WUEi* (do inglês, *intrinsic water use efficiency*). Para tanto outros componentes da fisiologia vegetal precisam ser obtidos, tal como a quantidade de CO<sub>2</sub> presente no espaço intercelular da folha (C<sub>i</sub>) e a razão entre os valores de δ<sup>13</sup>C da celulose e da atmosfera para cada anel da série temporal.

Uma vez determinada a composição isotópica dos anéis de crescimento, foi calculado o Δ<sup>13</sup>C, discriminação isotópica dos anéis de árvore em relação a composição isotópica atmosférica, para isso foram utilizados dados de δ<sup>13</sup>C atmosférico reconstruídos de amostras de testemunhos de gelo antártico (Rubino et al., 2013).

A equação abaixo demonstra o cálculo do sinal isotópico de carbono dos anéis de árvore em relação a razão isotópica atmosférica, onde “δ<sup>13</sup>C<sub>atm</sub>” é a composição isotópica do carbono na atmosfera e “δ<sup>13</sup>C<sub>plant</sub>” é a composição isotópica do carbono medida nos anéis de crescimento.

$$\Delta^{13}\text{C} = \frac{(\delta^{13}\text{C}_{atm} - \delta^{13}\text{C}_{plant})}{\delta^{13}\text{C}_{plant} / 1000 + 1} (\text{‰}) \quad (3)$$

Uma vez obtidos os valores de Δ<sup>13</sup>C, estes foram utilizados, junto a valores de concentração de Carbono atmosférico, obtidos a partir de amostras de testemunho de gelo antártico (Rubino et al., 2013), para calcular os valores de CO<sub>2</sub> presente no espaço intercelular aa folha (C<sub>i</sub>).

O modelo teórico abaixo calcula a discriminação isotópica referente a processos fracionantes atuantes na folha que dependem entre outras coisas das concentrações de CO<sub>2</sub> na atmosfera e no espaço intrafoliar.

$$\Delta^{13}\text{C} = a + (b - a) (\text{C}_i/\text{C}_a)(\text{‰}) \quad (4)$$

Onde “a” é o fracionamento associado a difusão de CO<sub>2</sub> do ar para a folha (4.4‰) , dado devido a diferença de massa entre os isótopos. “b” é o coeficiente de fracionamento do CO<sub>2</sub> associado a carboxilação pela proteína Rubisco (27‰). “C<sub>i</sub>” é a pressão parcial de gás

carbônico no espaço intercelular da folha e “Ca” é a pressão parcial de gás carbônico na atmosfera.

De posse dos valores de  $C_i$ , estes foram utilizados para calcular a eficiência intrínseca do uso da água,  $iWUE$  (do inglês, *intrinsic water use efficiency*), seguindo a seguinte formulação matemática.

$$WUE_i = (C_a - C_i) / 1,6 (\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$$

(5)

Onde “1,6” é a razão de difusividade da água e do  $\text{CO}_2$  no ar. Outros fatores podem influenciar a discriminação isotópica do  $\text{CO}_2$ , como a taxa de condutância do mesófilo foliar, a temperatura, a pressão de vapor de água e a pressão atmosférica local (Seibt, 2008. Cintra, 2019). Como algumas dessas informações não estavam bem documentadas para o local de estudo devido a falhas na estação meteorológica local, optou-se pelo uso da fórmula do  $WUE_i$ , eficiência intrínseca do uso da água. (Osmond, 1980. *apud*. Seibt, 2008).

## 2.4 Análise estatística

Foi calculada a pontuação padrão (Z-score) das séries temporais de  $TRWi$  e de  $BAI$ , para comparar o sinal populacional das árvores analisadas com padrões climáticos da região.

A periodicidade das séries temporais foi testada com o método de Análise de Ondeletas (*Waveletanalysis*), realizados com o software *PAST*. Esta análise é reconhecida como uma técnica adequada para detectar mudanças nos padrões e ciclicidades significativas em sinais geofísicos, maiores detalhes sobre a análise por ondeletas podem ser encontrados em TORRENCE & COMPO (1998).

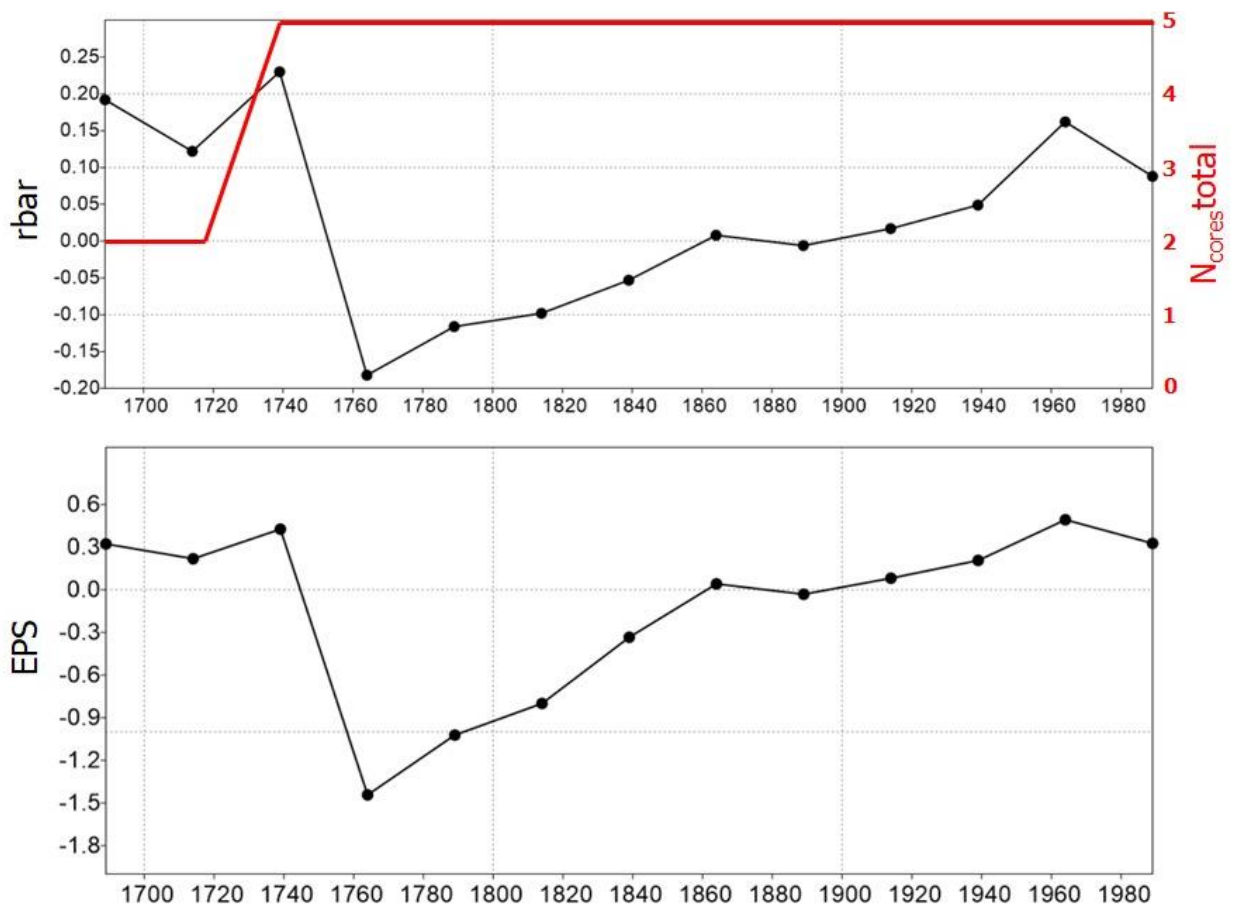
As séries temporais de  $TRWi$ ,  $WUE_i$  e  $\delta^{18}\text{O}$  foram utilizadas para a construção de mapas de correlação com dados de temperatura superficial, evaporação potencial, precipitação potencial e concentração de gelo marinho obtidos da plataforma *NCEP/NCAR* do *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*. Os mapas foram confeccionados através da correlação de Spearman com o pacote Stars na plataforma R.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Séries dendrocronológicas

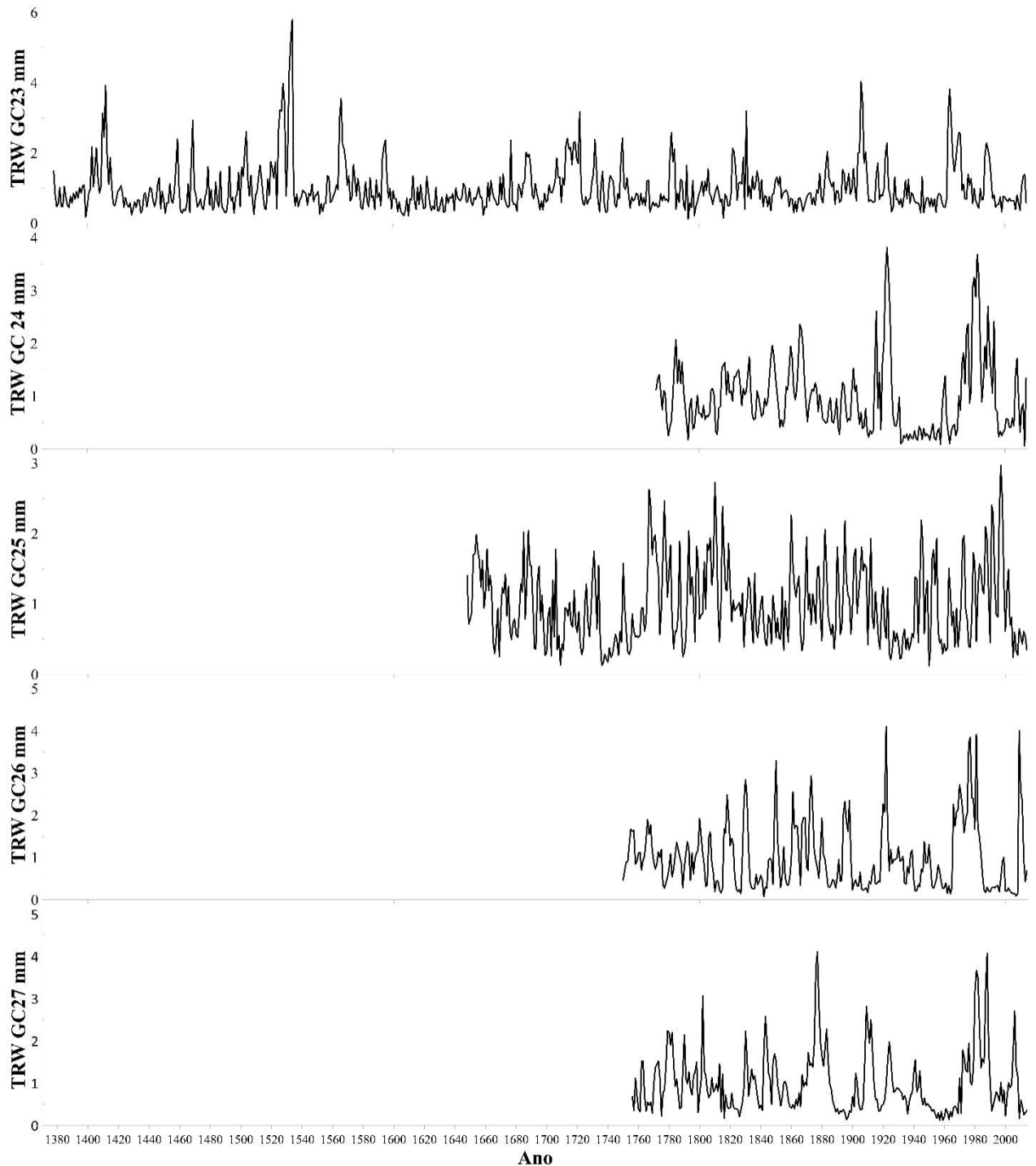
As cinco árvores deste estudo, identificadas como GC23, GC24, GC25, GC26 e GC27 (Figura 8), apresentam um total de 1771 anéis de crescimento anuais, extensão média de 354,2 anos, e a série mais longa possui extensão total de 637 anos, compreendendo o período entre os anos de 1378 a 2014. As séries dendrocronológicas do presente estudo apresentaram  $Rbar$  igual a 0,04 e  $EPS$  igual a 0,105. Foi realizada uma análise móvel de 50 pontos para verificar como o  $Rbar$  e o  $EPS$  variaram ao longo das séries (Figura 7).

Gráfico 1: Análises móveis de  $Rbar$  e  $EPS$ .



Fonte: O autor, 2020.

Gráfico 2: Séries de largura de anéis de crescimento das cinco árvores analisadas.

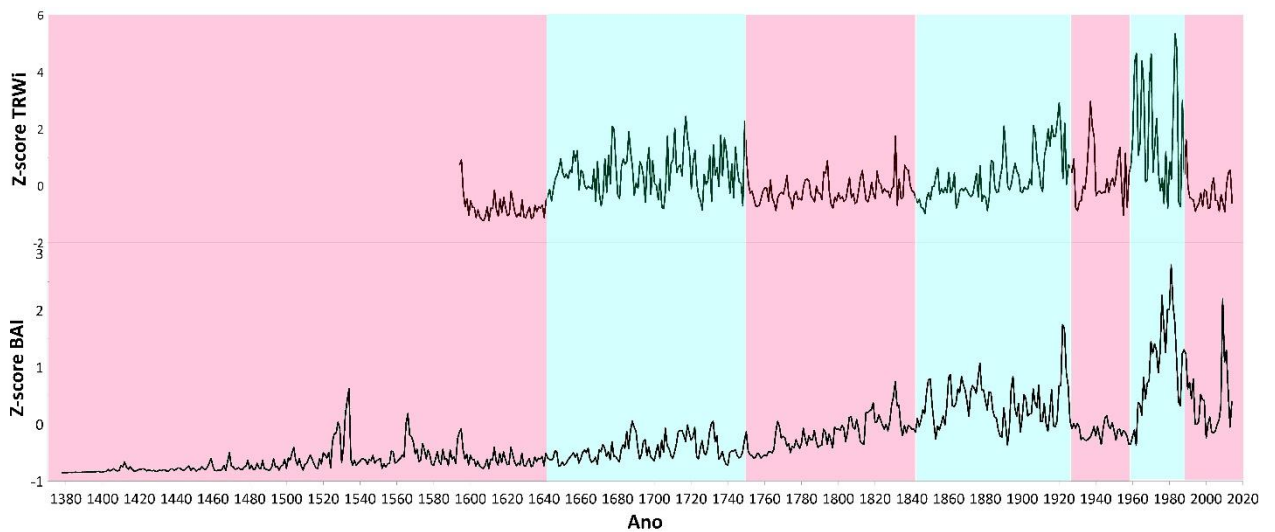


Fonte: O autor, 2020

A padronização por interpolação cúbica dos dados de largura de anéis considerou o período entre 1594 a 2014, uma vez que, o período retrospectivo a este seria representado apenas por um indivíduo, o que representaria uma pobre estatística.

Ainda que em escalas distintas, *TRWi* e *BAI*(Figura 9)apresentaram comportamentos semelhantes. Podem ser observadas sucessivas alternâncias entre períodos de crescimento acentuado (eventos de liberação) e períodos de crescimento restrito (eventos de supressão). Observa-se, entre os anos de 1960 e 1990, intenso aumento no ganho anual de lenho (*BAI*) e no índice de largura do anel (*TRWi*) em escala superior ao resto da série.

Gráfico 3: Séries de índice de crescimento, *TRWi* e *BAI*.

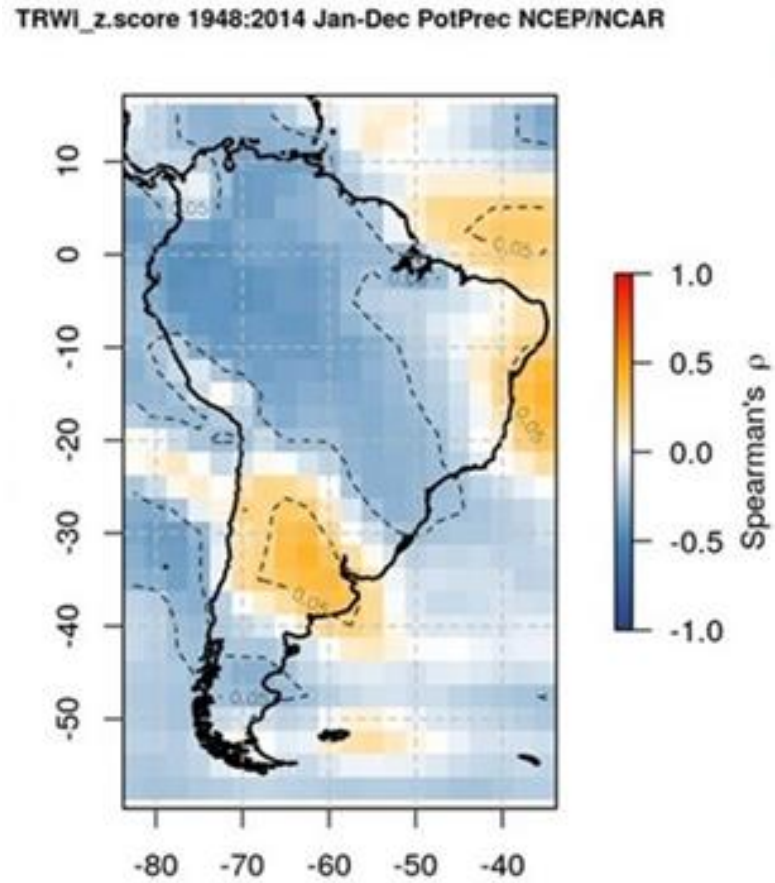


Legenda:Períodos de crescimento acentuado (em azul) e restrito (em vermelho). Fonte: O autor, 2020.

Os mapas de correlação do *TRWi* (Figura 10) mostraram uma correlação negativa significativa com a precipitação potencial de toda a região amazônica e centro-oeste do Brasil.



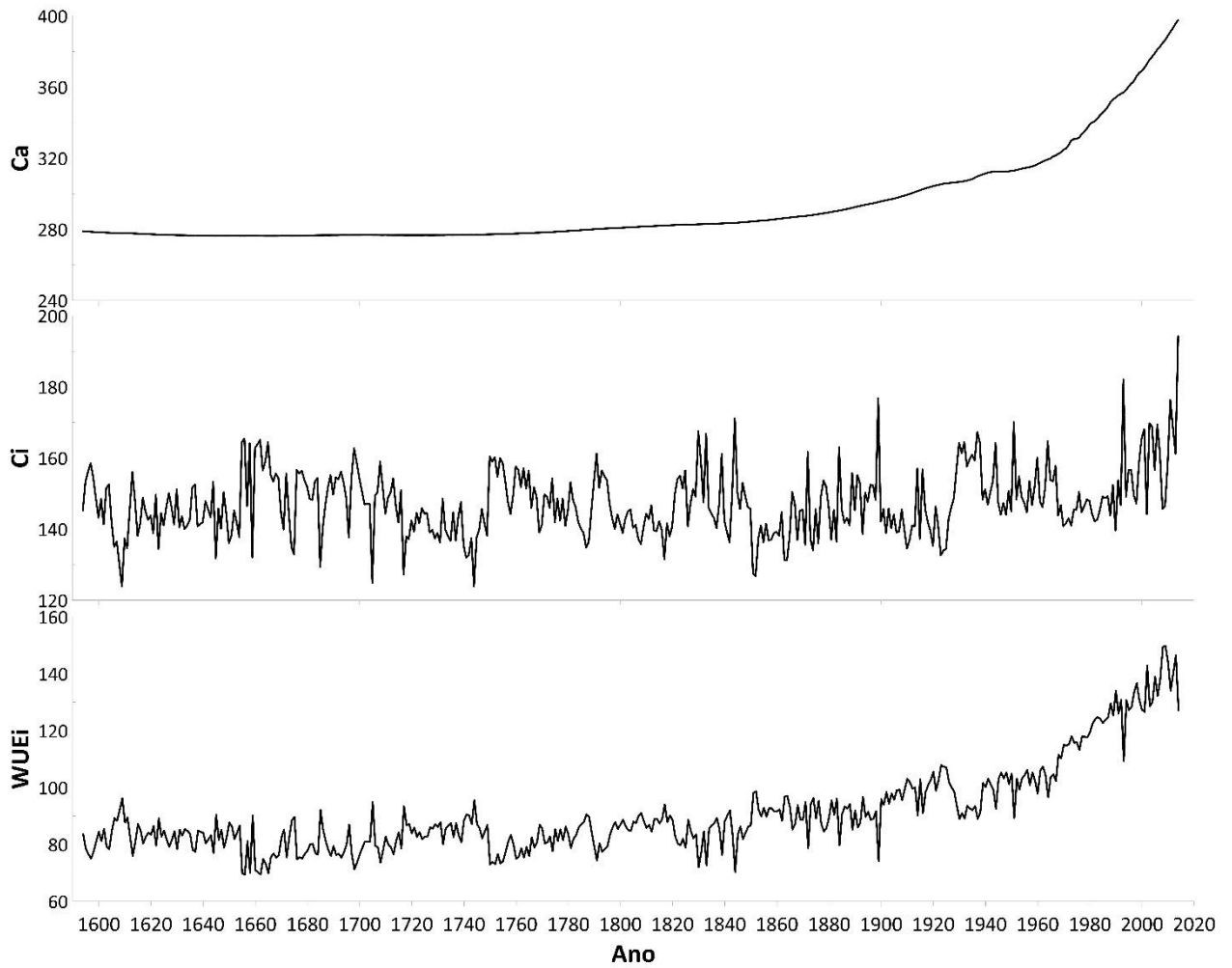
Figura 7: Mapa de Correlação  $TRWi$  correlacionado a precipitação.



Fonte: O autor, 2021.

### 3.2 Isótopos de Carbono

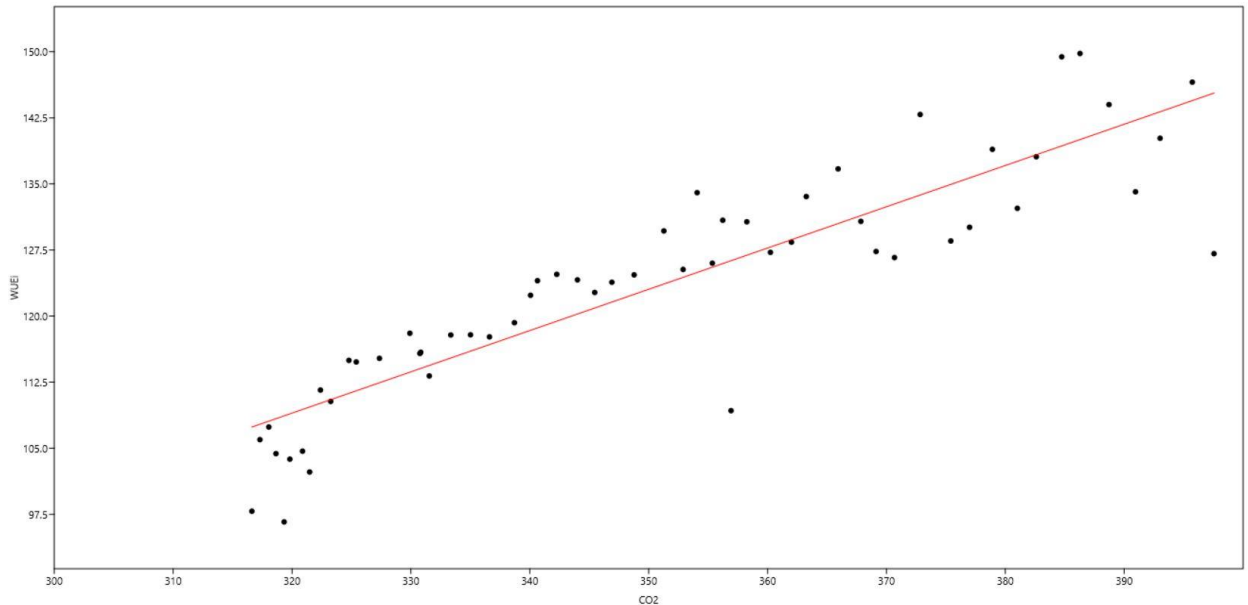
Os valores obtidos de  $Ci$  e  $WUEi$  (Figura 11) variaram ao longo da série histórica acompanhando o aumento de  $CO_2$  atmosférico ( $Ca$ ) dos últimos 150 anos.

Gráfico 4: Gráfico das séries temporais de Ca, Ci e  $WUE_i$ .

Fonte: O autor, 2020.

O teste de regressão linear entre  $WUE_i$  eo  $CO_2$  atmosférico (Figura 12), teve  $n = 54$  e obteve como resultado, coeficiente de correlação linear  $r = 0,89$   $p < 0.0001$ .

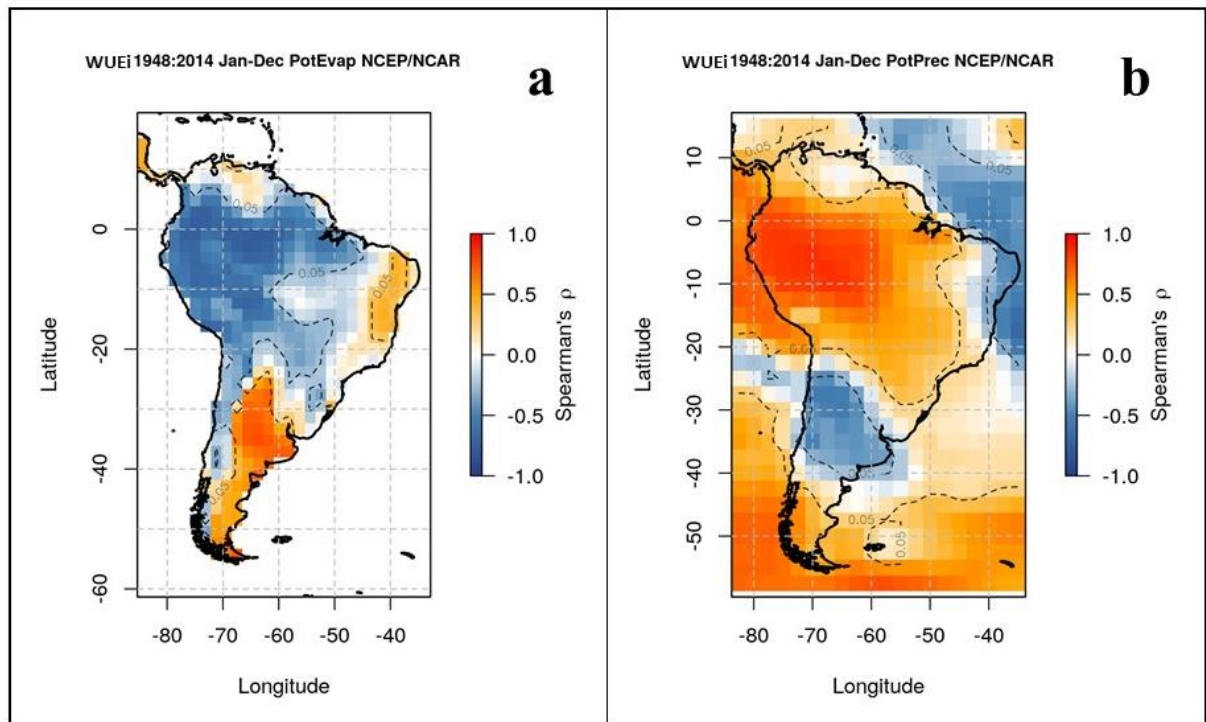
Gráfico 5: Gráfico do modelo de regressão linear entre  $WUE_i$  e o  $CO_2$  atmosférico.



Fonte: O autor, 2020.

Os mapas de correlação do  $WUE_i$  (figura 13) mostraram uma correlação negativa e significativa com o potencial de evaporação das regiões amazônica e centro-oeste do Brasil, áreas de influência das Zonas de Convergência Intertropical e do Atlântico Sul. Há também uma relação positiva e significativa com o potencial de precipitação da mesma região.

Figura 8: Mapas de Correlação,  $WUE_i$  comparado à evaporação potencial (a) e à precipitação potencial (b).

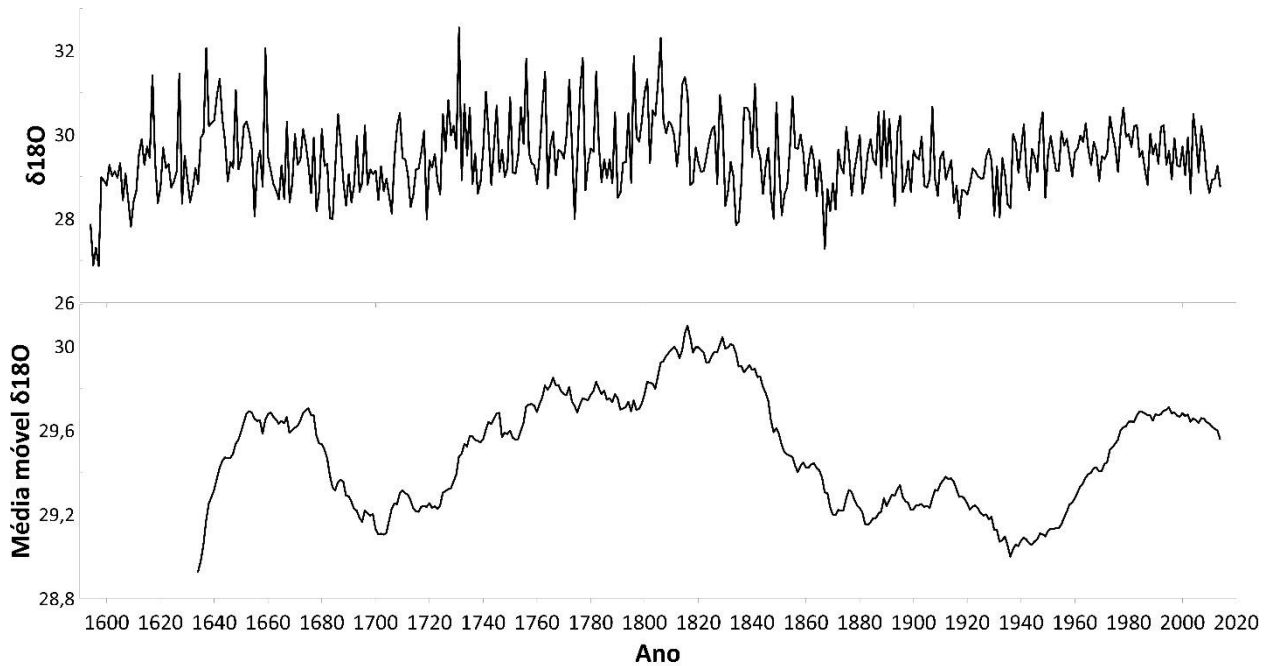


Fonte: O autor, 2021.

### 3.3 Isótopos de Oxigênio

A série histórica de  $\delta^{18}\text{O}$  (Figura 14) apresenta um comportamento único, sua tendência, obtida através de média móvel de 41 pontos mostra períodos alternados de alta e baixa nos valores de  $\delta^{18}\text{O}$ , que não coincidem com a alternância de eventos de liberação e supressão das séries de  $TRWi$  e  $BAI$ .

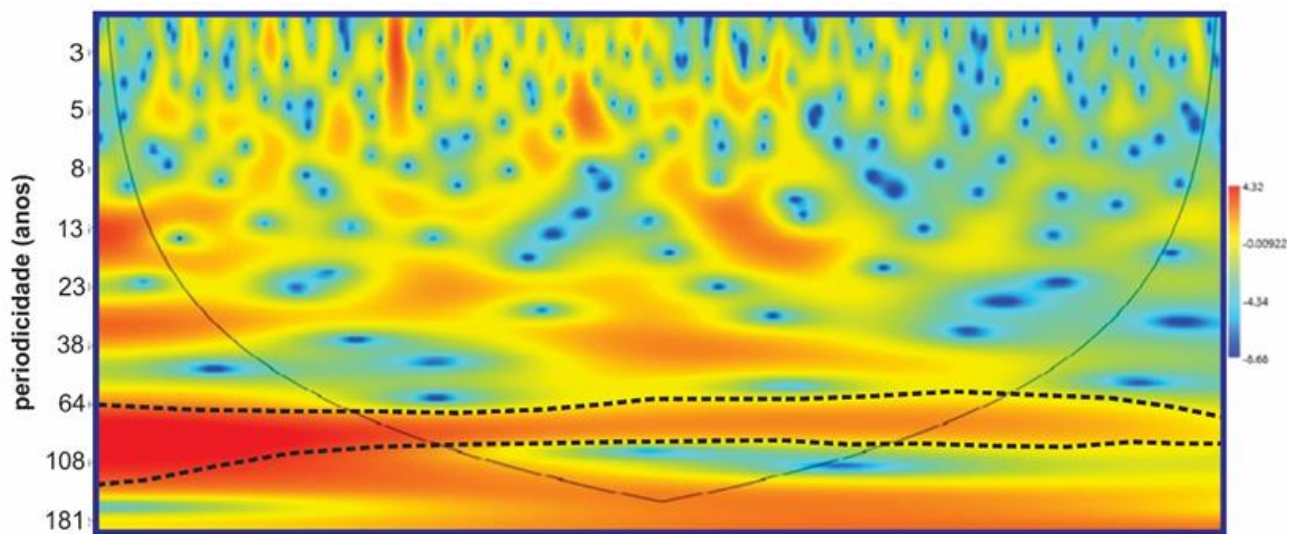
Gráfico 6: Série histórica de  $\delta^{18}\text{O}$  e média móvel de 41 pontos da série histórica.



Fonte: O autor, 2020.

O teste de periodicidade para o  $\delta^{18}\text{O}$  (Figura 15), realizado através de análise de ondeleta, revelou uma periodicidade significativa de 64 a 100 anos.

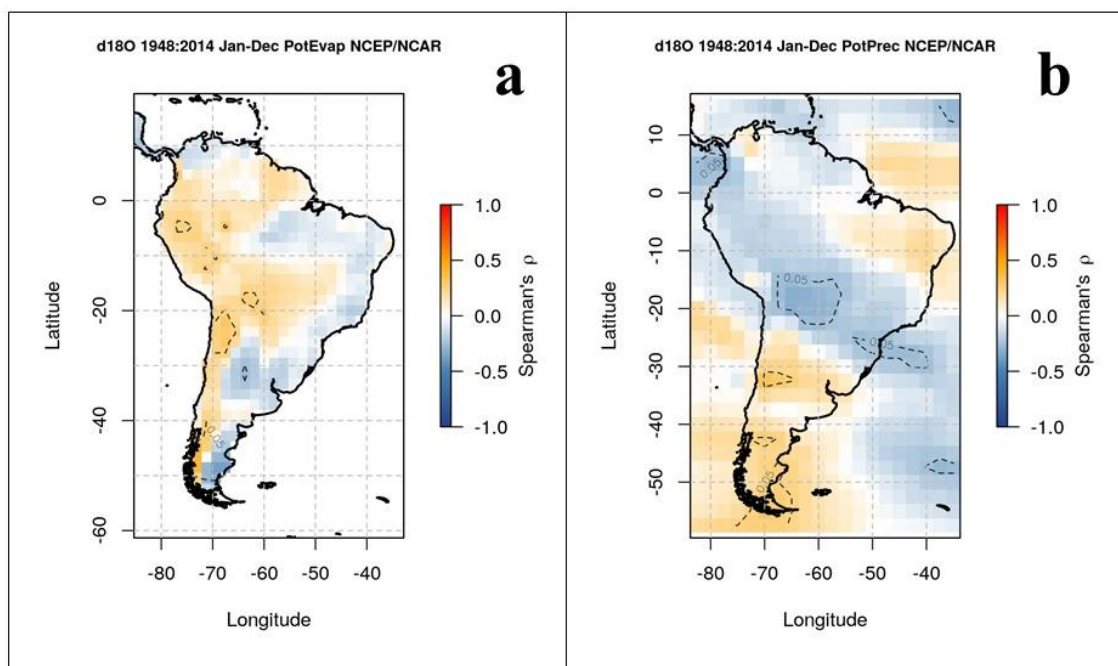
Gráfico 7: Ondeleta para série histórica de  $\delta^{18}\text{O}$ .



Fonte: O autor, 2020.

Os mapas de correlação de  $\delta^{18}\text{O}$  (Figura 16) mostraram alguns pontos de correlação significativa para evaporação potencial no Oeste da América do Sul, na região da Cordilheira dos Andes e uma área maior de correlação significativa para precipitação potencial sobre a área do Pantanal e sobre o norte do estado do Rio Grande do Sul e todo o estado de Santa Catarina, abrangendo a área de coleta.

Figura 9: Mapas de Correlação,  $\delta^{18}\text{O}$  comparado à evaporação potencial (a) e à precipitação potencial (b).



Fonte: O autor, 2021.

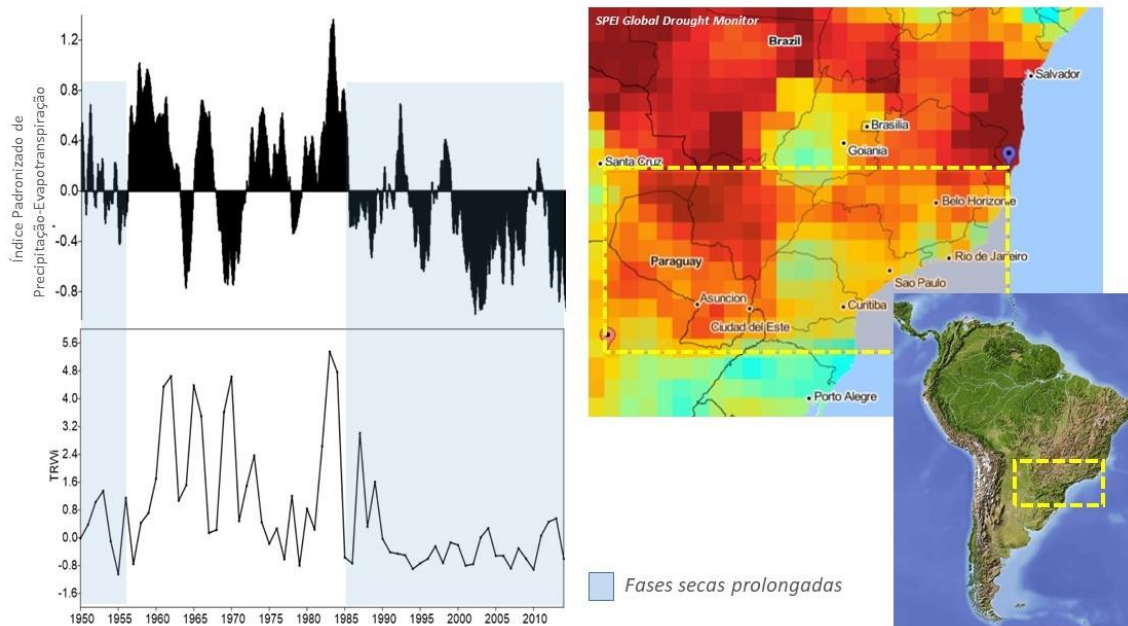
#### 4. DISCUSSÃO

Recentemente, estudos ao redor do globo vem testando os efeitos de uma atmosfera mais rica em CO<sub>2</sub> sobre os organismos vegetais, em especial sobre as árvores. Apesar de contraintuitivo esses estudos revelam que uma atmosfera cada vez mais rica em CO<sub>2</sub> não tem resultado em um aumento significativo da taxa de crescimento das árvores, apesar de ter elevado significativamente a eficiência intrínseca do uso da água (*WUEi*) (Silva, 2009. 2010. Tognetti, 2014 Van der Sleen, 2015).

O arrefecer do crescimento vegetal a despeito de uma atmosfera mais rica em CO<sub>2</sub> é atribuído a mudanças na temperatura e nas dinâmicas hídricas causadas pelas mudanças climáticas recentes. (Silva 2010; Peñuelas 2011; Van der Sleen 2015). No entanto, os resultados encontrados neste estudo para a *A. angustifolia* demonstram um aumento tanto no índice de largura de anel (*TRWi*) quanto no incremento basal da área de lenho (*BAI*) à medida que o CO<sub>2</sub> atmosférico e a eficiência do uso da água (*WUEi*) aumentam.

O recente impulso nas taxas de crescimento da *A. angustifolia* nos últimos 150 anos pode estar relacionado a combinação de uma atmosfera mais rica em CO<sub>2</sub> com condições climáticas favoráveis encontradas na região, mesmo com o aumento da temperatura média global. Apesar de uma atmosfera mais fértil em CO<sub>2</sub>, os últimos 24 anos da série dendrocronológica foram marcados por uma baixa taxa de crescimento, devido, provavelmente, à seca intensa desse período, como demonstrado pelo Monitor Global de Secas (Figura 17), ferramenta desenvolvida por Vicente-Serrano (2010) para acompanhar as taxas de precipitação e temperatura em escalas local e global.

Figura 10: Gráfico do Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração<sup>6</sup>, *SPEI*, em comparação ao gráfico do Índice de largura do anel, *TRWi*.



Fonte: <https://spei.csic.es/index.html>

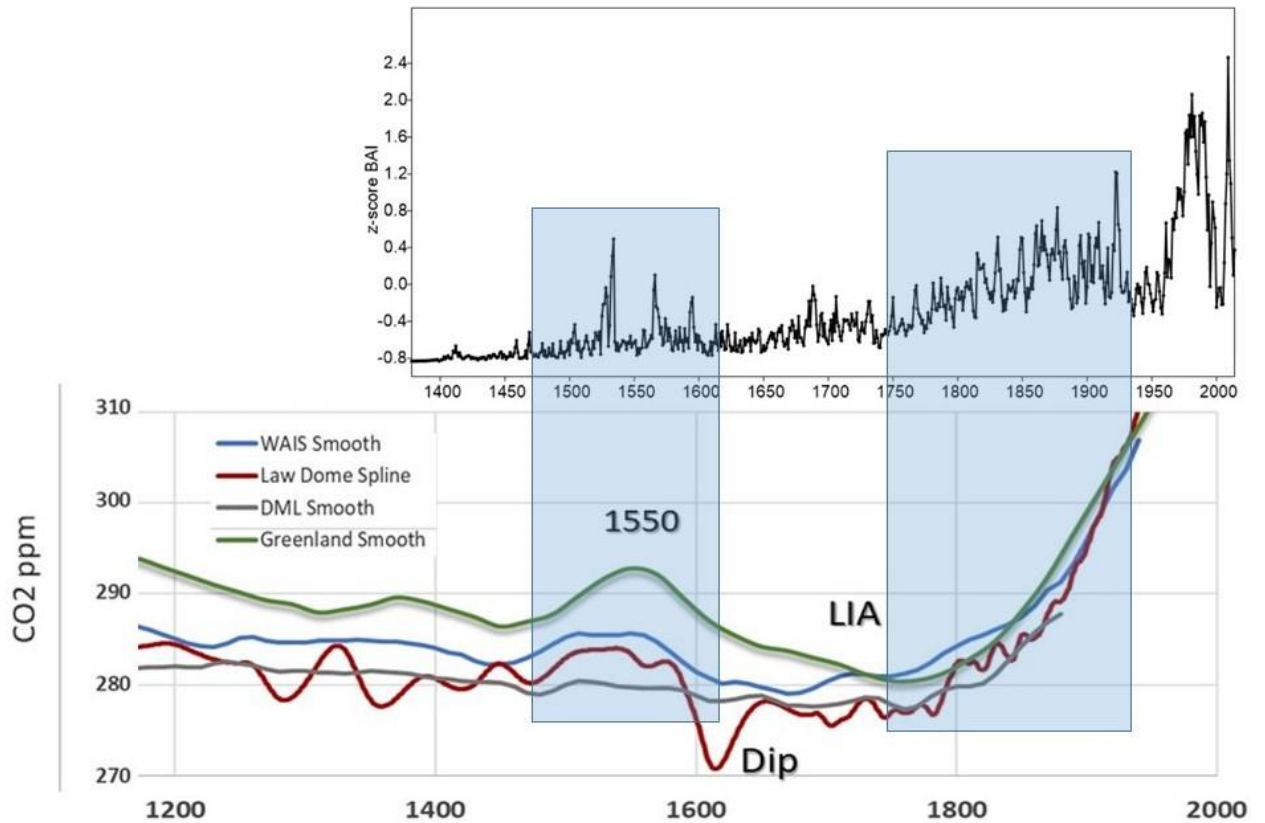
Legenda: Índice *SPEI* obtido a partir de dados de temperatura e precipitação do Monitoramento Global de Secas.

Apesar da alternância entre períodos de supressão e liberação, as séries mostram uma tendência de aumento a longo prazo no *TRWi* e no *BAI*. Como pode-se observar na figura 18, o *BAI*, em especial, se assemelha muito a tendência dos dados de  $\text{CO}_2$  atmosférico, principalmente quando considera-se o período de 1378 a 1950, onde é possível notar elevados níveis de  $\text{CO}_2$  atmosférico durante os períodos de maior taxa de incremento anual do lenho. Essas observações contrariam resultados encontrados por Silva (2009),(2010) e por Van der Sleen (2015), que verificaram uma queda na taxa de crescimento anual das árvores a despeito do aumento do  $\text{CO}_2$  atmosférico.

<sup>6</sup>Consultado em: <https://spei.csic.es/index.html>



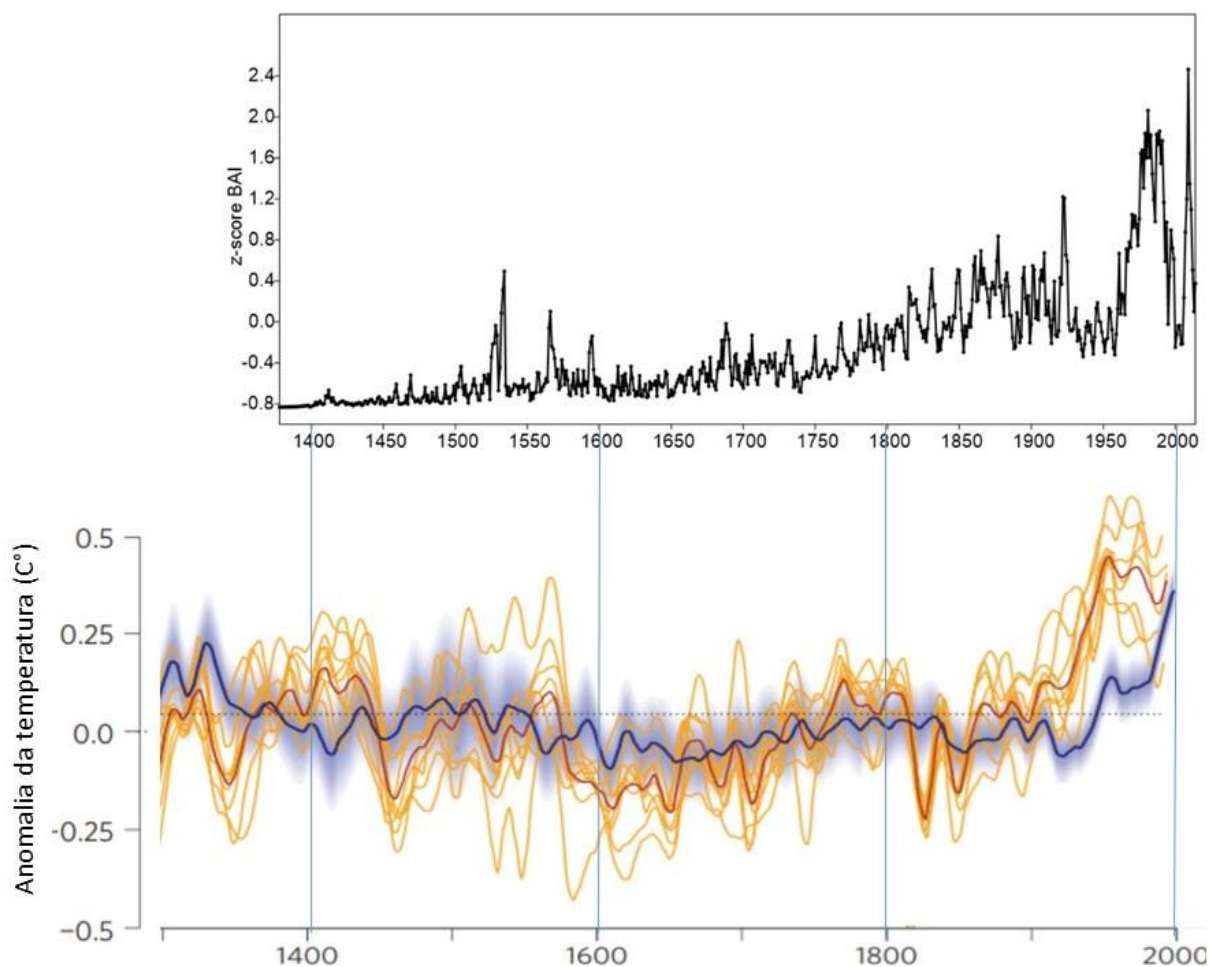
Gráfico 8: *BAI* em comparação ao CO<sub>2</sub> atmosférico.



Legenda: *WAIS* - *West Antarctica Ice Sheet* (Geleira Oeste da Antártica,) (Bauska, 2015. Ahn, 2012), *LAW Dome* (Leste da Antártica) (Rubino 2013), *DML* - *Dronning Maud Land* (Continente Antártico entre *West Antarctica Ice Sheet* e *Law Dome*) (Siegenthaler 2005) e Groelândia (Barnola 1995). Fonte: O autor, 2021.

A taxa de incremento de lenho (*BAI*) também parece alinhada com o aumento da anomalia de temperatura global, como demonstrado na figura 19.

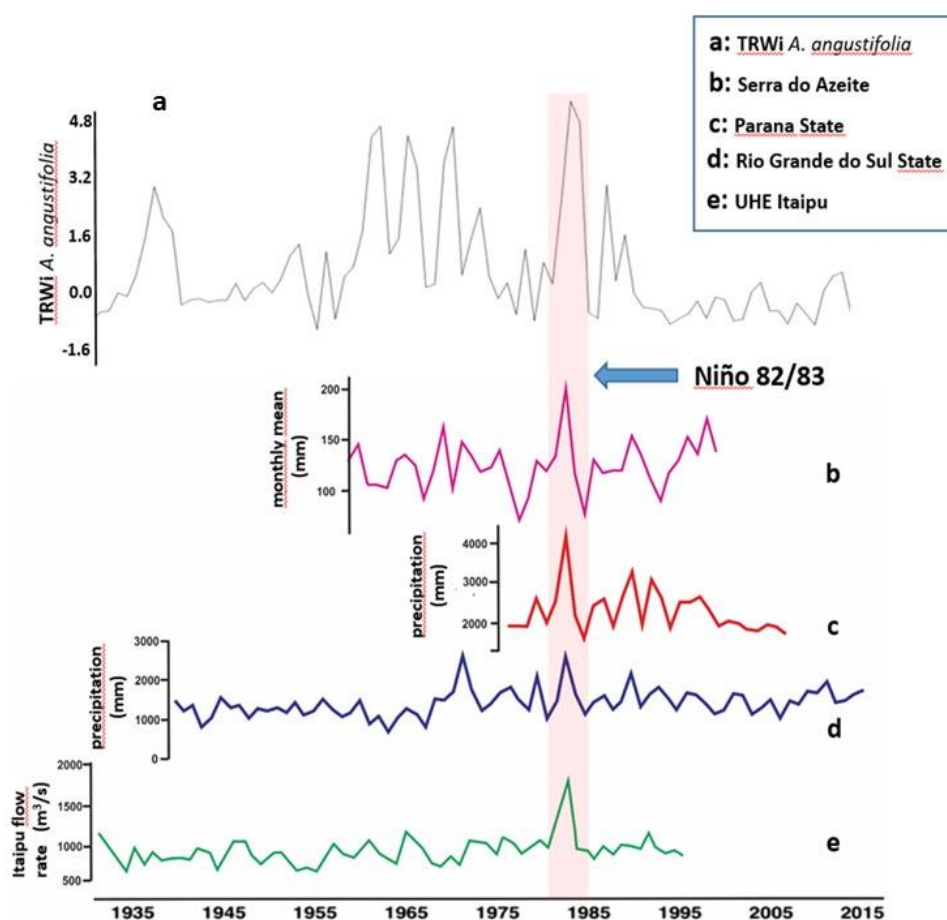
Gráfico 9: Série histórica de *BAI* em comparação a reconstruções de anomalia da temperatura dos últimos 1000 anos



Legenda: . Reconstrução da anomalia média da temperatura do hemisfério sul (linha azul), reconstrução da anomalia média da temperatura do hemisfério norte (linha vermelha) e reconstruções da anomalia média da temperatura utilizando diversos *proxys* climáticos de ambos os hemisférios (linhas amarelas). Para essas reconstruções foram utilizados dados de corais, testemunhos de sedimento marinho e lacustre, testemunhos de gelo, anéis de crescimento de árvores e espeleotemas (Neukom et al. 2014). Fonte: O autor, 2021.

Os maiores valores de *TRWi* e *BAI* da série histórica correspondem aos anos de 1983 e 1984, o que coincide com anos de intensa atividade de *El Niño* que atuou na região Sul do Brasil. A Figura 20 mostra uma compilação de vários dados hidrológicos para o Sul do Brasil e os correspondentes valores de *TRWi*. Fica evidente a marcante resposta das araucárias ao grande *El Niño* de 82/83, mostrando que pelo menos os grandes eventos de precipitação na região podem ser bem representados pelo parâmetro *TRWi*. Entretanto, os dados também mostram que a interpretação do *TRWi* não é linearmente dependente da precipitação e que outros parâmetros, ainda não identificados neste estudo, podem atuar sobre os valores de *TRWi*. Um exemplo disso é o grande crescimento entre 1955 e 1965 que a princípio não foi acompanhado por grandes eventos de precipitação

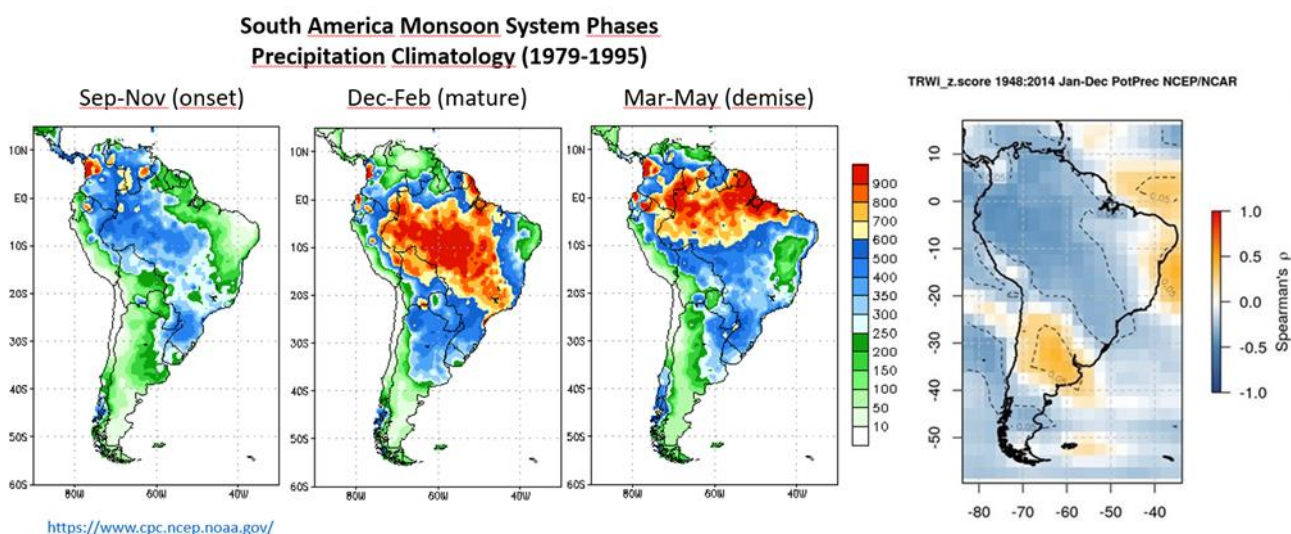
Gráfico 10: *TRWi* comparado a índices de precipitação ligados ao *El Niño*.



Legenda: Dados de *TRWi* da *A. angustifolia* comparados a precipitação em diferentes localidades do sul do Brasil e a vazão da usina de Itaipu. Fonte: O autor, 2021.

Além disso também é possível observar uma correlação positiva significativa com a evaporação potencial do norte amazônico e da cordilheira dos Andes, indicando que o crescimento da *A. angustifolia* no sul do Paraná é influenciada pela umidade transportada pelo sistema ITCZ/SACZ (Figura 21).

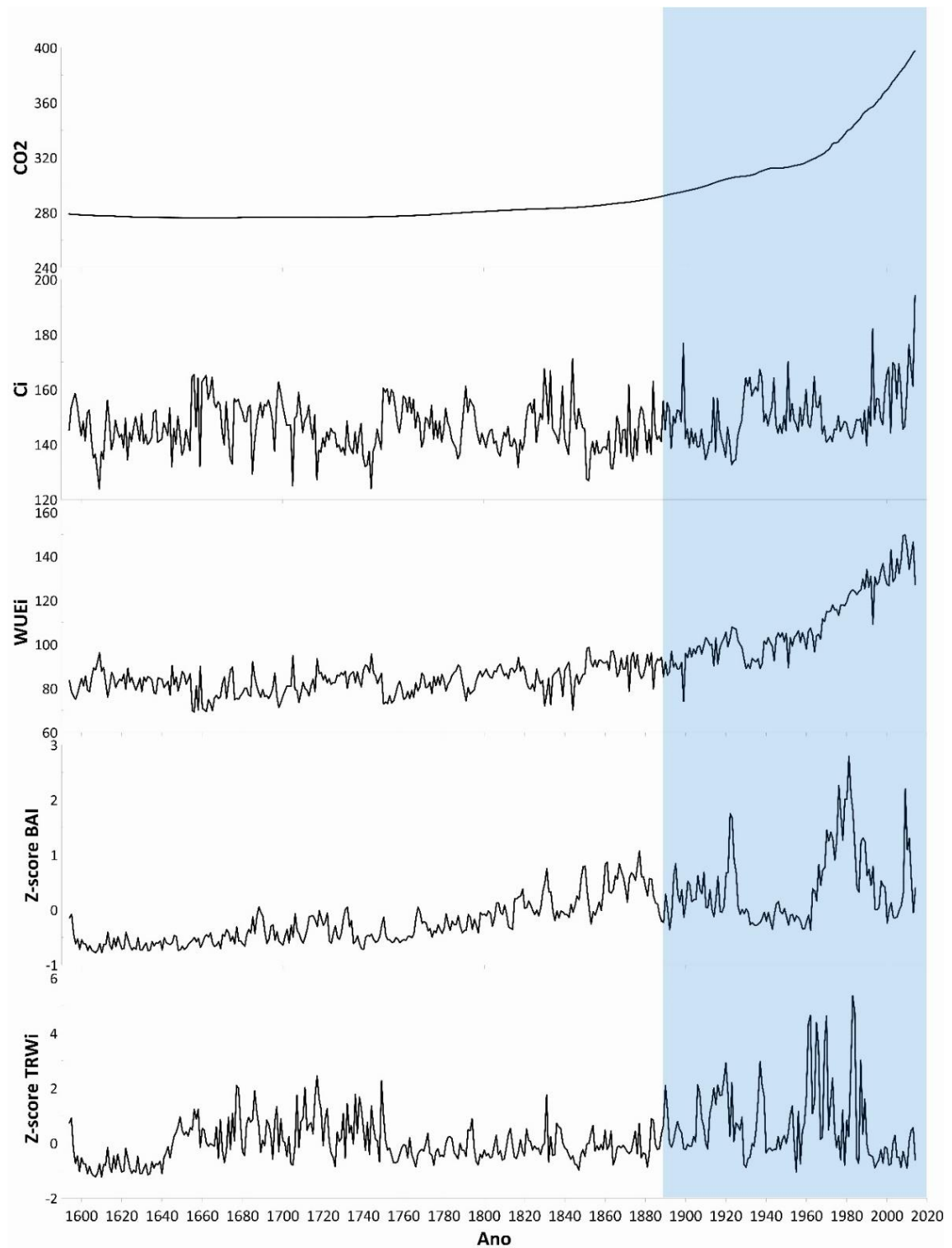
Figura 11: Mapa de Correlação,  $TRW_i$  comparado à precipitação potencial e atividade do sistema de monções da América do Sul<sup>7</sup>.



Fonte: O autor, 2021.

O  $WUE_i$ , por ser diretamente influenciado pela dinâmica de  $CO_2$  atmosférico e  $CO_2$  intrafoliar ( $C_i$ ), também acompanhou a tendência de aumento do  $CO_2$  atmosférico a longo prazo, coincidindo seu aumento nos últimos 150 anos com o aumento nas taxas de crescimento e incremento de lenho (Figura 22).

<sup>7</sup> Consultado em: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/>

Gráfico 11: Gráficos comparando  $TRWi$ ,  $BAI$ ,  $CO_2$  atmosférico,  $CO_2$  intrafoliar e  $WUEi$ .

Legenda: Período recente, mais rico em  $CO_2$  em azul. Fonte: O autor, 2020.

As áreas da América do Sul cuja precipitação e evapotranspiração potencial demonstraram correlação significativa com  $TRWi$ , região Amazônica, Centro-oeste, Sudeste e Sul do Brasil, são regiões por onde passam a Zona de Convergência Intertropical (*ITCZ*) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (*SACZ*). A *ITCZ* leva umidade do Oceano Atlântico para a Região Amazônica, de onde esta é carregada para as regiões Sul e Sudeste via *SACZ*. Esse sistema tem relação com a periodicidade da Oscilação Multidecadal do Atlântico (*AMO*).

As correlações de  $TRWi$  com áreas influenciadas pela *ITCZ* e pela *SACZ* indicam uma influência desse sistema sobre a região de estudo. O sistema *ITCZ/SACZ* leva umidade para o Sul e Sudeste do Brasil, regulando a precipitação nessas regiões e proporcionando condições de crescimento para a *A. angustifolia*.

Em anos de intensa atividade de *El Niño*, é possível que o sistema de jatos subtropicais vindos do oceano pacífico atravesse a cordilheira dos Andes e chegue à região Sul do Brasil, levando a eventos de precipitação extrema e promovendo grandes surtos de crescimento nas árvores, como aqueles observados em 1983 e 1984. Essa dinâmica eventual, ilustrada pelas periodicidades de 2~8 anos da série de  $TRWi$  corrobora resultados semelhantes encontrados por Nordemann (2005), Rigozo (2012) e Prestes (2011; 2018) que apontam para a influência dos ciclos de *El Niño* sobre a *A. angustifolia*

A periodicidade de 64 anos encontrada para a série de  $\delta^{18}O$  também é encontrada para séries de  $\delta^{18}O$  de testemunhos de sedimento do delta do Rio Prata e espeleotemas da Caverna de Botuverá (Chiessi, 2009), e está ligada a periodicidade da Oscilação Multidecadal do Atlântico (*AMO*). Estima-se que a *AMO* tenha influência na posição da *ITCZ*, temperaturas mais altas do Atlântico Norte desviam a *ITCZ* de sua rota sobre a América do Sul, levando a uma redução da umidade que abastece a *SACZ*, diminuindo a umidade e precipitação sobre a região sudeste da América Latina.

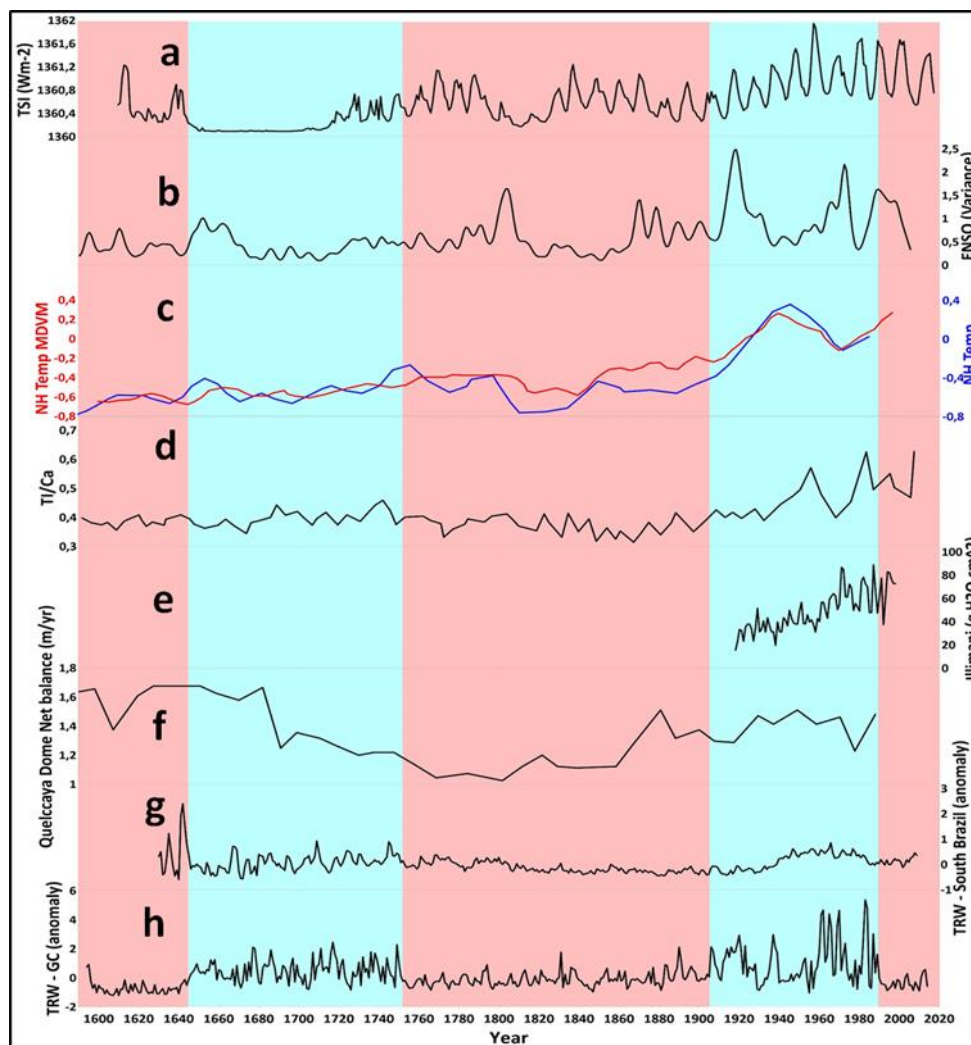
Os mapas de correlação de  $\delta^{18}O$  corroboram os resultados encontrados por Chiessi et al. em 2009, indicando que a umidade e precipitação da Região Sul do Brasil tem origem na Região Amazônica e é transportada via *SACZ*.

Como pode ser observado na figura 23, as fases alternadas de liberação e supressão identificadas para *A. angustifolia* coincidem com as fases de alta e baixa de diversos outros *proxys* na América do Sul (Figura 24), como a irradiação solar total, a Oscilação Sul do *El Niño*, a temperatura do hemisfério norte, a relação titânio/cálcio da foz do Rio Prata



(indicador de vazão do rio), a cobertura de neve da geleira do Illimani e do Quelccaya e segue a tendência geral de outras *A. angustifolia* do sul do Brasil.

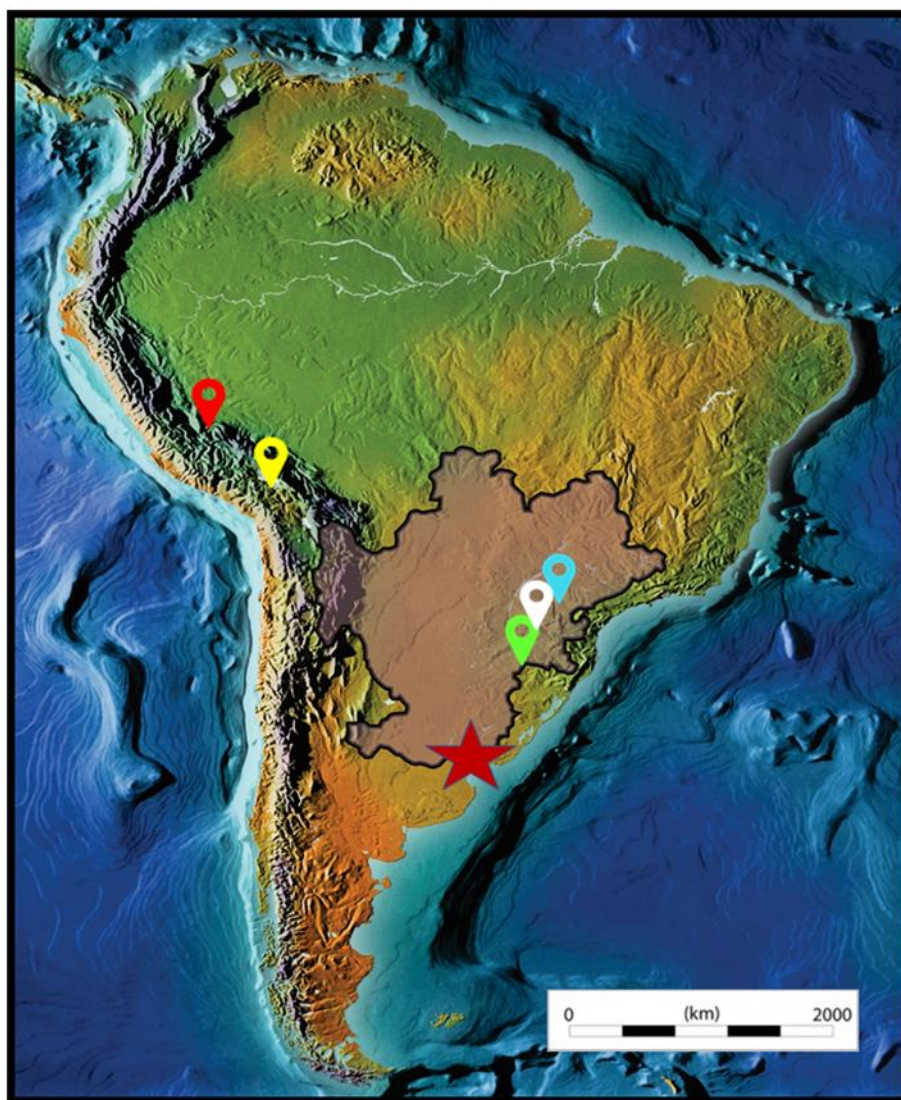
Gráfico 12: Comparação entre o *TRWi* da *A. angustifolia* e diversos outros *proxys* da América do Sul.



Legenda: (a) reconstrução da Irradiação solar total de 1610 a 2017 pelo *Lasp Interactive Solar Irradiance Datacenter (LISIRD)*<sup>8</sup>; (b) *ENSO* reconstruído a partir de anéis de crescimento por Li *et al.* (2013); (c) reconstrução da temperatura do hemisfério norte por Xing *et al.* (2016) (linha vermelha) e Wilson *et al.* (2017) (linha azul); (d) Ti/Ca em testemunhos da foz do Rio Prata por Perez *et al.* (2016); (e) Neve acumulada no cume do Illimani por Correia, (2003); (f) Neve acumulada no cume do Quelccaya por Thompson (2017); (g) Z-score da largura de anéis de crescimento de 44 *A. angustifolia* do sul do Brasil por Lorensi, (2016); (h) Z-score *TRWi* de 5 *Araucaria angustifolia* de General Carneiro – PR. Fonte: O autor, 2019.

<sup>8</sup> Disponível em: <https://lasp.colorado.edu/home/sorce/data/tsi-data/>

Figura12: Localização das áreas de amostragem dos dados expostos na figura 23.



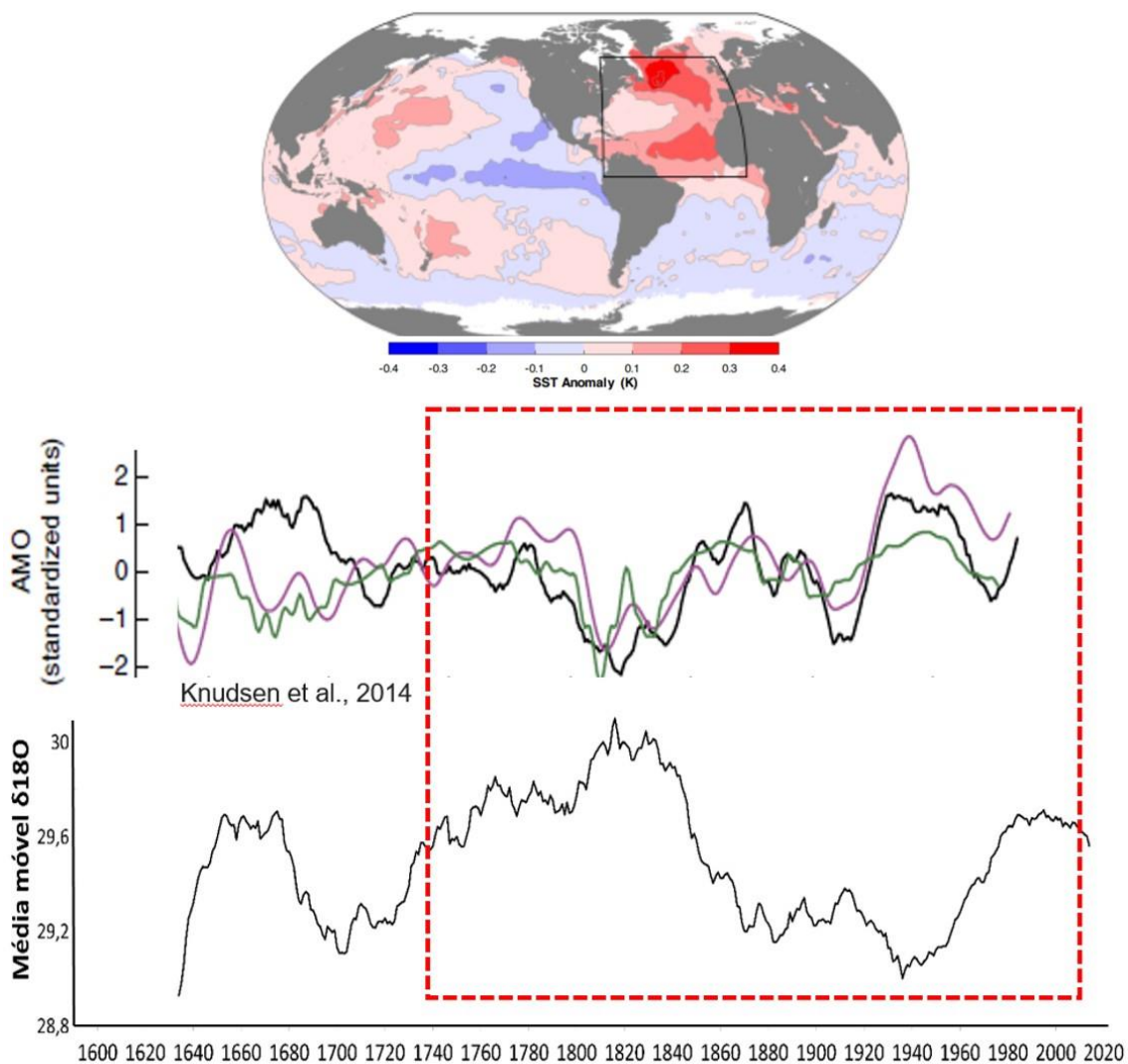
Legenda: Quelcaya (vermelho), Illimani (amarelo), Passo Fundo – RS (verde), Severiano Almeida - RS (branco), General Carneiro – PR (azul), Foz do Rio Prata (estrela vermelha).

Fonte: O autor, 2019.

Um indicativo para a atividade da ITCZ na América do sul é a temperatura da superfície do Atlântico Norte que, quando mais elevada, tende a desviar a ITCZ em direção a América Central (Chiessi et al. 2009). A série de  $\delta^{18}\text{O}$ , como demonstrado na figura 25, possui uma tendência muito semelhante ao padrão de aquecimento e resfriamento das águas do Atlântico Norte (*AMO*), o que pode indicar o mecanismo de influência da *ITCZ/SACZ*, que é potencialmente responsável pela dinâmica de alternância entre períodos de liberação e supressão de crescimento da *A. angustifolia* do sul do Paraná.



Figura13: Média móvel de  $\delta^{18}\text{O}$  comparada a AMO.



Legenda: Média móvel de  $\delta^{18}\text{O}$  comparados a dados de reconstrução de AMO baseada em anéis de crescimento (linha preta), em múltiplos proxy (linha magenta) e em uma combinação de influências solares e vulcânicas (linha verde) (Knudsen et al. 2014). Fonte: O autor, 2021.

## CONCLUSÕES

- O presente estudo conclui, baseado nas séries temporais de anéis de crescimento e isótopos estáveis de *A. angustifolia* do sul do Paraná, que a Região Sul do Brasil possui um regime alternado de fases chuvosas e secas, modulados provavelmente pela atuação da *AMO* sobre o sistema *ITCZ/SACZ*, que se reflete nos padrões de crescimento da *A. angustifolia* e no padrão de variação do  $\delta^{18}\text{O}$ .
- Conclui-se, que apesar do recente declínio na produção primária e crescimento das árvores ao redor do globo, algumas espécies em regiões específicas do mundo podem se beneficiar das mudanças climáticas e de uma atmosfera mais rica em  $\text{CO}_2$ . Em especial para a *A. angustifolia* do sul do Brasil, as dinâmicas hidrológicas e o aumento da temperatura nos últimos 150 anos parecem ter proporcionado condições ideais para o aumento da sua produção primária e crescimento anual. Os principais sistemas que proporcionam essas condições no sul do Brasil são o sistema *ITCZ/SACZ*, ocorrendo ocasionalmente com o fenômeno *El Niño*. Esses dados indicam que a adaptação das árvores a uma atmosfera mais rica em  $\text{CO}_2$ , levando a um aumento da produção primária e maior taxa de crescimento, como proposta por Loyd e Farquhar em 2008, é possível, uma vez que as demais condições climáticas sejam minimamente adequadas.
- As taxas de crescimento das araucárias evidenciaram claramente a fase seca enfrentada pelas regiões sudeste e centro-oeste do país entre 1990 e 2014, mostrando-se um *proxy* eficiente do déficit hídrico regional representado pela relação precipitação- evaporação.
- Os dados de  $\delta^{18}\text{O}$  dos anéis de árvores mostraram resposta a um processo que postula-se iniciar no Atlântico Norte, ou seja, a variabilidade da *AMO* (*Atlantic Multidecadal Oscillation*), que representa as fases quente e fria do Atlântico Norte, que induziria o posicionamento/expansão e intensidade da *ITCZ* e esta modularia o transporte de umidade em direção ao Atlântico Tropical Sul. Daí observarmos uma assinatura da *AMO* na série do  $\delta^{18}\text{O}$ , principalmente após meados do século XVIII.

Uma série dendrocronológica, que inclua análise isotópica tão longa, não possui precedentes para a espécie *Araucaria angustifolia* ou para a Região Sul do Brasil. Reconhece-

se que uma dendrocronologia construída a partir de cinco indivíduos carece de força estatística, devido à baixa amostragem. Ainda assim, as semelhanças dos dados aqui apresentados com as dinâmicas climáticas passadas, conferem certa confiabilidade a relação entre essas árvores e as condições ambientais que as cercam. A resposta da *A. angustifolia* às mudanças climáticas observada neste projeto reforça o seu valor em estudos dendrocronológicos e alavanca o interesse em estudos futuros com a espécie.

## REFERÊNCIAS

AHN, J. et al. Atmospheric CO<sub>2</sub> over the last 1000 years: A high-resolution record from the West Antarctic Ice Sheet (WAIS) Divide ice core. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 26, n. 2, p. 1–11, 2012.

BARNOLA, J. M. et al. CO<sub>2</sub> evolution during the last millennium as recorded by Antarctic and Greenland ice. **Tellus, Series B**, v. 47 B, n. 1–2, p. 264–272, 1995.

BAUSKA, T. K. et al. Links between atmospheric carbon dioxide, the land carbon reservoir and climate over the past millennium. **Nature Geoscience**, v. 8, n. 5, p. 383–387, 2015.

BOETTGER, T. et al. Wood cellulose preparation methods and mass spectrometric analyses of  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ , and nonexchangeable  $\delta^2\text{H}$  values in cellulose, sugar, and starch: An interlaboratory comparison. **Analytical Chemistry**, v. 79, n. 12, p. 4603–4612, 2007.

BROWN, J. H.; VALONE, T. J.; CURTIN, C. G. Reorganization of an arid ecosystem in response to recent climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 94, n. 18, p. 9729–9733, 1997.

Bunn A, Korpela M, Biondi F, Campelo F, Mérian P, Qeadan F, Zang C (2021). dplR: Dendrochronology Program Library in R. R package version 1.7.2.

CAI, W. et al. Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. **Nature Reviews Earth and Environment**, v. 1, n. 4, p. 215–231, 2020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/s43017-020-0040-3>>.

CHIESSI, C. M. et al. Possible impact of the Atlantic Multidecadal Oscillation on the South American summer monsoon. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 21, p. 1–5, 2009.

CINTRA, B. B. L. et al. Contrasting controls on tree ring isotope variation for Amazon floodplain and terra firme trees. **Tree Physiology**, v. 39, n. 5, p. 845–860, 2019.

COOK, E. R. et al. Warm-season temperatures since 1600 BC reconstructed from Tasmanian tree rings and their relationship to large-scale sea surface temperature anomalies. **Climate Dynamics**, v. 16, n. 2–3, p. 79–91, 2000.

COOK, E. R.; Kairiukstis, L. A. *Methods of dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. 1. ed. New York: **Kluwer Academic Publishers**, 1990.

Correia, A. L. Histórico da deposição de elementos traço na Bacia Amazônica Ocidental ao longo do século XX. Tese (Doutorado em física) - Instituto de Física, Universidade de São Paulo, 2003.

Edzer Pebesma (2021). stars: Spatiotemporal Arrays, Raster and Vector Data Cubes. R package version 0.5-3. <https://CRAN.R-project.org/package=stars>.

HOLMES., R. L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. **Tree-ring bulletin**, v. 43, 1983.

icente-Serrano S.M., Santiago Beguería, Juan I. López-Moreno, (2010) A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index - SPEI. **Journal of Climate** 23: 1696-1718.

IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z.

IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

KLANDERUD, K.; BIRKS, H. J. B. Recent increases in species richness and shifts in altitudinal distributions of Norwegian mountain plants. **Holocene**, v. 13, n. 1, p. 1–6, 2003.

KNUDSEN, M. F. et al. Evidence for external forcing of the Atlantic Multidecadal Oscillation since termination of the Little Ice Age. **Nature Communications**, v. 5, p. 1–8, 2014.

LI, J. et al. El Niño modulations over the past seven centuries. **Nature Climate Change**, v. 3, n. 9, p. 822–826, 2013.

LLOYD, J.; FARQUHAR, G. D. Effects of rising temperatures and [CO<sub>2</sub>] on the physiology of tropical forest trees. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1498, p. 1811–1817, 2008.

LORENSI, C.; PRESTES, A. Reconstrução dendroclimática da precipitação da primavera verão para Fazenda Rio Grande, PR, com amostras de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. **Revista Arvore**, v. 40, n. 2, p. 347–354, 2016.

MACFARLING MEURE, C. et al. Law Dome CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O ice core records extended to 2000 years BP. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 14, p. 2000–2003, 2006.

MCCARROLL, D.; LOADER, N. J. Stable isotopes in tree rings. **Quaternary Science Reviews**, v. 23, n. 7–8, p. 771–801, 2004.

NEUKOM, R. et al. Inter-hemispheric temperature variability over the past millennium. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 5, p. 362–367, 2014.

NORDEMANN, D. J. R.; RIGOZO, N. R.; FARIA, H. H. Solar-terrestrial relations observed in South America tree ring records. **Advances in Space Research**, v. 35, n. 5, p. 891–896, 2005.

OLIVEIRA, J. M.; ROIG, F. A.; PILLAR, V. D. Climatic signals in tree-rings of *Araucaria angustifolia* in the southern Brazilian highlands. **Austral Ecology**, v. 35, n. 2, p. 134–147, 2010.

Osmond, C. B.; Björkman O.; Anderson, D.J. Physiological processes in plant ecology. Springer, New York 1980.

PBMC, 2013: Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Sumário Executivo GT1. PBMC, Rio de Janeiro, Brasil.

PEÑUELAS, J.; CANADELL, J. G.; OGAYA, R. Increased water-use efficiency during the 20th century did not translate into enhanced tree growth. **Global Ecology and Biogeography**, v. 20, n. 4, p. 597–608, 2011.

PEREZ, L.; GARCÍA-RODRÍGUEZ, F.; HANEBUTH, T. J. J. Variability in terrigenous sediment supply offshore of the Río de la Plata (Uruguay) recording the continental climatic history over the past 1200 years. **Climate of the Past**, v. 12, n. 3, p. 623–634, 2016.

PRESTES, A. et al. *Araucaria* growth response to solar and climate variability in South Brazil. **Annales Geophysicae**, v. 36, n. 3, p. 717–729, 2018.

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**, v. 73, n. 11–12, p. 1587–1593, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2010.12.014>>.

R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

RATHGEBER, C. B. K.; CUNY, H. E.; FONTI, P. Biological basis of tree-ring formation: A crash course. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, n. MAY2016, p. 1–7, 2016.

REECE, J. B. et al. *Biology: Concepts and Connections*. 9ª edição. Boston. Person Education. 2011

RIGOZO, N. R. et al. Solar-Terrestrial Signal Record in Tree Ring Width Time Series from Brazil. **Pure and Applied Geophysics**, v. 169, n. 12, p. 2181–2191, 2012.

RUBINO, M. et al. A revised 1000 year atmospheric  $\delta^{13}\text{C-CO}_2$  record from Law Dome and South Pole, Antarctica. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 118, n. 15, p. 8482–8499, 2013.

SEIBT, U. et al. Carbon isotopes and water use efficiency: Sense and sensitivity. **Oecologia**, v. 155, n. 3, p. 441–454, 2008.

Sharp, Z. *Principles of Stable Isotope Geochemistry*, 2nd Edition. Open textbook University of New Mexico (2017).

SHEN, S. S. P. et al. Temporal and spatial changes of the agroclimate in Alberta, Canada, from 1901 to 2002. **Journal of Applied Meteorology**, v. 44, n. 7, p. 1090–1105, 2005.

SIEGENTHALER, U. et al. Supporting evidence from the EPICA Dronning Maud Land ice core for atmospheric  $\text{CO}_2$  changes during the past millennium. **Tellus, Series B: Chemical and Physical Meteorology**, v. 57, n. 1, p. 51–57, 2005.

SILVA, L. C. R. et al. Past century changes in *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze water use efficiency and growth in forest and grassland ecosystems of southern Brazil: Implications for forest expansion. **Global Change Biology**, v. 15, n. 10, p. 2387–2396, 2009.

SILVA, L. C. R.; ANAND, M.; LEITHEAD, M. D. Recent widespread tree growth decline despite increasing atmospheric CO<sub>2</sub>. **PLoS ONE**, v. 5, n. 7, 2010.

SPEER, J. H. Fundamentals of tree-ring research. 1. ed. Tucson: University of Arizona Press, 2012.

TEIXEIRA, W. Decifrando a Terra. 2. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2007.

THOMPSON, L. G. Past, Present, and Future of Glacier Archives from the World's Highest Mountains. **Proceedings of the American Philosophical Society**, v. 161, n. 3, p. 226–243, 2017.

TOGNETTI, R. et al. Tree-ring stable isotopes reveal twentieth-century increases in water-use efficiency of *fagussylvatica* and *nothofagus* spp. in Italian and Chilean Mountains. **PLoS ONE**, v. 9, n. 11, 2014.

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.

VAN DER SLEEN, P. et al. No growth stimulation of tropical trees by 150 years of CO<sub>2</sub> fertilization but water-use efficiency increased. **Nature Geoscience**, v. 8, n. 1, p. 24–28, 2015.

WILSON, R. et al. Last millennium northern hemisphere summer temperatures from tree rings: Part I: The long term context. **Quaternary Science Reviews**, v. 134, p. 1–18, 2016.

XING, P. et al. The extratropical northern hemisphere temperature reconstruction during the last millennium based on a novel method. **PLoS ONE**, v. 11, n. 1, p. 1–19, 2016.