

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOLOGIA
NÍVEL MESTRADO**

BRUNA BORNE ARENHARDT

**SINAIS DENDROCLIMÁTICOS DE *Araucaria angustifolia* (BERTOL.) O. KUNTZE
EM SÍTIOS ECOLOGICAMENTE SEMELHANTES**

São Leopoldo

2023

BRUNA BORNE ARENHARDT

**SINAIS DENDROCLIMÁTICOS DE *Araucaria angustifolia* (BERTOL.) O. KUNTZE
EM SÍTIOS ECOLÓGICAMENTE SEMELHANTES**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Biologia, pelo Programa de Pós-Graduação em Biologia da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Juliano Morales de Oliveira

São Leopoldo

2023

A681s Arenhardt, Bruna Borne.

Sinais dendroclimáticos de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze em sítios ecologicamente semelhantes / Bruna Borne Arenhardt. – 2023.

47 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Biologia, 2023.

“Orientador: Prof. Dr. Juliano Morales de Oliveira”

1. Condições de sítio. 2. Dendrocronologia. 3. Enso. 4. Subtropical. I. Título.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária: Silvana Dornelles Studzinski – CRB 10/2524)

BRUNA BORNE ARENHARDT

**SINAIS DENDROCLIMÁTICOS DE *Araucaria angustifolia* (BERTOL.) O. KUNTZE
EM SÍTIOS ECOLOGICAMENTE SEMELHANTES**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Biologia, pelo Programa de Pós-Graduação em Biologia da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Aprovado em (dia) (mês) (ano)

BANCA EXAMINADORA

Dr. Juliano Morales de Oliveira – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Dr. Arno Fritz das Neves Brandes – Universidade Federal Fluminense

Dr. Fidel Alejandro Roig – Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales

AGRADECIMENTOS À CAPES

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Dedico esse trabalho a minha filha Ana Julia Borne Arenhardt e ao meu esposo Nilmar Luís Arenhardt por estarem sempre ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais **Juarez Borne** e **Ana Lira de Souza Borne**, que são minha base, meus exemplos de vida! Provenientes de família humilde e sem estudos, mas com valores maiores que o mundo. Sempre me motivaram a correr atrás dos meus propósitos, e ensinaram que, o estudo é o melhor caminho para a realização dos nossos sonhos! Amo muito vocês!!

A minha filha **Ana Júlia Borne Arenhardt** por ser meu maior e melhor presente! Você me ensinou o que é o amor! Durante esses dois anos, sempre estive ao meu lado e me mostrando que o amor supera tudo! Minha vida, mamãe te ama muito!

Ao meu esposo **Nilmar Luís Arenhardt**, que me motiva a seguir meus sonhos, sempre ao meu lado nas decisões mais importantes da minha vida! Nessa nossa longa caminhada juntos, é e sempre será minha maior inspiração! Obrigada por estar comigo nos bons e maus momentos, principalmente nos maus!! Só tenho a agradecer pela paciência durante esse período que foi extremamente desgastante e desafiador, nunca desistiu de mim! Saiba que tudo o que sou hoje, é graças a você! Te amo muito!

A pessoa mais especial e diferente de mim, minha amiga e irmã **Gabriela Morais Olmedo**, que entrou na minha vida para somar, e que sem ela, eu não teria chegado até aqui! Obrigada por me apoiar, me aconselhar, e me colocar de volta ao rumo. Obrigada pela paciência, pelo afeto e principalmente por ser a melhor professora desse mundooo! Te amo muito minha melhor amiga!

As gurias mais incríveis que conheço, **Amanda Bauer**, **Andressa Adolfo**, **Caroline Bruckmann** e **Natascha Horn**, que durante esses dois anos me fizeram rir, chorar (o que não é difícil), e me mostraram que ter uma rede de apoio muda tudoooo! Espero que tenhamos muitos milkshakes e balyzinhos para tomar juntas!

Um agradecimento em especial ao professor **Dr. Marcelo Scipioni**, pela disponibilização do material, pelo suporte e por todo apoio dado por meio do projeto

- Dendrocronologia de árvores gigantes de *Araucaria angustifolia* com datação pelos anéis de crescimento por meio de incrementos parciais e totais (CNPq: 423912/2018-6) para o desenvolvimento deste estudo, você é uma parte integral deste trabalho! Muito Obrigada!

Por último, mas muito importante, agradeço ao meu professor e orientador **Dr. Juliano Morales de Oliveira**, por toda dedicação e principalmente paciência em ensinar uma pessoa que caiu de paraquedas nessa área! Espero que venham mais trabalhos juntos! Muito Obrigada!

RESUMO

Estudos dendrocronológicos têm cada vez mais explorado árvores tropicais e subtropicais, principalmente, enfocando seus sinais climáticos. Nos neotrópicos, cronologias de largura de anéis de crescimento de *Araucaria angustifolia* têm sido desenvolvidas em várias localidades em sua área de distribuição no Sul da Mata Atlântica. Contudo, os sinais identificados nos estudos não indicam um claro padrão de resposta de crescimento ao clima. Entender as causas da variabilidade de sinais dendroclimáticos é relevante para direcionar os estudos dendrocronológicos nessa espécie. O presente trabalho testa a premissa de que em sítios independentes, mas sob condições ambientais semelhantes, cronologias de *A. angustifolia* apresentam um sinal de crescimento comum determinado por condições climáticas limitantes. Uma nova cronologia de largura de anéis foi desenvolvida e comparada a outra preexistente, em Curitiba/SC, ambas sob condições climáticas, edáficas e vegetacionais similares. As cronologias apresentaram bom nível interno de sincronismo e de esforço amostral. Suas árvores tiveram trajetórias de crescimento parecidas. As cronologias apresentaram sinal comum significativo, com moderada magnitude. Esse padrão de crescimento comum, representado por uma cronologia regional, apresentou sinais dendroclimáticos significativos com variáveis climáticas locais e teleconexões com El Niño Oscilação Sul (ENSO), todos de magnitude fraca. Correlações parciais demonstraram que este conjunto de variáveis climáticas foi determinante do sinal comum entre os sítios. Os resultados confirmam a validade da premissa testada. Sob as condições estudadas, a resposta de crescimento de *A. angustifolia* ao clima decorre de variações locais na disponibilidade hídrica e de temperatura, que operam em diferentes fases do ciclo anual de crescimento e são, em algum grau, determinadas pelo ENSO. Essa baixa sensibilidade de crescimento ao clima, possivelmente, está relacionada à influência conjunta desses múltiplos fatores e/ou à moderada variabilidade de crescimento dentro dos sítios. Recomenda-se que futuros estudos dendroclimáticos com espécie se baseiem na comparação mais de um sítio, com cronologias robustas e replicando condições ecológicas comparáveis, a fim de evitar vieses experimentais decorrentes de erros de datação e da interação entre fatores locais com o clima sobre o crescimento.

Palavras-Chave: dendrocronologia; subtropical, ENSO, condições de sítio.

ABSTRACT

Dendrochronological studies have increasingly explored tropical and subtropical trees, mainly focusing on their climatic signs. In the Neotropics, growth ring width chronologies of *Araucaria angustifolia* have been developed at several localities in its range in the southern Atlantic Forest. However, the signals found in the studies do not show a clear pattern of growth response to climate. Understanding the causes of variability in dendroclimatic signals is relevant to direct dendrochronological studies in this species. The present work tests the premise that at independent sites but under similar environmental conditions, chronologies of *A. angustifolia* exhibit a common growth signal determined by limiting climatic conditions. A new ring width chronology was developed and compared to another preexisting one, in Curitiba/SC, both under similar climatic, edaphic and vegetational conditions. The chronologies showed good internal level of synchronism and sampling effort. The trees had similar growth trajectories. The chronologies showed significant common signal, with moderate size. This common growth pattern, represented by a regional chronology, showed significant dendroclimatic signals with local climate variables and teleconnections with El Niño Southern Oscillation (ENSO), all weak size. Partial correlations showed that this set of climate variables was the determinant of the common signal between the sites. The results confirm the validity of the tested premise. Under the conditions studied, the growth response of *A. angustifolia* to climate arises from local variations in water and temperature availability, which operate at different stages of the annual growth cycle and are, to some degree, determined by ENSO. This low sensitivity of growth to climate is possibly related to the joint influence of these multiple factors and/or to the moderate variability of growth within sites. It is recommended that future dendroclimatic studies with species be based on comparing more than one site, with robust chronologies and replicating comparable ecological conditions, to avoid experimental biases arising from dating errors and the interaction between local factors with climate on growth.

Keywords: dendrochronology; subtropical, ENSO, site conditions.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	11
REFERÊNCIAS	16
SINAIS DENDROCLIMÁTICOS DE <i>ARAUCARIA ANGUSTIFOLIA</i> (BERTOL.) O. KUNTZE EM SÍTIOS ECOLOGICAMENTE SEMELHANTES	21
INTRODUÇÃO.....	21
METODOLOGIA	24
Sítios de estudo	24
Coleta e preparação das amostras	26
Datação-cruzada	26
Trajetórias de crescimento.....	28
Índices de largura de anéis	28
Sinal comum entre os sítios.....	29
Sinais dendroclimáticos	29
RESULTADOS	30
Datação-cruzada de CBS2.....	30
Trajetórias de crescimento.....	32
Cronologias médias.....	33
Sinais dendroclimáticos	35
DISCUSSÃO.....	37
CONCLUSÃO	41
REFÊRENCIAS	41
APÊNDICE	48

INTRODUÇÃO GERAL

Dendrocronologia (*dendron*, madeira; *chronos*, tempo; e *logus*, estudo) é a disciplina científica que investiga sobre o desenvolvimento das plantas e/ou os fatores (biológicos e abióticos) associados através da datação e mensuração dos anéis de crescimento do xilema (SCHWEINGRUBER, 1996). A partir do reconhecimento sobre a formação de anéis anuais em espécies da flora tropical, estudos dendrocronológicos têm se expandido para além de regiões boreais e temperadas (BOTOSSO; VETTER, 1991; LUCHI, 1998; MATTOS et al., 1999; BOTOSSO et al., 2000; TOMAZELLO-FILHO et al., 2000; 2001a; ROZENDAAL; ZUIDEMA, 2011; SCHÖNGART et al., 2017). Nas florestas temperadas, a formação dos anéis está relacionada com alternância de estações restritivas (temperaturas frias) e favoráveis (temperaturas amenas) ao crescimento. Já em florestas tropicais e subtropicais, os fatores são mais diversificados, podendo ser estações de seca e de chuva, de inundações e de vazantes, ou mesmo de temperatura fria e de temperatura amena (BOTOSSO; MATTOS, 2002).

A água é essencial para os processos biológicos (CAMPOS, 1970), e nas florestas tropicais e subtropicais, esse fator é o determinante na formação dos anéis de crescimento em diversas espécies, como em *Macrolobium acaciifolium* (SCHÖNGART et al., 2005), *Hevea spruceana* e *Garcinia brasiliensis* (MARINHO, 2013), que nas regiões de várzea e igapós da Amazônia formam anéis devido a alternância entre os períodos de inundações e seca. Nas áreas de terra firme a sazonalidade de precipitação se torna um fator importante, sendo relacionada à periodicidade dos anéis nos biomas Amazônia (TOMAZELLO-FILHO et al., 2000), na Mata Atlântica (OLIVEIRA et al., 2010; SOUZA et al., 2006; CALLADO; GUIMARÃES, 2010) e no Pantanal (MATTOS et al., 2004). A sazonalidade térmica em subtropicais também se mostra como o fator determinante na formação dos anéis de diversas espécies, tais como: *Cedrela fissilis*, *Araucaria angustifolia*, *Campomanesia xanthocarpa*, *Cinnamomum vesiculosum*, *Prunus brasiliensis*, *Ocotea porosa* e *Matayba elaeagnoides* (DÜNISCH, 2005; FIGUEIREDO-FILHO et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2010; STEPKA, 2012; SCIPIONI et al., 2021), entre outras.

No entanto, projeções de mudanças climáticas globais indicam impactos extremos provocando alterações nos regimes pluviais, assim como aumento da temperatura, que irão incidir em mudanças no funcionamento e dinâmica dos ecossistemas (IPCC, 2022). Portanto, estudos dendrocronológicos representam grande importância para o entendimento sobre a dinâmica florestal (FRITTS, 1976; COOK; PEDERSON, 2011). Logo, uma espécie com importante potencial dendrocronológico é a conífera *A. angustifolia*, presente no bioma Mata Atlântica especificamente nas formações de Floresta Ombrófila Mista. Esta espécie apresenta anéis de crescimento demarcados por diferenças no lúmen e espessamento das paredes dos traqueídes (OLIVEIRA et al., 2009).

A Floresta Ombrófila Mista, vulgarmente conhecida como mata de araucárias, está presente na região Sul do Brasil, abrangendo os Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, ela também aparece em áreas menores em Minas Gerais e São Paulo. Nessa fitofisionomia, são registradas diversas espécies das famílias Anacardiaceae, Lauraceae, Aquifoliaceae, Myrtaceae e Salicaceae, entretanto, *A. angustifolia* é considerada a espécie dominante (CARLUCCI, 2011). Nas áreas de ocorrência da Floresta Ombrófila Mista o clima é predominantemente subtropical úmido, com invernos frios e verões amenos ou quentes, com temperaturas médias em torno de 11,5°C e 21°C, respectivamente (REITZ, 1966; CARVALHO, 2003; HUECK, 1972).

A. angustifolia é considerada uma espécie de alto valor econômico e ecológico na Floresta Ombrófila Mista (BOGONI et al., 2020), uma vez que possui madeira de alta qualidade, atinge o dossel da floresta (CARVALHO, 2003; LORENZI, 1992), produz uma semente rica em nutrientes o que contribui na dieta da fauna local (ORELLANA; VANCLAY, 2018), além de formar uma considerável biomassa de serapilheira (GUGLIELME; GANADE, 2006). Porém, as matas de araucárias foram demasiadamente exploradas, principalmente nas décadas de 1960 a 1970, diminuindo drasticamente sua abrangência. Atualmente a espécie está classificada como “em perigo (EN)” no livro vermelho da flora do Brasil (MARTINELLI; MORAES, 2013).

A partir disso, os estudos dendrocronológicos em *A. angustifolia* tem se expandindo, e são desenvolvidos em diferentes localidades ao longo no Sul do Brasil. A maioria localiza-se na faixa Central dessa região, porém há registros na região Sudeste e no Oeste na Argentina. A partir disso, inúmeras cronologias estão sendo desenvolvidas em diferentes localidades no Sul do Brasil, concentrando-se na região da Floresta Ombrófila Mista (Figura 1).

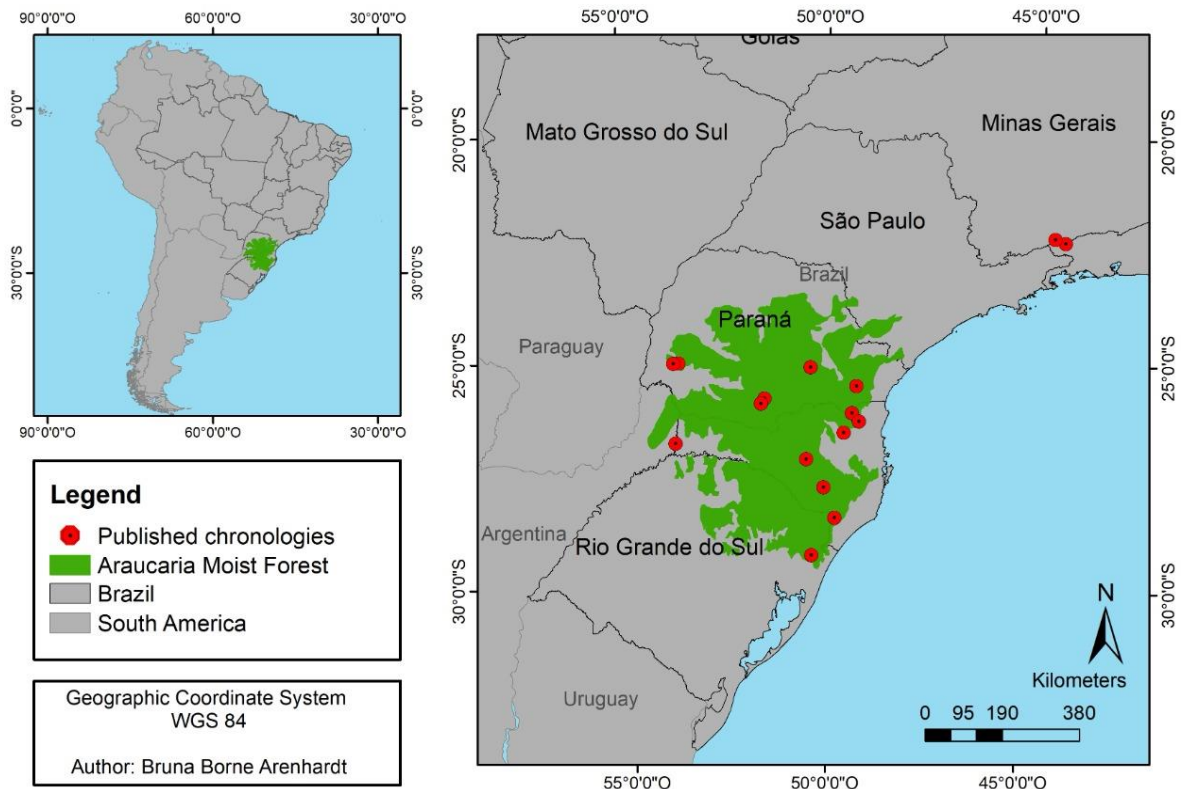


Figura 1. Localização das cronologias de *Araucaria angustifolia* publicadas em periódicos científicos.

Quanto ao esforço amostral dessas cronologias (Figura 1), em média foram utilizadas 18 árvores, podendo variar de 4 (LORENSI; PRESTES, 2018) até 50 (OLIVEIRA et al., 2017) amostras. Referente a extensão, há cronologias com árvores jovens, entre 27 (SCIPIONI et al., 2021) a 39 anos (MARCON et al., 2018), e cronologias mais longevas, alcançado até de 171 anos (Brandes et al., 2021). Os índices utilizados para avaliar o grau de sincronismo das cronologias foram variados entre os trabalhos publicados, sendo o índice de intercorrelação média (HOLMES, 1983) o mais comumente empregado, com variação dos valores de $r = 0,23$ (CATTANEO et al., 2013) à $r = 0,57$ (OLIVEIRA et al., 2010) (Figura 2).

Para avaliar sinais dendroclimatológicos, os autores costumam testar a variação de índices de largura dos anéis de crescimento com séries instrumentais de temperatura e precipitação, para estações de crescimento prévia e corrente, uma vez que, os fatores ambientais do ano anterior podem ser prolongados até a próxima estação de crescimento (FRITTS, 1976). De modo geral, os sinais climáticos foram muito diversos entre as cronologias (OLIVEIRA et al., 2010; CATTANEO et al., 2013; LORENSI; PRESTES, 2016; OLIVEIRA et al., 2017; MARCON *et al.*, 2018; LORENSI; PRESTES, 2018; ALBIERO-JÚNIOR et al., 2020; BRANDES et al., 2021; SCIPIONI et al., 2021; MARCON et al, 2022), não evidenciando um padrão aparente na resposta de crescimento as variáveis climáticas em questão (Figura 2).

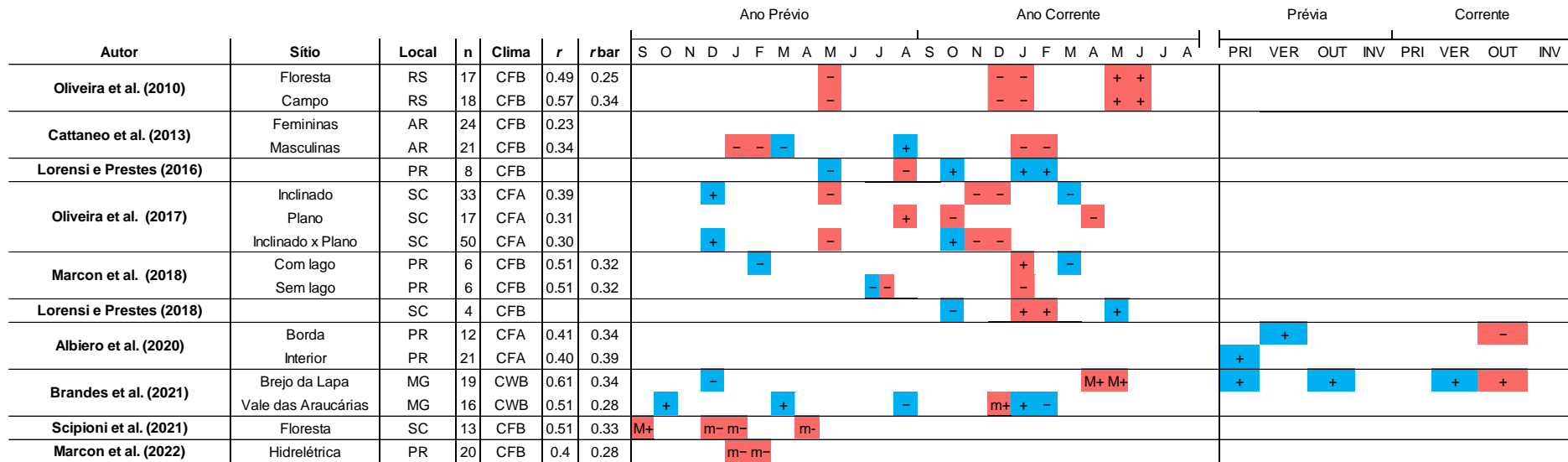


Figura 2. Sinais dendroclimáticos em cronologias de largura de anéis de crescimento de *Araucaria angustifolia*, (adaptado de BRANDES et al., 2021). Cor Vermelha representa a temperatura e a cor Azul representa a precipitação. Sinal (+) corresponde correlação positiva e sinal (-) correlação negativa. M: temperatura máxima e m: temperatura mínima. Os índices r : Índice de intercorrelação média, r_{bar} : correlação média, n : número de árvores coletadas.

A diversidade entre as respostas climáticas, resultando num padrão idiossincrático entre sítios, pode decorrer por diferentes motivos. Dente eles, a dificuldade da visualização dos anéis de crescimento de *A. angustifolia* é um possível fator determinante, uma vez que a espécie apresenta anéis difusos, em cunha ou parciais, que aumentam com a idade avançada das árvores (OLIVEIRA et al., 2010). Portanto, estudos com um esforço amostral maior tendem a reduzir as incertezas de datação, tornando a cronologia mais robusta, e com sinais climáticos mais precisos (FONTANA, et al., 2018). Diferenças analíticas, quanto aos métodos de filtragem de tendências ontogenéticas (BRANDES et al., 2021, SCIPIONI et al., 2021), extensão e/ou tipo de variável climática, assim como a variedade nas condições entre os próprios sítios de estudo, podem também resultar na grande variabilidade de sinais climáticos. (KING et al., 2013; ALBIERO-JÚNIOR et al., 2020).

O capítulo seguinte, preparado em forma de artigo científico, apresenta um estudo inédito avaliando uma premissa dendrocronológica que não foi devidamente tratada nessa espécie, de que sítios similares devem apresentar um sinal comum de crescimento decorrente da influência climática.

REFERÊNCIAS

Albiero-Júnior, A., Venegas-González, A., Rodríguez-Catón, M., Oliveira, J. M., Longhi-Santos, T., Galvão, F., Temponi, L. G., Botosso, P. C., 2020. Edge effects modify the growth dynamics and climate sensitivity of *Araucaria angustifolia* trees. *Tree-Ring Research*, 76(1), 11-26. <https://doi.org/10.3959/TRR2018-9>

Bogoni, J. A., Muniz-Tagliari, M., Peroni, N., Peres C.A., 2020. Testing the keystone plant resource role of a flagship subtropical tree species (*Araucaria angustifolia*) in the Brazilian Atlantic. *Ecological Indicators*, 118, 1 -9. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106778>

Botosso, P. C., Mattos, P.P., 2002. Conhecer a Idade das Árvores: Importância e Aplicação. *Documentos*, Colombo 73, 11-19.

Botosso, P. C., Vetter, R. E., 1991. Alguns aspectos sobre a periodicidade e taxa de crescimento em 8 espécies arbóreas de floresta de terra firme (Amazonia). *Revista do Instituto Florestal* 3 (2), 163-180.

Botosso, P. C., Vetter, R. E., Tomazello-Filho, M., 2000. Periodicidade e taxa de crescimento de árvores de cedro (*Cedrela odorata* L., Meliaceae), jacareuba (*Calophyllum angulare* AC Smith, Clusiaceae) e muirapiranga (*Eperua bijuga* Mart. ex Benth, Leg. Caesalpinioideae) de floresta de Terra Firme, em Manuas-AM. *Dendrocronologia em América Latina: EDIUNC, Mendoza, Argentina* 357 – 380.

Brandes, A. F. N., Albuquerque, R. P., Lisi, C. S., de Lemos, D. N., Nicola, L. R. M., Melo, A. L. F., Barros, C. F., 2021. The growth responses of *Araucaria angustifolia* to climate are adjusted both spatially and temporally at its northern distribution limit. *Forest Ecology and Management* 487, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119024>

Callado, C. H., Guimarães, R. C., 2010. Estudo dos anéis de crescimento de *Schizolobium parahyba* (Leguminosae: Caesalpinioideae) após episódio de mortalidade em Ilha Grande, Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Botânica* 33(1), 85 - 91. <https://doi.org/10.1590/S0100-84042010000100008>

Campos, J. C. C., 1970. Principais fatores do meio que afetam o crescimento das árvores. *Revista Floresta* 2(3), 45 - 52. <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v2i3.5684>

Carlucci, M. B., Jarenkow, J. A., Duarte, L. D. S., Pillar, V. D., 2011. Conservação da Floresta com Araucária no extremo sul do Brasil. *Natureza & Conservação* 9(1), 111-114. <http://doi:10.4322/natcon.2011.015>

Carvalho, P. E. R., 2003. Espécies arbóreas brasileiras. Volume 1. Brasília, DF: Embrapa Informações Tecnológicas; Colombo, 1039.

Cattaneo, N., Pahr, N., Fassola, H., Leporati, J., Bogino, S., 2013. Sex-related, growth–climate association of *Araucaria angustifolia* in the neotropical ombrophilous woodlands of Argentina. *Dendrochronologia*, 31(3), 147-152. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2013.01.005>

Cook, E.R., Pederson, N., 2011. Uncertainty, Emergence, and Statistics in Dendrochronology. In: Hughes, M., Swetnam, T., Diaz, H. (eds) *Dendroclimatology. Developments in Paleoenvironmental Research* 11. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5725-0_4

Dünisch, O., 2005. Influence of the El-niño southern oscillation on cambial growth of *Cedrela fissilis* Vell. in tropical and subtropical Brazil. *Journal of Applied Botany and Food Quality* 79, 5-11.

Figueiredo F. A., Rode, R., Figueiredo, D. J., Amaral M., S., 2008. Seasonal diameter increment for 7 species from an Ombrophylous Mixed Forest, Southern state of Paraná, Brazil. *Revista Floresta*, 38(3). <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v38i3.12424>.

Fontana, C., Reis-Avila, G., Nabais, C., Botosso, P. C., Oliveira, J. M., 2018. Dendrochronology and climate in the Brazilian Atlantic Forest: Which species, where and how. *Neotropical Biology and Conservation* 13(4), 321-333. <https://doi.org/10.4013/nbc.2018.134.06>

Fritts, H.C., 1976. *Tree rings and climate*. Academic Press, London.

Guglielme, I., Ganade, G., 2006. Predação de sementes afetando a distribuição de indivíduos de *Araucaria angustifolia* ao longo de uma borda de floresta com campo. *Neotropical Biology and Conservation* 1(2), 62-71.

Holmes, R. L., 1983. Computer assisted quality control. *Tree-ring bull* 43, 69-78. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.11980500>

Hueck, K., 1972. As florestas da América do Sul: ecologia, composição e importância econômica. Polígono, Ed. da Universidade de Brasília, 466 pp.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2022. Climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of working group II to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, UK and New York, NY, US, pp. 3-33.

King, G. M., Gugerli, F., Fonti, P., Frank, D. C., 2013. Tree growth response along an elevational gradient: climate or genetics? *Oecologia*, 173(4), 1587-1600. <https://doi.org/10.1007/s00442-013-2696-6>

Lorensi, C., Prestes, A., 2018. Dendroclimatologia com amostras de *Araucaria angustifolia* coletadas em Santa Catarina. *Revista Univap* 24, 44. <https://doi.org/10.18066/revistaunivap.v24i44.424>

Lorenzi, H., 1992. Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. Plantarum, 352.

Luchi, Agnes Elisete., 1998. Periodicidade de crescimento em *Hymenaea courbaril* L. e anatomia ecológica do lenho de espécies de mata ciliar. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 236 pp.

Marcon, A. K., Martins, K. G., Botosso, P. C., Santos-Longhi, T., Blum, C., Galvão, F., 2022. Growth ring response of two Atlantic Forest tree species pre- and post-dam operation in Southern Brazil. *Dendrochronologia* 77, 125917. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125917>

Marcon, A., Galvão, F., Botosso, P. C., Blum, C., Kozłowski, M., 2018. Alteração ambiental e crescimento de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze na região centro-sul do Paraná, Brasil. *ENCICLOPÉDIA BIOSFERA*, Centro Científico Conhecer – Goiânia 15(28), 36. https://doi:10.18677/EnciBio_2018B4

Marinho, T. A. D. S., Lopes, A., Assis, R. L. D., Ramos, S. L. F., Gomes, L. R. P., Wittmann, F., Schöngart, J., 2013. Distribuição e crescimento de *Garcinia brasiliensis* Mart. e *Hevea spruceana* (Benth.) Müll. Arg. em uma floresta inundável em Manaus, Amazonas. *Ciência Florestal* 23, 223-232. <https://doi.org/10.5902/198050988456>

Martinelli, G., Moraes, M. A., 2013. Livro vermelho da flora do Brasil. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Marcelo_Menezes2/publication/273000307_Cactaceae/links/54f48fca0cf2f28c1361e233.pdf. Acesso em: 07 de abril de 2023.

Mattos, P. P., Seitz, R. A., Muniz, G. I. B., 1999. Identification of annual growth rings based on periodical shoot growth. *Tree-ring analysis: biological, methodological and environmental aspects* 20, 139-145.

Mattos, P. P., Seitz, R. A., Salis, S. M., 2004. Potencial Dendroecológico de *Tabebuia heptaphylla* (Vell.) Toledo. Pesquisa Florestal Brasileira 48, 93-103. <http://orcid.org/0000-0003-4134-8890>

Oliveira, J. M., Roig, F. A, Pillar., V. D., 2010. Climatic signals in tree-rings of *Araucaria angustifolia* in the southern Brazilian highlands. Austral Ecology 35, 134-147. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2009.02018.x>

Oliveira, J. M., Santarosa, E., Pillar, V. D., Roig, F. A., 2009. Seasonal cambium activity in the subtropical rain forest tree *Araucaria angustifolia*. Trees, 23(1), 107-115. <https://doi.org/10.1007/s00468-008-0259-y>

Oliveira, J. R., Adenesky-Filho, E., Quadros, K. E., 2017. Avaliação do crescimento do lenho de *Araucaria angustifolia* no planalto norte de Santa Catarina. Revista Floresta 47(2), 155-164. <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v47i2.43134>

Orellana, E., Vanclay, J.K., 2018. Could native *Araucaria* forests be managed for timber production on small farms in southern Brazil? Forest Ecology and Management 430, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.07.057>

Reitz, R., 1966. Flora Ilustrada Catarinense: *Araucariaceas*. Herbário Barbosa Rodriguez, Itajaí, 62 pp.

Rozendaal, D.M.A., Zuidema, P.A., 2011. Dendroecology in the tropics: a review. Trees 25, 3–16. <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0480-3>

Schöngart, J., Bräuning, A., Barbosa, A.C.M.C., Lisi, C.S., de Oliveira, J.M., 2017. Dendroecological Studies in the Neotropics: History, Status and Future Challenges. In: Amoroso, M., Daniels, L., Baker, P., Camarero, J. (eds) Dendroecology. Ecological Studies, 231. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61669-8_3

Schweingruber F. H., 1996. Tree Rings and Environment: Dendroecology, 609 pp.

Scipioni, M. C., Fontana, C., Oliveira, J. M., Junior, L. S., Roig, F. A., Tomazello-Filho, M., 2021. Effects of cold conditions on the growth rates of a subtropical conifer. Dendrochronologia 68, 125858. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125858>

Scipioni, M.C., Neto, A.L., Siminski, A., Santos, V., 2018. Forest edge effects on the phytosociological composition of an *Araucaria* Forest fragment in Southern Brazil. Floresta 48, 483–492. <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v48i4.51281>

Souza, M. J. H., Ribeiro, A., Leite, H. G., Leite, F. P., Minuzzi, R. B., 2006. Disponibilidade hídrica do solo e produtividade do eucalipto em três regiões da Bacia do Rio Doce. Revista Árvore 30(3), 399-410. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000300010>

Stepka, T. F., 2012. Modelagem do crescimento e dendrocronologia em árvores nativas de *Araucaria angustifolia*, *Cedrela fissilis* e *Ocotea porosa* no sul do Brasil. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 186 pp;

Tomazello-Filho, M., Botosso, P. C., Lisi, C. S., 2000. Potencialidade da família Meliaceae para dendrocronologia em regiões tropicais e subtropicais. Dendrocronología en América Latina, Mendoza: EDIUNC, 381-431.

Tomazello-Filho, M.; Botosso, P. C.; Lisi, C. S., 2001a. Análise e aplicação dos anéis de crescimento das árvores como indicadores ambientais: dendrocronologia e dendroclimatologia. Indicadores ambientais: conceitos e aplicações. São Paulo: EDUC, 117-143.

SINAIS DENDROCLIMÁTICOS DE *Araucaria angustifolia* (BERTOL.) O. KUNTZE EM SÍTIOS ECOLOGICAMENTE SEMELHANTES¹

INTRODUÇÃO

O acelerado ritmo de publicação de estudos dendrocronológicos nos trópicos tem resultado em avanços importantes no conhecimento sobre o crescimento de árvores, especialmente sobre a influência climática, nessas biodiversificadas, ameaçadas e menos estudadas áreas do planeta (Worbes 2002; Zuidema et al. 2022). Na América do Sul, uma das espécies tropicais de grande interesse para a dendrocronologia é *Araucaria angustifolia* (pinheiro-do-paraná), uma conífera arbórea que caracteriza extensas áreas de florestas mistas com latifoliadas, em regiões montanhosas úmidas do Sudeste da América do Sul (Klein, 1960; Hueck 1972).

A ampla e abundante ocorrência dessa espécie nas paisagens da região, aliada a outras características favoráveis ao estudo de anéis de crescimento, tem motivado a exploração do seu potencial dendrocronológico (Roig 2000; Fontana et al, 2018). Essa espécie possui anéis de crescimento anatomicamente demarcados (Seitz e Kanninen, 1989), a exemplo de sua irmã, *Araucaria araucana* (Mol.) K. Koch, espécie de reconhecido e aplicado potencial dendrocronológico em florestas e bosques temperados do Chile e Argentina (Schulman, 1956; Mundo et al, 2012). A despeito da grande exploração madeireira e da expansão agrícola que levaram *A. angustifolia* à ameaça de extinção (Thomas, 2013; Martinelli; Moraes, 2013), ainda se pode encontrar espécimes gigantes e longevos (Scipioni et al., 2019). Por fim, a associação da distribuição da espécie com condições de clima ameno e termicamente sazonal, sugere uma importante influência de fatores climáticos em sua autoecologia (Backes, 1999).

¹ Artigo formatado de acordo com as normas da revista **Dendrochronologia**.

Em estudo pioneiro, Seitz e Kanninem (1989) apresentaram uma cronologia de largura de anéis de *A. angustifolia*, com árvores relativamente jovens e de elevado grau de sincronismo de crescimento, reforçando a natureza anual e possível existência de sinal climático em suas séries de anéis. Trabalhos subsequentes atestaram, por meio de análise de $\delta^{14}\text{C}$ (Lisi et al. 2001) e de monitoramento da atividade intra-anual de crescimento (Oliveira et al. 2009), que os anéis em *A. angustifolia* são formados com periodicidade anual, em decorrência da sazonalidade de fotoperíodo e temperatura. Desde então, inúmeras cronologias de *A. angustifolia* foram publicadas, em artigos abordando, principalmente, sinais climáticos (Oliveira et al., 2010; Cattaneo et al., 2013; Lorensi; Prestes, 2016; Oliveira et al., 2017; Marcon et al., 2018; Lorensi; Prestes, 2018; Albiero-Júnior et al., 2020; Brandes et al., 2021; Scipioni et al., 2021; Marcon et al., 2022). Contudo, a análise dos resultados reportados na bibliografia revela grande variabilidade na resposta de crescimento ao clima, no que tange existência, magnitude, direção e época do ano de influência de fatores climáticos (Fontana et al., 2018; Brandes et al., 2021).

Além de diferenças climáticas entre sítios, a variabilidade nos sinais dendroclimáticos numa espécie pode ser explicada por diferenças noutras condições ecológicas operando em menor escala, que podem modular a influência do clima regional nos processos que desenrolam localmente o crescimento vegetal (Fritts, 1976), tais como microclima (Bégin et al., 2010), estrutura da vegetação (Orwig; Abrams, 1997; Lebourgeois et al., 2014) e solo (Liderholm, 2001; Silva et al., 2001). Regimes de distúrbios, ademais, alteram profundamente as condições e disponibilidade de recursos, conseqüentemente podem interferir sobre o crescimento das árvores, diretamente e em interação com o clima (Cook, 1985; Rydval et al., 2016; Albiero-Junior et al., 2021; Jiang et al. 2022). Também a dioiccia, característica das Araucariaceae, pode resultar em variabilidade de crescimento e de influências climáticas (Rozas et al., 2009; Hadad et al., 2021)

Outra possível razão da variabilidade de sinais climáticos reportados em *A. angustifolia* diz respeito à qualidade da amostragem (Fontana et al., 2018), que pode impactar a acurácia das datações e/ou da representação do sinal de crescimento do sítio estudado, conseqüentemente, levando à ruídos na detecção de sinais climáticos (Worbes, 2002; Groenendijk et al., 2014). Realizar datações acuradas é um desafio maior em amostras com anomalias anatômicas, como anéis com limites difusos, em cunha ou falsos, frequentemente reportados nos estudos com *A. angustifolia* (Seitz; Kanninen, 1989; Oliveira et al., 2010; Cattaneo et al., 2013; Oliveira et al., 2017; Marcon et al., 2018; Albiero et al., 2021; Scipioni et al., 2021). Em alguns estudos nessa espécie, o baixo esforço amostral e/ou a carência de descrição do sinal comum entre árvores na cronologia, limita inferências sobre sinais climáticos e outras que demandem acurácia anual das datações (Lorensi; Prestes, 2016; Lorensi; Prestes, 2018; Marcon et al, 2018).

Há evidências consistentes de que variações na sensibilidade climática em *A. angustifolia* possam decorrer de efeito de borda (Albiero-Junior et al., 2020), mudança no nível do lençol freático (Marcon et al. 2022) e dioicia (Cattaneo et al., 2013), e especulações acerca de possíveis efeitos causados por estrutura da vegetação (Oliveira et al., 2010) e topografia (Oliveira et al. 2017). Poucos estudos avaliaram a existência de sinal comum entre sítios, e apenas comparando um par de cronologias cada. Um sinal comum moderado foi verificado entre árvores de floresta e de campo (Oliveira et al., 2010), assim como, em sítios em condições topográficas distintas (Oliveira et al., 2017), em contrapartida, Brandes et al (2021), não observaram correlação significativa entre os sítios, desta forma, inviabilizando uma análise climática regional.

No presente estudo, testa-se uma premissa dendrocronológica em *A. angustifolia*, de que cronologias de sítios espacialmente independentes, mas sujeitas a condições ecológicas (climáticas, fitossociológicas e edáficas) semelhantes, apresentarão um sinal comum de crescimento determinado por variações interanuais em condições climáticas limitantes. Ao abordar esta premissa, fundamental para estudos dendrocronológicos que demandam elevada acurácia para suas inferenciais (eg. dendroclimáticos), pretende-se contribuir ao entendimento da variabilidade de sinais climáticos reportados na literatura e do potencial dendrocronológico desta importante conífera subtropical.

METODOLOGIA

Sítios de estudo

Este trabalho está embasado na comparação de duas áreas de estudo, denominadas CBS1 e CBS2, próximas 3,8 Km uma da outra, e semelhantes em termos edáficos, fitossociológicos e climáticos, localizadas no planalto Meridional Brasileiro, no município de Curitibanos, região central do Estado de Santa Catarina, Brasil. As árvores em CBS1 foram amostradas em uma parcela de 1,1 ha (27°17'19.04" S e 50°31'54.21" O), enquanto em CBS2 foram amostradas numa faixa de aproximadamente 0,25 ha (~25 m x 100 m), perpendicular ao leve gradiente de elevação (27°19'19.3" S e 50°32'16" O). A figura 1 ilustra a localização, clima e vegetação dos sítios.

O clima na região é tipo Cfb, temperado úmido com verões amenos e sem estação seca. As temperaturas médias são de 22°C em janeiro, de 13°C em julho, com incidência de geadas e eventos de precipitação de neve no inverno, sendo a temperatura média anual de 17°C, e a precipitação média anual é de 1674 mm, com umidade relativa do ar entre 80% e 83% no ano (Alvares, 2013).

Os sítios são similares quanto à altitude, topografia e solo (SiBCS, 2018), sendo CBS1 de terreno plano (declividade < 3%), com altitude de 1100 m, e CBS2 de terreno suave ondulado a ondulado (declividade ~ 10%), com altitude entre 1046 m e 1062; ambos apresentam Neossolos Litólicos e Cambissolos. Quanto à vegetação, os sítios são formações secundárias de Floresta Ombrófila Mista (IBGE, 2012). A estrutura de tamanho é similar entre os sítios, com *A. angustifolia* predominando o estrato superior em relação às latifoliadas. A área basal total também é similar (~ 37 m²/ha), porém com maior contribuição de *A. angustifolia* em CBS2. Porém, a densidade de árvores é maior em CBS1 (1544 ind/ha) do que em CBS2 (753 ind/ha), especialmente pela mais elevada abundância de árvores latifoliadas no primeiro sítio. Detalhes sobre a caracterização edáfica e fitossociológica em CBS1 estão disponíveis em Scipioni et al. (2018; 2021). Para CBS2, essa caracterização foi realizada em 2022, a partir de um levantamento fitossociológico do componente arbóreo e de sondagens de solo, em 19 parcelas amostrais de 100 m² dispostas próximo à área de onde foram abatidas as árvores utilizadas neste estudo.

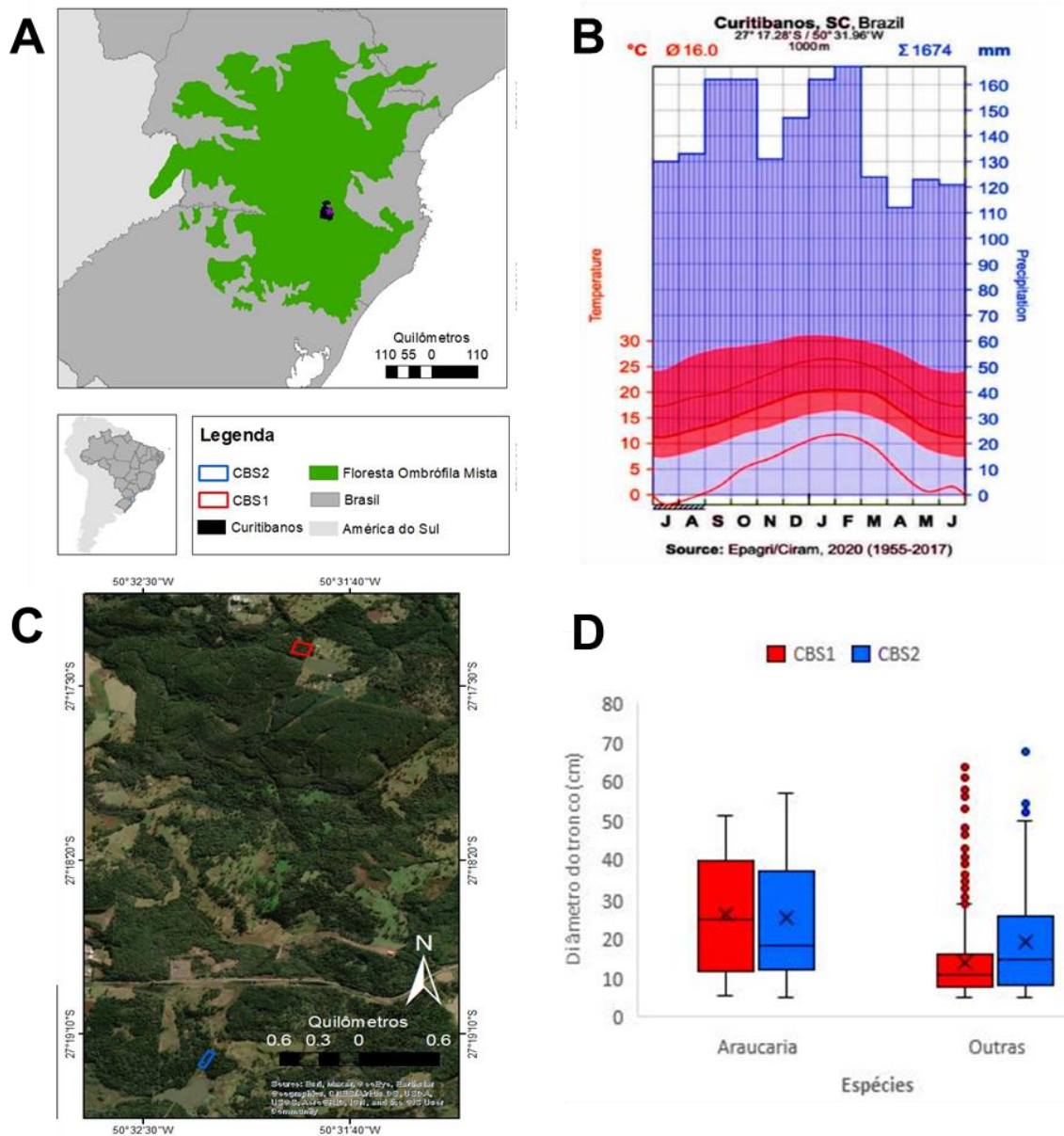


Figura 1. Localização e caracterização dos sítios de estudo dendrocronológico de *Araucaria angustifolia*, CBS1 e CBS2, em Curitiba, SC, Brasil. Localização do município de Curitiba na área de distribuição da Floresta Ombrófila Mista (A). Climograma da estação meteorológica de Curitiba (B). Detalhe dos sítios de estudo no contexto da paisagem (C). Estrutura diamétrica de *A. angustifolia* e de latifoliadas nos sítios de estudo (D).

Coleta e preparação das amostras

A cronologia de CBS1 foi desenvolvida em estudo anterior (Scipioni et al., 2021), a partir de amostras de trado de incremento provenientes de 33 árvores; detalhes sobre coleta, preparação e processamento das amostras podem ser vistos na publicação original. Para CBS2, a cronologia foi desenvolvida a partir de secções transversais de tronco de árvores, suprimidas para a instalação de uma rede de alta tensão em julho de 2017. Após a operação de supressão da vegetação, foram coletadas (com motosserra) amostras da base dos troncos (~ 20 cm de altura do solo) de 34 árvores de *A. angustifolia*. As amostras, previamente secas em estufa a 65°C, foram polidas com uma série de lixas, do número 40 ao 600, até garantir nitidez na visualização dos anéis em estereoscópico. Então, as amostras foram digitalizadas em 1200 dpi, com um scanner HP scanjet 4500, para posterior datação e medição dos anéis de crescimento.

Datação-cruzada

Assim como em CBS1 (Scipioni et al., 2021), a mensuração das séries de largura de anéis de crescimento das amostras em CBS2 foi realizada em imagens das amostras, com auxílio do aplicativo Cybis CooRecorder, versão 7.8.1 (Larsson, 2014a) com precisão 0.01 mm. Detalhes dos procedimentos de datação-cruzada em CBS1 são dados em Scipioni et al. (2021), e descritos a seguir para CBS2.

Em cada secção de tronco foram preliminarmente medidos e datados os anéis de crescimento, ao longo de quatro raios (casca – medula) dispostos de maneira a abranger diferentes setores da amostra. A datação-cruzada, realizada com auxílio dos aplicativos Cybis CDendro versão 7.8.1 (Larsson, 2014b) e COFECHA 6.0 (Holmes, 1983), iniciou pela comparação e revisão da datação entre séries dentro de árvores, obtendo-se uma série média de largura de anéis de cada árvore ao final do processo. Então, as séries médias das árvores foram utilizadas para a comparação e revisão da datação das séries entre árvores.

Devido à presença de períodos de difícil definição dos anéis em várias amostras, relacionados a irregularidades anatômicas (lenho de reação, anéis parciais, anéis difusos e flutuações de densidade), a datação-cruzada prosseguiu com as árvores de maior sincronismo interno e com melhor distinção dos anéis, de modo a evitar que erros iniciais de datação se propagassem ao longo do processo. Gradualmente, as demais árvores foram sendo comparadas, e se pertinente, incorporadas ao conjunto codatado. À medida que a cronologia em construção adquiria robustez amostral e de sinal comum, as amostras de maior complexidade foram avaliadas. Ao longo de todo o processo, períodos de amostras que apresentassem baixo sincronismo com as demais árvores foram removidos, a fim de evitar a incorporação de ruídos de crescimento que pudessem ser ou resultar em erros de datação. Quando nenhuma nova árvore pode ser adicionada ao conjunto codatado, as partes inicialmente retiradas das séries truncadas foram reavaliadas, sendo reincorporadas, se pertinente.

A partir da revisão das imagens das amostras de CBS1 e dos arquivos de medição, constatou-se um erro na datação no trabalho de Scipioni et al. (2021). Naquele trabalho, ao anel mais externo das amostras (coletadas na primavera de 2018) foi atribuído o ano calendário de 2018. Portanto, seria um anel em formação, que não foi mensurado por representar apenas o início do período anual de crescimento. Contudo, identificou-se que nas diferentes amostras, este anel era demasiadamente largo para um crescimento tão inicial, apresentava traqueídes de lenho tardio em suas camadas mais externas, indicando tratar-se de um anel completo correspondente ao ano de crescimento de 2017 (Apêndice A). Desta forma, a datação da cronologia original de CBS1 (Scipioni et al.; 2021) foi corrigida para a realização das análises subsequentes, sendo 2016 (e não 2017) o ano calendário do anel mais recente medido naquele trabalho.

Trajetórias de crescimento

Para descrever se a variabilidade de histórias de crescimento das árvores era similar entre os sítios, analisamos visualmente as curvas de incremento radial acumulado em função da idade, construídas a partir das séries médias de largura de anéis das árvores codatadas. Excepcionalmente nesta análise, árvores que tiveram séries truncadas ao final da codatação foram consideradas integralmente (*ie.* sem cortes), para se obter uma estimativa completo das suas trajetórias de crescimento.

Índices de largura de anéis

As séries de largura média de anéis das árvores codatadas em cada sítio foram utilizadas para estimar suas respectivas cronologias de índices de largura de anéis, com auxílio do pacote `dpIR` (Bunn, 2008), no ambiente `Rstudio` (versão 1.6.0). Para diminuir a influência de tendências ontogenéticas e de outros possíveis fatores não climáticos, as séries codatadas de largura de anéis foram padronizadas e filtradas de autocorrelação temporal (Cook, 1985). Para tanto, cada série de valores observados foi dividida por uma série de valores preditos com `spline` cúbico de 22 anos (ajustados à cada árvore), gerando séries padronizadas. Então, as séries padronizadas foram filtradas por modelos autoregressivos (ajustados ao conjunto das séries padronizadas por sítio), resultando em séries residuais, com valor esperado ~ 1 , autocorrelação ~ 0 e variância homogênea. Com base nas séries residuais, para cada sítio foi acessada a variabilidade temporal entre árvores (Índice de Sensitividade Média, `MSI`; intercorrelação média, `r-int`; correlação média, `r-bar`; e sinal expresso da população, `EPS` e estimada a cronologia média (robusta bi-ponderada).

Sinal comum entre os sítios

Para testar a existência de um sinal de crescimento comum entre os sítios, a associação temporal entre as cronologias médias de CBS1 e CBS2 foi acessada pelo coeficiente de correlação de Pearson. A significância do coeficiente foi avaliada por um teste de aleatorização (1000 interações de permutação de uma das séries), sob a hipótese nula de que a correlação observada não é mais forte do que o esperado ao acaso ($\alpha = 0.05$). Essas análises foram realizadas no *software* Multiv (v.385) (Pillar, 2006).

Sinais dendroclimáticos

Para acessar a influência do clima no sinal comum entre os sítios, computamos uma cronologia média combinando as árvores de ambos os sítios (CBS1+CBS2) e a comparamos a séries climáticas locais e relacionadas ao fenômeno ENSO. Como descritores locais, utilizamos séries mensais de temperatura atmosférica média e de precipitação total, provenientes do Climatic Research Unit (CRU) TS 4.05 (Harris et al, 2020). Como descritores do ENSO utilizamos as séries mensais do Índice de Oscilação Sul (SOI), proveniente do National Centers for Environmental Information (NOOA, 2023), abrangendo o período de 1956 a 2016.

Inicialmente, cada variável climática foi comparada à cronologia CBS1+CBS2 através de funções de correlação, abrangendo do início da estação de crescimento anterior (setembro₋₁) ao final da estação de crescimento corrente (maio₊₁), e utilizando um procedimento de *bootstrap* estático, para avaliação da significância dos coeficientes por meio de intervalos de confiança de 95% (Dixon, 2001; Biondi; Waikul, 2004). Essas análises foram realizadas no *ambiente* RStudio (versão 1.6.0), aplicando o pacote Treeclim (Zang; Biondi, 2015).

Por fim, para testar o papel do clima no sinal comum de crescimento entre os sítios, foram calculadas correlações parciais de *Pearson* entre as cronologias CBS1 e CBS2, tendo como covariáveis as séries climáticas identificadas como significativas na análise anterior. A significância dos coeficientes de correlação parcial foi avaliada por testes de aleatorização (1000 iterações de permutação de uma das séries), sob a hipótese nula de que a correlação observada não é mais forte do que o esperado ao acaso ($\alpha = 0.05$). Essas análises foram realizadas no *software* Multiv (v.385) (Pillar, 2006).

RESULTADOS

Datação-cruzada de CBS2

Em razão do relevo suave ondulado a ondulado (SiBCS, 2018), as amostras evidenciaram madeira de reação. Irregularidades anatômicas, sobretudo anéis parciais eram frequentes. Períodos com anéis de crescimento muito estreitos e com limites difusos foram observados em períodos mais recentes em algumas amostras, e em períodos mais antigos em outras. Devido a essas características, das 33 árvores coletadas 19 foram codatadas. A maioria das árvores codatadas tiveram apenas parte dos anéis amostrados efetivamente incluídos na cronologia, sendo truncadas devido à períodos com anéis de visualização ruim e/ou com baixa intercorrelação interna na árvore: cinco amostras foram incluídas completas, cinco foram truncadas próximo à medula, seis foram truncadas próximo à casca e três em ambas as extremidades (Figura 2).

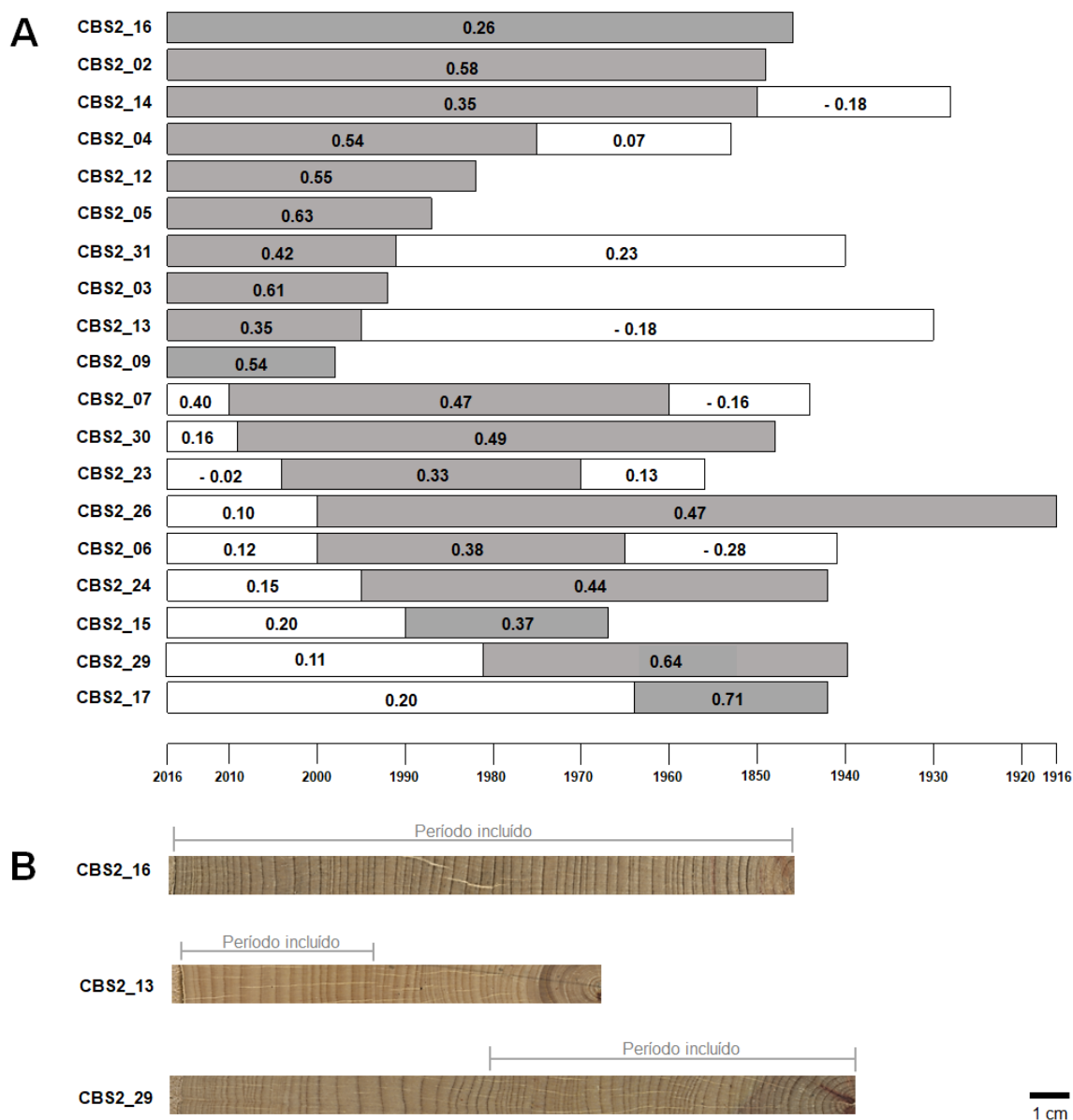


Figura 2. Representação esquemática do resultado da datação-cruzada das amostras de *Araucaria angustifolia* do sítio CBS2, em Curitiba, SC, Brasil. Em (A), as séries das 19 árvores que puderam ser codatadas são mostradas, destacando períodos incluídos na cronologia (em cinza) e truncados (em branco) por apresentarem baixa qualidade de visualização dos anéis e/ou de baixo sincronismo dentro de árvores. São também mostrados os coeficientes de intercorrelação (r_{int}) para esses períodos, tendo como referência uma cronologia residual computada sem os períodos truncados. Em (B), imagens de amostras que representam séries incluídas integralmente (CBS2_16), incluídas com truncagem de anéis mais antigos (CBS2_13) e com truncagem de anéis mais recentes (CBS2_29).

Trajétórias de crescimento

As curvas de incremento radial acumulado em função da idade demonstraram uma trajetória crescimento similar entre os sítios CBS1 e CBS2. As tendências médias revelaram um incremento radial linear, de aproximadamente 2 mm ao ano. O conjunto das trajetórias, no entanto, aponta grande variabilidade entre árvores em cada sítio (Figura 3).

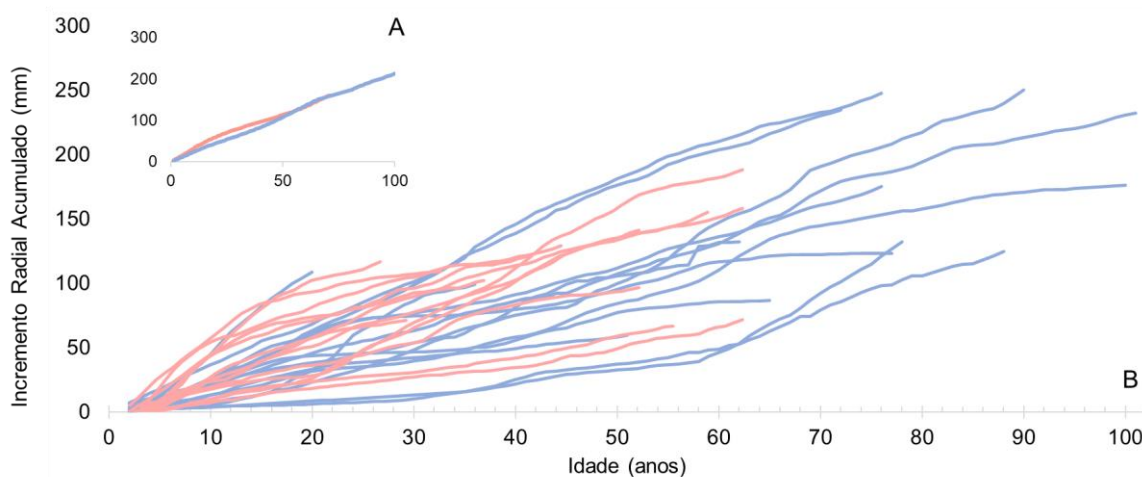


Figura 3: Trajetórias de crescimento das árvores de *Araucaria angustifolia* em Curitiba, SC, Brasil. (A) Trajetória média dos incrementos acumulados CBS1 (vermelho) e CBS2 (azul) suavizados aplicando um spline de 20 anos. (B) Trajetórias de crescimento para cada árvore codatada CBS1 (vermelho) e CBS2 (azul).

Cronologias médias

A cronologia média de CBS1, com 16 séries codatadas de 13 indivíduos, teve quatro ou mais árvores de 1956 a 2016 (60 anos). A cronologia média de CBS2, com 63 séries codatadas de 19 indivíduos, teve quatro ou mais árvores de 1946 a 2016 (70 anos). O comprimento médio das séries foi maior em CBS1. Os demais parâmetros avaliados, descritores de variabilidade temporal e sincronismo das séries de anéis, apresentaram valores semelhantes em ambas as cronologias. Também, em ambas as cronologias houve uma leve redução do sinal comum de crescimento entre árvores no período mais recente, conforme aponta a redução nos valores de r -bar e EPS computados em janelas móveis ao longo de cada cronologia (Tabela 1; Figura 3).

Tabela 1. Parâmetros descritivos das cronologias de *Araucaria angustifolia* dos sítios CBS1 e CBS2, em Curitiba, SC, Brasil. Parâmetros com medidas de erro referem-se a valores médios e desvios padrão. MSI, r -int, r -bar e EPS foram calculados com séries residuais.

Parâmetros	CBS1	CBS2	CBS1+CBS2
Número de árvores	13 (de 33)	19 (de 34)	32 (67)
Número de séries	16 (de 66)	63 (de 136)	79 (de 206)
Comprimento das séries	52.3 ± 12.8	40.8 ± 17.8	46.2 ± 16.1
Incremento anual (mm)	2.80 ± 1.06	2.34 ± 1.65	2.59 ± 0.78
Período	1956 – 2016	1946 – 2016	1949 – 2016
Índice de Sensitividade Média (MSI)	0.309 ± 0.07	0.297 ± 0.06	0.301 ± 0.06
Intercorrelação (r-int)	0.513 ± 0.03	0.547 ± 0.09	0.460 ± 0.11
Correlação (r-bar)	0.272 ± 0.09	0.270 ± 0.05	0.194 ± 0.01
Sinal Expresso da População (EPS)	0.817	0.803	0.852

O coeficiente de correlação de Pearson entre as cronologias médias CBS1 e CBS2 indicou uma associação temporal positiva de moderada magnitude entre os sítios ($r = 0.42$; $p = 0.001$). A cronologia regional (CBS1+CBS2), combinando as árvores dos dois sítios, resultou em valores de sincronismo ligeiramente mais robustos e estáveis do que as cronologias em separado (Tabela 1; Figura 3).

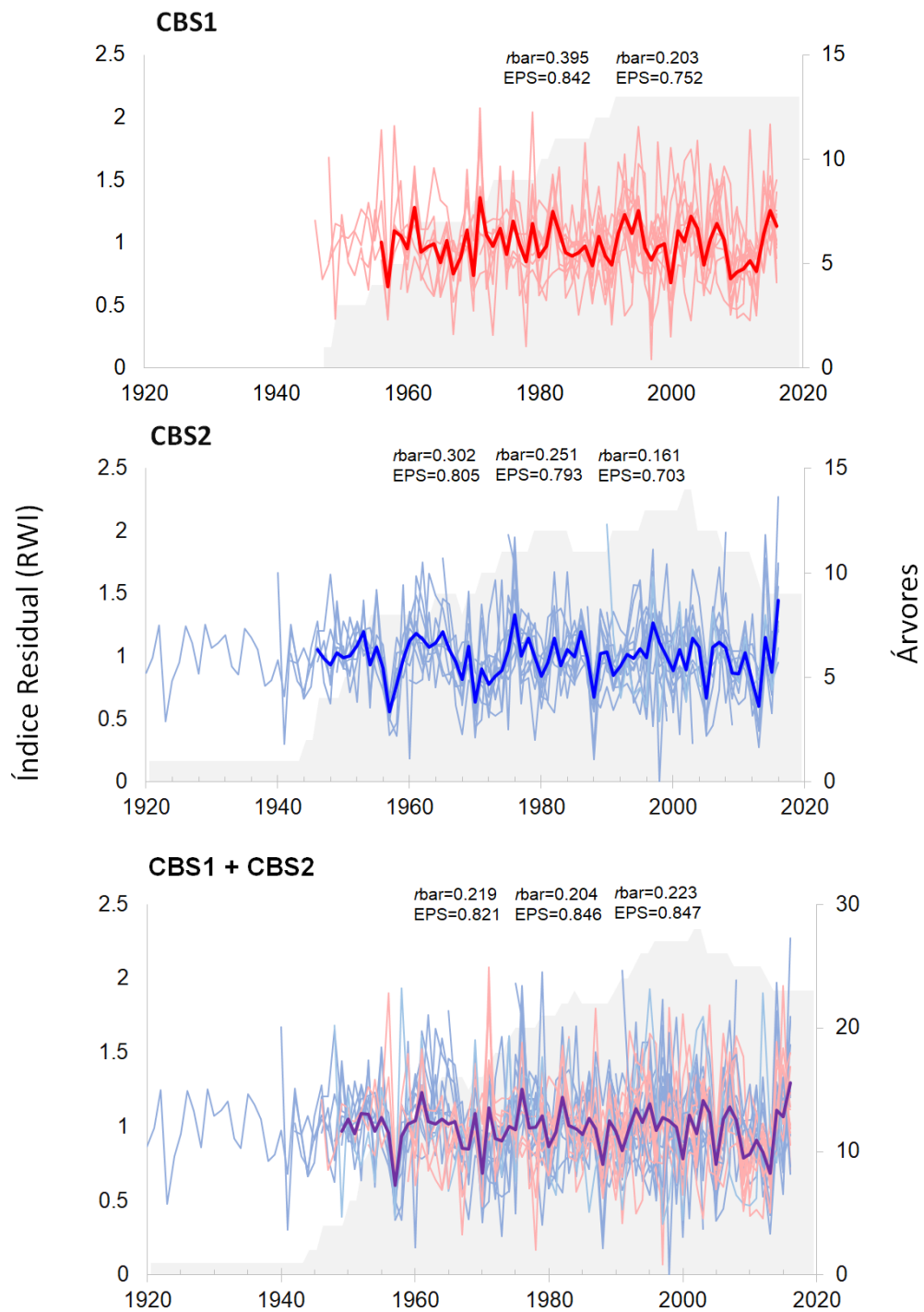


Figura 4. Cronologias de índices residuais de largura de anéis de crescimento de *Araucaria angustifolia*, em Curitibaanos, SC, Brasil. Cronologias por sítio (CBS1 e CBS2) e regional (CBS1+CBS2). Em cada gráfico, as linhas mais delgadas e de tom claro representam as séries individuais, a linha mais espessa e de tom mais escuro representa a série média, e área em cinza representa o número de séries individuais. Valores de $r\text{-bar}$ e EPS computados em janelas móveis (30 x 5 anos) são também apresentados.

Sinais dendroclimáticos

As funções de correlação prospectando sinais climáticos na cronologia regional CBS1+CBS2 mostraram apenas sinais de fraca magnitude (Figura 5). Houve sinais positivos com a precipitação, para fevereiro da estação de crescimento prévia ($r = 0.29$), outubro ($r = 0.28$) e novembro ($r = 0.23$) da estação de crescimento corrente. Com a temperatura, houve sinal negativo com maio da estação de crescimento prévia ($r = -0.28$), e sinais positivos com julho precedente à estação de crescimento corrente ($r = 0.25$) e com setembro da estação de crescimento corrente ($r = 0.25$). Com o SOI, foram também observados sinais negativos para junho ($r = -0.23$) e julho ($r = -0.33$) precedentes à estação de crescimento corrente, e sinal positivo com abril ($r = -0.35$) da estação de crescimento corrente.

As análises de correlações parciais avaliando o papel de variáveis climáticas no sinal comum entre as cronologias são mostradas na Tabela 2. Controlar a apenas a precipitação não alterou sequer a magnitude da correlação entre os sítios. De forma similar, o controle da influência individual do SOI reduziu pouco a magnitude dessa correlação entre os sítios. Individualmente, ao controlar a influência temperatura houve em maior redução da magnitude da correlação entre CBS1 e CBS2. Contudo, quando todas as covariáveis foram simultaneamente empregadas houve perda da significância da correlação entre as cronologias CBS1 e CBS2.

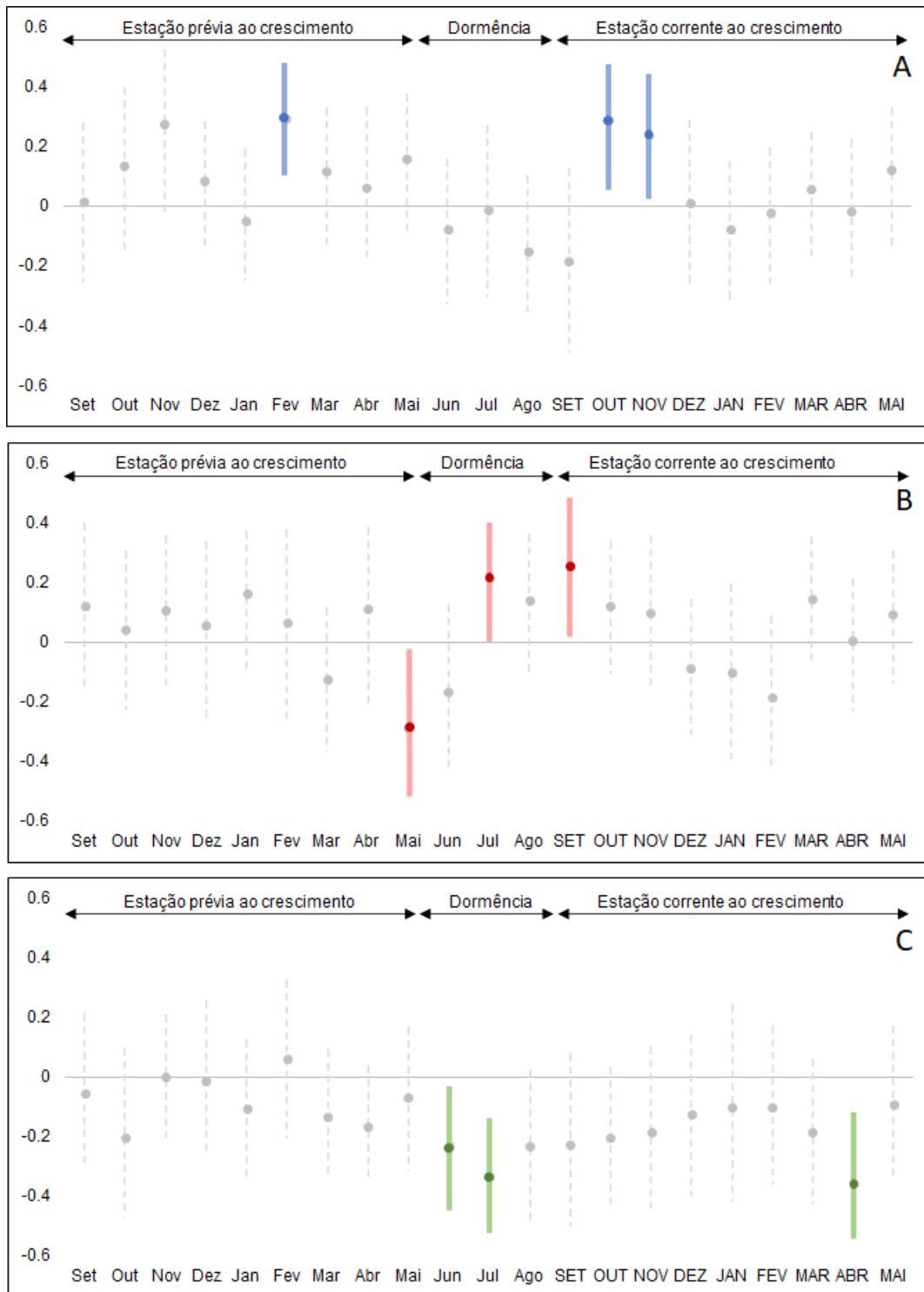


Figura 5. Sinais dendroclimáticos da cronologia regional (CBS1+CBS2) de *Araucaria angustifolia* em Curitiba, SC, identificados por Funções de Correlação *Bootstrap*, computadas com séries de precipitação total (A), Temperatura média (B) e Índice de Oscilação Sul (C), para o período de 1956 a 2016. As barras de erro indicam limites de confiança de 95%, destacando-se os coeficientes de correlação não nulos (sinais significativos).

Tabela 2: Influência de fatores climáticos no sinal comum das cronologias de *Araucaria angustifolia* em Curitiba, SC, identificados por meio de correlações parciais com teste de aleatorização. As covariáveis são precipitação total (PRE); temperatura média (TEM) e índice de oscilação sul (SOI), para meses da estação de crescimento corrente (em maiúscula) ou anterior (em minúscula).

Covariáveis	<i>r</i>_{CBS1;CBS2}	<i>P</i>
Nenhuma	0.42	0.001
PRE _{fev} ; PRE _{OUT} ; PRE _{NOV}	0.42	0.003
TEM _{mai} ; TEM _{jul} ; TEM _{SET}	0.28	0.035
SOI _{jun} ; SOI _{jul} ; SOI _{ABR}	0.37	0.005
Todas	0.15	0.311

DISCUSSÃO

Apesar do longo histórico de estudos dendrocronológicos em *A. angustifolia*, iniciado ao final da década de 1980 (Seitz e Kanninen 1989) e intensificado recentemente (Albiero-Júnior et al., 2020; Brandes et al., 2021; Scipioni et al., 2021; Marcon et al., 2022), este é o primeiro estudo a avaliar a premissa de que cronologias em sítios ecologicamente similares apresentarão um sinal de crescimento comum, determinado pela variação temporal de condições climáticas limitantes (Fritts, 1976). Nossos resultados estão de acordo com essa premissa. Ao compararmos cronologias robustas (Tabela 1) de dois sítios geograficamente próximos e semelhantes em termos de clima, solo, estrutura fitossociológica (Figura 1) e história de crescimento das árvores (Figura 3), observamos uma significativa associação positiva entre as cronologias de índices residuais de largura de anéis, determinada por um conjunto de fatores climáticos (Figuras 4 e 5; Tabela 2). Sob as condições estudadas, parte da variabilidade de crescimento temporal de *A. angustifolia* decorre de variações locais na disponibilidade hídrica e na temperatura, que operam em diferentes fases do ciclo anual de crescimento e são, em algum grau, determinadas pelo ENSO (Figura 5).

Os sinais com a precipitação (Figura 5A) indicam que a baixa disponibilidade hídrica no verão anterior (fevereiro) e na primavera corrente (outubro e novembro) restringem o crescimento das árvores. Chuvas em maior volume podem diminuir um eventual estresse hídrico por verões atipicamente quentes (Zanon; Finger, 2010). Os sinais com a precipitação da primavera corrente, também identificado noutras cronologias com *A. angustifolia* (Oliveira et al., 2017) e com *Cedrela fissilis* em florestas mistas com *A. angustifolia* (Andreacci; Botosso, 2014), indica que as chuvas nessa época do ano são importantes para a recarga hídrica dos solos no período de início do período vegetativo (Oliveira et al., 2009), a despeito dos elevados volumes de precipitação mensais que caracterizam o clima Cfb (Alvares, 2013; Figura 1B). A magnitude dos sinais positivos com a precipitação, indicam que as cronologias deste estudo corresponderiam, em escala pantropical (Zuidema et al. 2022), à categoria de cronologias tropicais com sinais positivos ou fracamente positivos com a precipitação.

As correlações com a temperatura indicaram sinais significativos com meses de transição entre a estação de crescimento anterior e corrente (Figura 5B). Elevadas temperaturas no outono (maio) tendem a reduzir o crescimento no ano seguinte, como também observado noutras cronologias da espécie (Oliveira et al. 2010; Oliveira et al. 2017). Possivelmente, temperaturas elevadas nessa época do ano retardem o início da dormência e impliquem em mobilização de carboidratos para crescimento tardio, conseqüentemente, exaurindo recursos que poderiam ser usados no crescimento após a dormência (Oliveira et al., 2010). Esse sinal pode também representar influência da temperatura sobre a demanda evaporativa, por conseguinte, levando à redução da atividade fotossintética por estresse hídrico, e assim, redução de crescimento na estação seguinte por menor acúmulo de reservas. Reforçaria essa hipótese a existência de um sinal positivo com a precipitação nesse período, que não foi evidenciado. Ainda, temperaturas elevadas no outono, retardando a entrada na dormência, poderiam resultar em danos estruturais em plantas fisiologicamente despreparadas para o frio invernal, causando redução de crescimento na estação seguinte, e favorecendo a formação de anéis de geada em árvores jovens no ano corrente (Scipioni et al. ,2021).

Os sinais positivos observados com a temperatura em julho e em setembro corrente não foram reportados em outros estudos com *A. angustifolia*. Temperaturas elevadas no auge do inverno (julho) ou no início da primavera podem representar estímulos ambientais para a saída da dormência cambial (Lang et al., 1987; Oliveira et al., 2009), conseqüentemente, favorecendo o crescimento pela maior extensão do período vegetativo. Estudos sobre a fenologia (eg. Oliveira et al., 2009; Zanon; Finger, 2010) e a fisiologia de crescimento são importantes para elucidar esses e outros sinais dendroclimáticos em *A. angustifolia*.

Correlações negativas entre a cronologia regional e o SOI foram observadas para os meses de inverno (junho e julho) e de outono corrente (abril) (Figura 5C), indicando que condições oceânicas característica da fase quente do ENSO (El Niño) nesses períodos estão associadas com condições desfavoráveis ao crescimento das árvores. As conseqüências das alterações de temperatura do oceano Pacífico sobre o Sul do Brasil se manifestam com retardo de um a dois meses, ocasionando invernos mais úmidos e, principalmente, mais quentes, e outonos mais úmidos (Trenberth, 1997; Cai et al., 2020). Desta forma, os sinais de SOI são congruentes com os sinais locais de temperatura (Figura 5B). O ENSO afeta o crescimento das árvores de CBS1+CBS2 através de mudanças na temperatura, e seus conseqüentes efeitos fisiológicos discutidos anteriormente, especialmente no período de transição inverno-primavera. O sinal de ENSO para o mês abril corrente pode indicar uma influência positiva de condições mais úmidas no final da estação de crescimento, levando à extensão do período de crescimento. Essa interpretação se enquadra com a ideia de que outonos amenos (mais quentes e/ou úmidos) propiciam à extensão do período de crescimento, levando à mobilização imediata de fotossintatos, com impactos negativos para o crescimento subseqüente pelo não acúmulo de reservas (Oliveira et al., 2010). Efeitos de ENSO, relacionados ao maior (menor) crescimento de *A. angustifolia* em verões e outonos correntes mais úmidos (secos), causados por El Niño (La Niña), foram reportados também para árvores de borda florestal, mas não para árvores com menor sensibilidade ao estresse hídrico no interior florestal (Albiero-Júnior et al., 2020).

Mesmo que ecologicamente semelhantes, a magnitude do sinal comum entre os sítios CBS1 e CBS2 foi apenas moderada, e os sinais climáticos da cronologia regional, fracos. Essa baixa sensibilidade de crescimento ao clima, possivelmente, está relacionada à influência conjunta de múltiplos fatores climáticos, com efeitos retardados e operando em diferentes épocas do ano, levando a uma complexa influência climática nos processos biológicos que regulam o crescimento (Fritz, 1976; Cook, 1985; Zuidema et al., 2022). Reforça essa ideia, o fato de que somente controlando a covariação simultânea de todas as variáveis climáticas significativas, o sinal comum entre CBS1 e CBS2 passou a não existir (Tabela 2).

Atualmente, cronologias de largura de anéis de *A. angustifolia* não são indicadas para estudos visando reconstruções climáticas, considerando a variabilidade e a complexidade de sinais dendroclimáticos observados na literatura, mesmo entre sítios similares (este estudo), bem como as dificuldades de datação acurada das amostras (Seitz; Kanninen, 1989; Oliveira et al., 2010; Cattaneo et al., 2013; Oliveira et al., 2017; Marcon et al., 2018; Albiero et al., 2021; Scipioni et al., 2021). No entanto, a variabilidade dos sinais dendroclimáticos precisa ser mais bem investigada. Estudos com uma única cronologia, desde que baseados num esforço de coleta e datação-cruzada que resulte num bom nível de sinal comum entre árvores, ainda são úteis para descrever a variabilidade de sinais climáticos (e/ou de outros temas). Da mesma forma, estudos prévios com deficiência amostral e/ou na descrição das cronologias podem ser revisitados e/ou ampliados (Lorenzi; Prestes, 2016; Lorenzi; Prestes, 2018; Marcon et al., 2018). Principalmente, é importante que novos estudos analisando um conjunto de cronologias robustas, com sítios replicando (ou evitando variar) fatores que potencialmente (eg. Oliveira et al., 2010; Oliveira et al., 2017) ou sabidamente (Cattaneo et al., 2013; Albiero-Junior et al., 2020; Marcon et al., 2022) atuam em interação com o clima sobre o crescimento da espécie.

CONCLUSÃO

A investigação de dois sítios de estudo ecologicamente similares, e com cronologias robustas, propiciou avanços importantes no entendimento do potencial dendrocronológico de *A. angustifolia*. Evidenciou-se um sinal comum entre os sítios, determinado por variações temporais nas condições locais de precipitação e temperatura, por sua vez decorrentes de teleconexões com o fenômeno ENSO. A multiplicidade de fatores climáticos gera sinais de complexa detecção e interpretação, que podem ser também causa de parte da variabilidade de sinais climáticos das cronologias de largura de anéis publicadas com esta espécie.

REFÊRENCIAS

- Albiero-Junior, A., Temponi, L. G., Galvão, F., Botosso, P. C., Guimarães, A. T. B., 2015. Population structure of *Araucaria angustifolia* in the Iguaçu National Park. *Revista Floresta*, 45(2), p. 361 – 372. <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v45i2.35673>
- Albiero-Júnior, A., Venegas-González, A., Rodríguez-Catón, M., Oliveira, J. M., Longhi-Santos, T., Galvão, F., Temponi, L. G., Botosso, P. C., 2020. Edge effects modify the growth dynamics and climate sensitivity of *Araucaria angustifolia* trees. *Tree-Ring Research*, 76(1), 11-26. <https://doi.org/10.3959/TRR2018-9>
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., de Moraes Gonçalves, J.L., Sparovek, G., 2013. Koppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22, 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Andreacci, F., Botosso, P., 2014. Sinais climáticos em anéis de crescimento de *Cedrela fissilis* em diferentes tipologias de florestas ombrófilas do sul do Brasil. *Revista Floresta*, 44(2), 323-332. <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v44i2.27316>
- Backes, A., 1999. Condicionamento climático e distribuição geográfica de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze no Brasil - II. *Pesquisas, Série Botânica* 49, 31-51.
- Bégin, Y., Sirois, L., Meunier, C., 2010. The Effects of Hydroelectric Flooding on a Reservoir's Peripheral Forests and Newly Created Forested Islands. In: Stoffel, M., Bollschweiler, M., Butler, D., Luckman, B. (eds) *Tree Rings and Natural Hazards. Advances in Global Change Research*, 41. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8736-2_2
- Biondi, F., Waikul, K., 2004. DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences* 30, 303-311. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2003.11.004>
- Bogoni, J. A., Muniz-Tagliari, M., Peroni, N., Peres C.A., 2020. Testing the keystone plant resource role of a flagship subtropical tree species (*Araucaria angustifolia*) in

the Brazilian Atlantic. *Ecological Indicators*, 118, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106778>

Brandes, A. F. N., Albuquerque, R. P., Lisi, C. S., de Lemos, D. N., Nicola, L. R. M., Melo, A. L. F., Barros, C. F., 2021. The growth responses of *Araucaria angustifolia* to climate are adjusted both spatially and temporally at its northern distribution limit. *Forest Ecology and Management* 487, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119024>

Briffa, K., Jones, P.D., 1990. Basic chronology statistics and assessment. In: E. Cook; L. Kairiukstis (ed.), *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Dordrecht, Springer- Science, Business Media, 137-152.

Bunn, A. G., 2008. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia* 26, 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>

Cai, W., McPhaden, M.J., Grimm, A.M. et al., 2020. Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. *Nature Review Earth and Environment* 1, 215–231. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0040-3>

Carvalho, P. E. R., 2003. *Espécies arbóreas brasileiras*. Brasília, DF: Embrapa Informações Tecnológicas; Colombo 1, 1039 pp.

Castro, M. B., et al., 2020. Will the emblematic southern conifer *Araucaria angustifolia* survive to climate change in Brazil? *Biodiversity and Conservation* 29, 591–607. <https://doi.org/10.1007/s10531-019-01900-x>

Cattaneo, N., Pahr, N., Fassola, H., Leporati, J., Bogino, S., 2013. Sex-related, growth–climate association of *Araucaria angustifolia* in the neotropical ombrophilous woodlands of Argentina. *Dendrochronologia*, 31(3), 147-152. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2013.01.005>

Cook E. R., 1985. A time series analysis approach to tree-ring standardization. Ph. D. Thesis, University of Arizona, Tucson.

Cook, E. R., Holmes, R. L., 1984. User’s manual for program ARSTAN. Palisades: Lamont-Doherty Earth Observatory.

Dixon, P.M., 2001. Bootstrap resampling. In: El-Shaarawi, AH, Piegorsch, WW (Eds.), *The Encyclopedia of Environmetrics*. Wiley, New York. <https://doi:10.1007/s00468-011-0605-3524–533>.

Fichtler, E., 2017. Dendroclimatology using tropical broad-leaved tree species – A review. *Erdkunde* 71(1), 5-22. <https://doi.org/10.3112/erdkunde.2017.01.01>

Fontana, C., Reis-Avila, G., Nabais, C., Botosso, P. C., Oliveira, J. M., 2018. Dendrochronology and climate in the Brazilian Atlantic Forest: Which species, where and how. *Neotropical Biology and Conservation* 13(4), 321-333. <https://doi.org/10.4013/nbc.2018.134.06>

Fritts, H.C., 1976. *Tree rings and climate*. Academic Press, London.

Groenendijk, P., Sass-Klaassen, U., Bongers, F., Zuidema, P. A., 2014. Potential of tree-ring analysis in a wet tropical forest: A case study on 22 commercial tree species in Central Africa. *Forest Ecology and Management* 323, 65 - 78. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.03.037>

Hadad, M. A., Roig, F. A., Molina, J. G. A., Hacket-Pain, A., 2021. Growth of male and female *Araucaria araucana* trees respond differently to regional mast events, creating sex-specific patterns in their tree-ring chronologies. *Ecological Indicators* 122, 107245. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107245>

Hadad, M.A., Gabriela, J., Molina, A., Roig, F.A., 2020. Dendrochronological study of the xeric and mesic *Araucaria araucana* forests of Northern patagônia: implications for ecology and conservation. In: Pompa-García, M., C.J (Eds.), *Latin American Dendroecology*. Springer, 283–314. https://doi:10.1007/978-3-030-36930-9_13

Harris, I., Osborn, T.J., Jones, P., Lister, D.H., 2020. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Sci Data* 7, 109. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>

Holmes, R. L., 1983. Computer assisted quality control. *Tree-ring bull* 43, 69-78. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.11980500>

Hueck, K., 1972. *As florestas da América do Sul: ecologia, composição e importância econômica*. Polígono, Ed. da Universidade de Brasília, 466 pp.

IBGE. *Manual Técnico da Vegetação Brasileira*. 2º ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2012.

Jiang, Y., Begović, K., Nogueira, J., Schurman, J. S., Svoboda, M., Rydval, M., 2022. Impact of disturbance signatures on tree-ring width and blue intensity chronology structure and climatic signals in Carpathian Norway spruce. *Agricultural and Forest Meteorology* 327, 109236. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109236>

Klein R. M., 1960. O aspecto dinâmico do pinheiro brasileiro. *Sellowia* 12, 17–51.

Koch, Z., Correa, M. C., 2002 *Araucária: a Floresta do Brasil Meridional*. Olhar Brasileiro, Curitiba, 144 pp.

Lang, G. A., Early, J. D., Martin, G., 1987. Endo-, para- and ecodormancy: physiological terminology and classification for dormancy research. *Hortscience* 22, p. 371-178. <https://10.21273/HORTSCI.22.5.701b>

Larson, P. R., 1994. *The Vascular Cambium: Development and Structure*. Springer-V. Springer Science and Business Media, Berlin.

Larsson, Lars-Ake., 2014a. *Cybis CooRecord*. Saltsjobaden: Cybis Elektronik & Data AB.

Larsson, Lars-Ake., 2014b. *Cybis dendro dating program*. Saltsjobaden: Cybis Elektronik & Data AB.

Lebourgeois, F., Eberlé, P., Mérian, P., Seynave, I., 2014. Social status-mediated tree-ring responses to climate of *Abies alba* and *Fagus sylvatica* shift in importance with increasing stand basal area. *Forest Ecology and Management* 328, 209-218. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.05.038>

Linderholm, H.W., 2001. Climatic influence on scots pine growth on dry and wet soils in the central Scandinavian mountains, interpreted from tree-ring widths. *Silva Fennica* 35(4), 415–424. <https://doi.org/10.14214/sf.574>

Lisi, C. S., Pessenda, L. C. R., Tomazello-Filho, M., Rozanski, K., 2001. 14C Bomb effect in tree rings of tropical and subtropical species of Brazil. *Tree-ring Research* 57(2), 191–196.

Lorensi, C., Prestes, A., 2016. Dendroclimatological reconstruction of spring-summer precipitation for Fazenda Rio Grande, PR, with samples of *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. *Revista Árvore* 40, 347–354. <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000200017>

Lorensi, C., Prestes, A., 2018. Dendroclimatologia com amostras de *Araucaria angustifolia* coletadas em Santa Catarina. *Revista Univap* 24, 44. <https://doi.org/10.18066/revistaunivap.v24i44.424>

Lorenzi, H., 1992. Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. *Plantarum*, 352.

Marcon, A. K., Martins, K. G., Botosso, P. C., Santos-Longhi, T., Blum, C., Galvão, F., 2022. Growth ring response of two Atlantic Forest tree species pre- and post-dam operation in Southern Brazil. *Dendrochronologia* 77, 125917. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125917>

Marcon, A., Galvão, F., Botosso, P. C., Blum, C., Kozłowski, M., 2018. Alteração ambiental e crescimento de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze na região centro-sul do Paraná, Brasil. *ENCICLOPÉDIA BIOSFERA*, Centro Científico Conhecer – Goiânia 15(28), 36. https://doi:10.18677/EnciBio_2018B4

Martinelli, G., Moraes, M. A., 2013. Livro vermelho da flora do Brasil. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Marcelo_Menezes2/publication/273000307_Cactaceae/links/54f48fca0cf2f28c1361e233.pdf. Acesso em: 07 de abril de 2023.

Mundo, I. A., Roig, F. A., Villalba, R., Kitzberger, T., Barrera, M. D., 2012. *Araucaria araucana* tree-ring chronologies in Argentina: spatial growth variations and climate influences. *Trees* 26, 443–458. <https://doi:10.1007/s00468-011-0605-3>

Oliveira, J. M., Roig, F. A., Pillar, V. D., 2010. Climatic signals in tree-rings of *Araucaria angustifolia* in the southern Brazilian highlands. *Austral Ecology* 35, 134-147. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2009.02018.x>

Oliveira, J. M., Santarosa, E., Pillar, V. D., Roig, F. A., 2009. Seasonal cambium activity in the subtropical rain forest tree *Araucaria angustifolia*. *Trees*, 23(1), 107-115. <https://doi.org/10.1007/s00468-008-0259-y>

Oliveira, J. R., Adenesky-Filho, E., Quadros, K. E., 2017. Avaliação do crescimento do lenho de *Araucaria angustifolia* no planalto norte de Santa Catarina. Revista Floresta 47(2), 155-164. <http://dx.doi.org/10.5380/ufv.v47i2.43134>

Orellana, E., Vanclay, J.K., 2018. Could native *Araucaria* forests be managed for timber production on small farms in southern Brazil? Forest Ecology and Management 430, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.07.057>

Orwig, D., Abrams, M., 1997. Variation in radial growth responses to drought among species, site, and canopy strata. Trees 11, 474–484. <https://doi.org/10.1007/s004680050110>

Pillar, V.P., 2006. MULTIV: Multivariate Exploratory Analysis, Randomization Testing and Bootstrap Resampling. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, User's Guide 24.

Rezende, V.L., Oliveira-Filho, A.T., Eisenlohr, P.V., Kamino, L.H.Y., Vibrans, A.C., 2015. Restricted geographic distribution of tree species calls for urgent conservation efforts in the Subtropical Atlantic Forest. Biodiversity and Conservation 24, 1057–1071. <https://doi.org/10.1007/s10531-014-0721-7>

Roig, F. A., 2000. Dencrocronologia en los bosques del Neotrópico: revisión y prospección futura. Dencrocronologia en América Latina: EDIUNC, Mendoza, Argentina, 307-355.

Rozas, V., Desoto, L., Olano, J. M., 2009. Sex-specific, age-dependent sensitivity of tree-ring growth to climate in the dioecious tree *Juniperus thurifera*. New Phytologist 182, 687 - 697. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02770.x>

Rydval, M., Druckenbrod, D., Anchukaitis, K. J., Wilson, R., 2015. Detection and removal of disturbance trends in tree-ring series for dendroclimatology. Canadian Journal of Forest Research 46(3). <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0366>

SANTOS, H. G., 2018. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília: EMBRAPA, 2018, 356 p.

Schulman, E., 1956. Dendroclimatic changes in semiarid America. University of Arizona Press, Tucson.

Scipioni, M. C., Dobner, M. Jr., Longhi, S. J., Vibrans, A. C., Schneider, P.R., 2019. The last giant *Araucaria* trees in southern Brazil. Forestry Science 76(3), 220-226. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-992X-2017-0264>

Scipioni, M. C., Fontana, C., Oliveira, J. M., Junior, L. S., Roig, F. A., Tomazello-Filho, M., 2021. Effects of cold conditions on the growth rates of a subtropical conifer. Dendrochronologia 68, 125858. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125858>

Scipioni, M.C., Neto, A.L., Siminski, A., Santos, V., 2018. Forest edge effects on the phytosociological composition of an *Araucaria* Forest fragment in Southern Brazil. Floresta 48, 483–492. <http://dx.doi.org/10.5380/ufv.v48i4.51281>

Seitz, R., Kanninen, M., 1989. Tree ring analysis of *Araucaria angustifolia* in Southern Brazil: Preliminary results. *Revista Floresta* 18, 55-61. <https://doi.org/10.5380/rf.v18i12.6390>

Silva H.D., Bellote, A.F.J., Ferreira, C.A., Bognola, I.A., 2001. Recomendação de solos para *Araucaria angustifolia* com base nas suas propriedades físicas e químicas. *Boletim de Pesquisa Florestal* 43, 61 – 74.

Souza, A. F., 2007. Ecological interpretation of multiple population size structures in trees: the case of *Araucaria angustifolia* in South America. *Austral Ecology* 32, 524-533. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2007.01724.x>

Souza, M.I.F.D., Salgueiro F., Carnavale-Bottino, M., Félix, D.B., Alves-Ferreira, M., Bittencourt, J.V.M., Margis, R., 2009. Patterns of genetic diversity in southern and southeastern *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze relict populations. *Genetics and Molecular Biology* 32, 546–556. <https://doi.org/10.1590/S1415-47572009005000052>

Stefenon V.M., Gailing O., Finkeldey R., 2007. Genetic structure of *Araucaria angustifolia* (Araucariaceae) populations in Brazil: implications for the *in situ* conservation of genetic resources. *Plant Biology* 9, 516–525. <https://doi.org/10.1055/s-2007-964974>

Thomas, P., 2013. *Araucaria angustifolia*. The IUCN Red List of Threatened Species 2013: e.T32975A2829141. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T32975A2829141.en>. Acesso em 07 de abril de 2023.

Trenberth, K. E., 1997. The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78 (12), 2771-2777. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2)

Wehr N. J., Tomazello-Filho, M., 2000. Tree-ring characterization of *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze trees, applying the X-ray microdensitometry. *Scientia Forestalis* 58, 161–170.

Worbes, M., 2002. One hundred years of tree-ring research in the tropics – a brief history and an outlook to future challenges. *Dendrochronologia* 20, 217-231. <https://doi.org/10.1078/1125-7865-00018>

Wrege, M.S., Higa, R.C.V., Britez R.M., Garrastazu, M.C., Sousa, V.A., Caramori, P.H., Radin, B., Braga, H.J., 2009. El cambio climático y la conservación de *Araucaria angustifolia* en Brasil. *Unasyuva* 60, 231–232.

Zang, C., Biondi.F., 2015. Treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography* 38, 1 - 6. <https://doi.org/10.1111/ecog.01335>

Zanon, M. L. B., Finger, C. G., 2010. Relação de variáveis meteorológicas com o crescimento das árvores de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em povoamentos implantados. *Ciência Florestal* 20 (3), 467-476. <https://doi.org/10.5902/198050982061>.

Zuidema, P.A, et al., 2022. Tropical tree growth driven by dry-season climate variability. *Nature Geoscience* 15, 269–276. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00911-8>

APÊNDICE

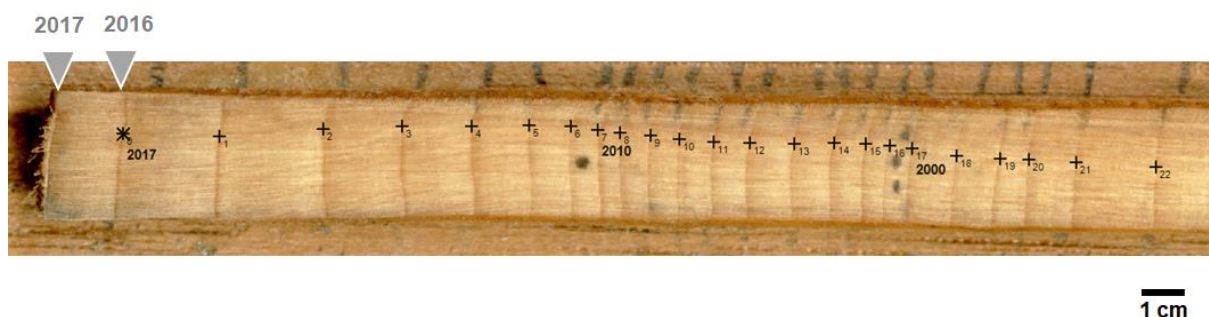


Imagem de uma amostra de CBS1, coletada na primavera de 2018, conforme datada em Scipioni et al. (2021). Nota-se o que anel de crescimento mais externo, originalmente datado como 2018, trata-se de um anel largo e completo (com lenho tardio). Portanto, a data correta deste anel (e de todos os anteriores) deveria ser um ano calendário a menos, ou seja, 2017. Essa correção foi previamente realizada nas análises de CBS1 neste trabalho.