

Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz

Dendroclimatologia e dendroecologia de *Cedrela odorata* L. na Amazônia oriental  
brasileira

Bruna Hornink

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestra em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção  
em: Silvicultura e Manejo Florestal

Piracicaba  
2022

Bruna Hornink  
Engenheira Florestal

Dendroclimatologia e dendroecologia de *Cedrela odorata* L. na Amazônia oriental brasileira

Orientador:  
Prof. Dr. MARIO TOMMASIELLO FILHO

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestra em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção  
em: Silvicultura e Manejo Florestal

Piracicaba  
2022

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**  
**DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Hornink, Bruna

Dendroclimatologia e dendroecologia de *Cedrela odorata* L. na Amazônia oriental brasileira/ Bruna Hornink. -- Piracicaba, 2022.

78 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Anéis de crescimento 2. Alterações climáticas 3. Ecologia 4. Cronologia 5. Densidade do lenho 6. Isótopos estáveis de oxigênio I. Título

## DEDICATÓRIA

Ao meu avô, José Osmar Hornink,  
por acreditar que eu chegaria até aqui.

## AGRADECIMENTOS

Sou grata,

Aos meus pais, Marilsa E. S. Hornink e Ulisses Hornink, e a minha irmã, Carolina Hornink, pelo apoio e carinho ao longo de minha trajetória;

Ao meu noivo, José Philipe M. Godoy, pela compreensão e suporte emocional nos período de maior dedicação ao trabalho, assim como pela contribuição com códigos, que facilitaram o desenvolvimento do mesmo;

Ao meu orientador de anos, Mario Tommasiello Fo, por toda ajuda e orientação;

Aos meus parceiros de trabalho e amigos do LAIM, que me auxiliaram no trabalho: Daigard Ricardo Rodrigues-Ortega, Claudia Fontana, Gabriel Assis-Pereira, Leif A. P. Cahuana, Guilherme Roquette, Isabela Novais, Jíulia Marrafon, Nathan Barretos, Larissa R. Baldini, Aparecido C. Siqueira;

Ao prof. Fidel Roig, por toda conversa e aconselhamento ao longo do projeto;

Ao financiamento da agência de Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001;

A Prof. Luciana K.V.S.Sousa, UFOPA, pela colaboração no processo de coleta de campo e contato com a COOMFLONA;

A Flona Nacional do Tapajós-PA e aos integrantes da COOMFLONA, por disponibilizar sua estrutura e área de trabalho para coleta do material de pesquisa;

Ao Gabriel Assis-Pereira pelo apoio durante a coleta de campo;

Ao Bruno B. L. Cintra e a Milena Godoy-Veigas, do LES/Igc/USP, pela extração da celulose e análises de isótopos estáveis;

Ao projeto PIRE e ao prof. Francisco William da Cruz Jr, pelo financiamento das análises de isótopos estáveis;

Ao Prof. Luiz Carlos Ruiz Pessenda e ao técnico Thiago B. C. Campos por disponibilizar seu ambiente de trabalho para datação por carbono 14 e pesagem da holocelulose;

Ao Técnico Hugo H. Batagelo, laboratório de isótopos estáveis (CENA/USP), por emprestar a microbalança analítica, para a pesagem da holocelulose;

A Daniela Granato-Souza (Uark), por auxiliar na datação das primeira amostras;

A Mariana Pagotto pelos conselhos e revisão preliminar da dissertação;

Ao prof. Marciel Ferreira, Programa nacional de cooperação acadêmica na Amazônia (Edital PROCAD Amazônia 2018 - Linha 2 - Processo N° 88881.199859/2018-01), pelo financiamento da coleta de campo.

E por fim, mas não menos importante, sou grata pela minha persistência e dedicação.

## EPÍGRAFE

*“Faça o teu melhor, na condição que você tem,  
enquanto você não tem condições melhores,  
para fazer melhor ainda!”*

*Mario Sergio Cortella*

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| RESUMO .....   | 8  |
| ABSTRACT .....   | 9  |
| 1. INTRODUÇÃO .....  | 11 |
| Referências .....  | 14 |
| 2. <i>Cedrela</i> P. BROWNE (MELIACEAE), UM GÊNERO POTENCIAL PARA A DENDROCLIMATOLOGIA NA AMAZÔNIA .....     | 19 |
| RESUMO .....   | 19 |
| ABSTRACT .....   |    |
| 2.1. INTRODUÇÃO .....  | 19 |
| 2.2. RETROSPECTIVA DO POTENCIAL DENDROCRONOLÓGICO DO GÊNERO <i>CEDRELA</i> .....                             | 21 |
| 2.3. MATERIAL E MÉTODOS .....  | 27 |
| 2.4. RESULTADOS .....  | 27 |
| 2.5. DISCUSSÃO .....   | 32 |
| 2.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....  | 36 |
| REFERÊNCIAS .....  | 36 |
| 3. DENDROECOLOGIA DE <i>Cedrela odorata</i> AVALIADA POR MÚLTIPLOS PARÂMETROS DOS ANÉIS DE CRESCIMENTO ..... | 43 |
| RESUMO .....   | 43 |
| ABSTRACT .....   |    |
| 3.1. INTRODUÇÃO .....  | 44 |
| 3.2. MATERIAL E MÉTODOS .....  | 46 |
| 3.2.1. Área de estudo .....  | 46 |
| 3.2.2. Coleta do lenho das árvores .....   | 46 |
| 3.2.3. Preparo das amostras do lenho .....   | 47 |
| 3.2.4. Construção das cronologias .....  | 50 |
| 3.2.5. Análises estatísticas .....   | 51 |
| 3.3. RESULTADOS .....  | 53 |
| 3.3.1. Séries cronológicas dos anéis de crescimento .....  | 53 |
| 3.3.2. Relação entre os parâmetros estruturais dos anéis de crescimento .....                                | 55 |
| 3.3.3. Relação entre as cronologias e as variáveis climáticas regionais .....                                | 56 |

|  |    |
|--|----|
| 3.3.4. Relação entre as cronologias e variáveis oceânicas..... | 57 |
| 3.4. DISCUSSÃO .....   | 59 |
| 3.5. CONCLUSÃO.....  | 64 |
| REFERÊNCIAS .....  | 65 |
| 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....                                   | 71 |
| APÊNDICES .....  | 73 |



## RESUMO

### Dendroclimatologia e dendroecologia de árvores de *Cedrela odorata* L. da Amazônia oriental brasileira

Este trabalho parte das constantes alterações fitogeográficas e hidroclimáticas na região da Amazônia, nas últimas décadas. A curto e longo prazo, um dos grandes desafios é determinar os impactos que essas alterações irão gerar na dinâmica florestal e no manejo de espécies tropicais amazônicas. Isso faz necessário a identificação de parâmetros florestais que possam contribuir para a avaliação contínua da dinâmica das florestas tropicais. Este trabalho busca, portanto, a aplicação da dendrocronologia e suas especialidades para estudos ecológicos e climáticos na região da Amazônia oriental, como forma de obtenção de dados paleoclimatológicos e ecológicos da espécie *Cedrela odorata*. Para tanto, este trabalho divide-se em dois capítulos: i) capítulo 01 - *Cedrela* P.Browne (Meliaceae), um gênero potencial para estudos dendroclimatológicos na Amazônia; e capítulo 02 – Dendroecologia de *Cedrela odorata* avaliada por múltiplos parâmetros dos anéis de crescimento.

Palavras-chave: Anéis de crescimento, Alterações climáticas, Ecologia, Cronologia, Densidade do lenho, Isótopos estáveis de oxigênio

## ABSTRACT

### Dendroclimatology and dendroecology of *Cedrela odorata* L. trees from Brazilian eastern Amazon

Phytogeographic and hydroclimatic changes in the Amazon region has increase in recent decades. In the short and long term, one of the greatest challenges is to determine the impacts of these changes on forest dynamics and on the management of tropical Amazonian species. This context highlights the need to identify forest parameters that can contribute to the continuous assessment of forest dynamics. Therefore, this work seekd to apply dendrochronology and its specialties to ecological and climatic studies in the eastern Amazon region, as a way of obtaining paleoclimatological and ecological data on the species *Cedrela odorata*. In order to reach it, this work is divided into two chapters: i) chapter 01 - *Cedrela* P.Browne (Meliaceae), a potential genus for dendroclimatological studies in the Amazon; and chapter 02 – Dendroecology of *Cedrela odorata* evaluated by tree rings multiproxies.

Keywords: Tree-ring, Climte change, Ecology, Chronology, Wood density, Oxygen stable isotope



## 1. INTRODUÇÃO

A floresta tropical amazônica abrange cerca de 5.5 milhões km<sup>2</sup>, distribuídos em nove países da América Latina (Franklin & Pindyck, 2018). A diversidade de serviços e benefícios ecossistêmicos presentes nesse bioma desempenham importante papel na comercialização de produtos florestais (madeireiros e não madeireiros), na prestação de serviços ecossistêmicos, como também no estoque de carbono e dinâmica atmosférica (Fearnside, 1997, 2008; Franklin & Pindyck, 2018). Destaca-se ainda o potencial heliotérmico desta floresta, para absorção de energia solar e reciclagem de grande parte da precipitação nos trópicos, fornecendo informações importantes para o monitoramento da variabilidade climática (Gloor et al., 2015).

Nas últimas décadas, no entanto, mais de 15% do território original amazônico foi alterado, registrando elevação de 0,6-0,7 °C na temperatura atmosférica e proporcionando danos regionais e globais irreversíveis (Marengo & Espinoza, 2016; Franklin & Pindyck, 2018). Estudos recentes já indicam que o ciclo hidrológico da bacia amazônica vem apresentando grande variabilidade, abrangendo longos períodos de inundações e secas, comparado com às décadas anteriores (Gloor et al., 2013; Marengo et al., 2009, 2011, 2016; Espinoza et al., 2019). Essas alterações estão relacionadas às constantes interferências antropogênicas na paisagem Amazônica e a frequência e intensidade de eventos hidroclimáticos, relacionados às anomalias oceânicas e atmosféricas (ex. El Niño Oscilação Sul, anomalias do Atlântico tropical norte e sul, movimentação da célula de Hadley)(Barichivich et al., 2018; Espinoza et al., 2019; Marengo et al., 2020). A intensificação dessas anomalias influenciam nas taxas de evapotranspiração, exposição a irradiação solar, aumento da temperatura do ar, redução da umidade do solo e déficit de pressão de vapor (Buckeridge & Ribeiro, 2018), acentuando o desequilíbrio ecológico e alterando a movimentação de massas de ar responsável pela distribuição de chuva no continente (Alves et al. 2013).

A água, nesse contexto, é um dos principais fatores que afetam o equilíbrio em ecossistemas tropicais (Anderson et al. 2013). Secas resultantes das alterações climáticas tendem a reduzir a biomassa estocada, a composição e a longevidade de espécies tropicais (Bretfeld et al., 2018; Locosselli, et al., 2020). A redução na produção florestal e perda de biomassa está associada a formação da madeira e a processos biológicos, físicos e químicos da árvore (Anderson, et al. 2013), a qual adapta suas estruturas para aumentar a resistência a condução hidráulica no tronco, em resposta ao estresse hídrico induzido pela mudança no clima (Wimmer, 2002; Costa et al., 2020). Os intensos períodos de seca e altas temperaturas registrados já resultaram na elevação da mortalidade de árvores e liberação de carbono na bacia Amazônica (ex. 2005 e 2010, Phillips, 2009; Gatti et al., 2014), indicando a vulnerabilidade dessas florestas às alterações hidrológicas. Assim, um dos principais desafios é determinar quais são os impactos que essas alterações irão gerar na dinâmica florestal e no manejo de espécies tropicais amazônicas, a curto e longo prazo, em um contexto de mudanças climáticas e constantes alterações da composição florestal.

Avaliações contínuas da dinâmica florestal constituem-se em um dos principais indicadores para diagnosticar o estado de equilíbrio e alterações no bioma, sendo apropriada a aplicação da dendrocronologia – ciência que estuda os anéis de crescimento - e suas especialidades (Fritts, 1976; Schweingruber, 1989; Worbes, 1999; Hughes, 2002; Caetano-Andrade et al., 2020). A dendrocronologia utiliza as mensurações de indicadores biológicos registrados nos anéis de crescimento, possibilitando relacioná-los às variáveis ambientais (Tomazello

Filho et al. 2001). Os anéis de crescimento são considerados um dos registros naturais de alta confiança nas datações, sendo capazes de registrar até 60 % da variação anual dos dados de temperatura e precipitação (Hughes, 2002). A associação da largura do anel de crescimento ao seu ano de formação torna possível a construção de séries históricas das condições ambientais e processos ecológicos ao longo do tempo, subsidiando estudos relacionados à restauração (Albuquerque et al., 2019), conservação das florestas (Albiero-Júnior et al., 2019) e mudança climática (Granato-Souza et al., 2020).

As técnicas dendrocronológicas vêm se ampliando globalmente na reconstrução climática como também em estudos que visam a retrospectiva da dinâmica florestal, através da correlação do incremento do lenho com fatores ambientais (Albiero-Júnior et al., 2019; Babst et al., 2014; Baker et al., 2015; Pacheco et al., 2020; Venegas-González et al., 2018), mostrando-se uma ciência multidisciplinar. Nos últimos anos, essa abordagem vem se destacando (Caetano-Andrade et al., 2020), ressaltando a importância de fornecer cada vez mais dados para a manutenção da integridade dos ecossistemas florestais, em um contexto de mudanças climáticas (Franklin & Pindyck, 2018). A temporalidade da dendrocronologia associada a outras análises pode fornecer condições para identificar como a mudança climática vem interferindo na ecologia de espécies tropicais (Caetano-Andrade et al. 2020). Além da largura dos anéis de crescimento, a estrutura anatômica (Fonti & García-González, 2004), densidade intra anual (Pagotto et al., 2017) e a variação de  $\delta^{18}\text{O}$  (Brienen et al., 2012) podem ser indicadores complementares e representativos dessas mudanças, permitindo inferir melhor o período de crescimento mais responsivo às condições chuvosas, como também fomentar a compreensão dos aspectos funcionais das interações planta-ambiente (Caetano-Andrade et al. 2020).

A anatomia do lenho desempenha papel fundamental na condutividade hidráulica, diante das alterações da temperatura, umidade e sazonalidade do ambiente (Ewers & Carlquist, 1990; Wimmer, 2002). Em angiospermas, a alteração do diâmetro, frequência e agrupamento dos vasos são estratégias para evitar o embolismo nos dutos condutores de seiva, submetidos a intensa pressão negativa (Ewers & Carlquist, 1990). Esses parâmetros apresentam alta relação entre o aumento da precipitação e umidade local com a área de vaso no lenho inicial (Hacke & Sperry, 2001). Isso ocorre devido a uma ampla distribuição no número de vasos durante a atividade cambial, para facilitar o transporte de água, enquanto que, em período de dormência, o inverso é observado (De Mil et al., 2018; Wimmer, 2002). Essa relação foi verificada no lenho de espécies com anéis porosos e semi-porosos, como a *Chukrasia tabularis*, na floresta tropical úmida do sul da Ásia (Islam et al., 2018), a *Zelkova carpinifolia*, no norte do Irã (Gholami et al., 2019) e na espécie *Castanea sativa*, no sul dos alpes suíços (Fonti & García-González, 2004), fornecendo informações complementares da resposta do estresse hidrológico às variações ambientais.

A densidade do lenho, por sua vez, é um parâmetro fortemente associado às suas variações anatômicas, sendo mensurada para determinar a sua qualidade (Tomazello-Filho et al., 2008; Rodriguez et al., 2018; Rodriguez & Tomazello-Filho, 2019) e para a construção de modelos ecológicos e de manejo florestal (Pagotto et al., 2017; Pompa-García et al., 2018; Gonçalves et al., 2021). Em espécies arbóreas potenciais a dendrocronologia, às técnicas que mensuram a densidade intra anual, como a densitometria de raios X (Tomazello-Filho et al., 2008) e o *blue intensity* (Björklund et al., 2014), permitem a determinação de parâmetros visuais e quantitativos da densidade que caracterizam o anel de crescimento. Isso possibilita relacioná-lo à fatores climáticos (De Mil et al.,

2018; Schweingruber, 1989) e verificar quais estratégias as espécies tropicais adotam em anos de extrema seca, para evitar efeito como a cavitação (Lachenbruch & Mcculloh, 2014). Assim como verificado para a *Nectandra amazonum*, na região de várzea da Amazônia brasileira (Gonçalves et al., 2021), cuja densidade mínima do lenho da espécie apresentou correlações positivas e significativas com a temperatura mínima local.

Os registros de isótopos estáveis de oxigênio nos anéis de crescimento ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$ ), por outro lado, mostraram-se em muitos estudos estar relacionados ao  $\delta^{18}\text{O}$  da precipitação (Baker et al., 2015, 2016; Brien et al., 2012; Volland et al., 2016; Pagotto et al., 2021), o que o torna um parâmetro interessante para análise paleoclimática (McCarroll & Loader, 2006) e análise da sazonalidade climática de regiões tropicais (Cintra et al., 2021, 2019). Essa relação ocorre pelo processo não fracionado do isótopo de oxigênio durante a absorção da água pelas raízes (Ehleringer & Dawson, 1992), principalmente em espécies com raízes superficiais (Kunert et al., 2010). Devido ao “*amount effect*” observa-se uma relação negativa entre a quantidade de precipitação da chuva e o  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  acumulado, indicando as variações que ocorreram na precipitação (Dansgaard, 1964). Em regiões tropicais diversos estudos foram realizados, destacando principalmente a sua aplicação no gênero *Cedrela* (Baker et al., 2015, 2016; Brien et al., 2005, 2012; Pagotto et al., 2021)

Em regiões neotropicais, diversas espécies arbóreas apresentam ciclos de crescimento sazonais, favorecendo a formação de anéis de crescimento anatomicamente distinguíveis e correspondentes às variações do clima (Worbes, 2002; Brien et al., 2016). A visualização dos anéis é mais favorável em espécies decíduas (Brien et al., 2016) ou em espécies de florestas de planícies de inundação (Schöngart et al., 2007), uma vez que essas condições favorecem o período de dormência cambial e, conseqüentemente, a formação de anéis de crescimento (Schweingruber, 1989). No entanto, pesquisas recentes indicam que a periodicidade anual dos anéis de crescimento foi comprovada para 230 espécies tropicais, com crescimento médio de 200 anos, podendo atingir 500 anos, e que respondem principalmente às variações de precipitação e temperatura (Brien et al., 2016). No Brasil, um estudo avaliando 491 espécies, oriundas de diferentes regiões geográficas brasileiras, identificou que 48% apresentam um marcador de crescimento (Alves & Angyalossy-Alfonso, 2000). Na Amazônia peruana, dentre 183 espécies que tiveram a anatomia caracterizada, 102 apresentaram anéis de crescimento bem marcantes a moderado (Marcelo-Peña et al., 2020), enquanto que em regiões com mais de 7.200 mm de precipitação foram identificadas mais de 30 espécies com alto a médio potencial dendrocronológico (Giraldo et al., 2020).

Dentre os gêneros de espécies neotropicais arbóreas com grande potencial para estudos dendrocronológicos, destaca-se a *Cedrela* L., pertencente à família Meliaceae (Tomazello Filho et al., 2000; Lisi et al., 2020). Este gênero vem despertando grande interesse para os estudos ecológicos e climáticos em diferentes regiões por apresentar i) anéis de crescimento anuais altamente distinguíveis, marcados por bandas de parênquima marginal e semi porosidade (Dünisch et al., 2003; Tomazello-Filho et al., 2013; Callado et al., 2014); ii) distribuição em todo o neotrópico (Muellner et al., 2009); iii) rápido crescimento radial (Brien & Zuidema, 2003); iv) comportamento decidual (Callado et al., 2013; Andreacci et al., 2017); e v) sistema radicular superficial, com sensibilidade climática a precipitação (Hietz et al., 2005; Brien & Zuidema, 2005; Dünisch, 2003, 2005; Granato-Souza, et al., 2019, 2020). Estudos prévios da largura dos anéis de crescimento e de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  de *Cedrela* já comprovaram a anualidade dos anéis de crescimentos (Baker et al., 2016; Santos et al., 2020) e a estreita relação entre a largura dos anéis, a precipitação e o El Niño Oscilação Sul (Dünisch, 2005; Brien et al., 2012; Humanes-

Fuente et al., 2020), possibilitando a construção de cronologias temporais para reconstruções climáticas (Granato-Souza et al., 2020; Stahle et al., 2020)

Portanto, na perspectiva de que a *Cedrela* L. possibilita a construção de cronologias longevas de incremento em largura, área de vasos, densidade e razão isotópica de oxigênio para compreensão ecológica e climática, o presente trabalho tem por **objetivo geral** analisar como as variáveis climáticas influenciam as estratégias ecológicas de *Cedrela spp* na Amazônia, sendo os **objetivos específicos**: i) Avaliar a influência climática no crescimento radial, na microdensidade e na estrutura hidráulica da espécie estudada; e ii) Aplicar  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  para caracterizar a variabilidade climática da região amazônica. A fim de alcançar os objetivos, o trabalho será dividido em 2 capítulos, sendo o **capítulo 01** - *Cedrela* P.Browne (Meliaceae), um gênero potencial estudos dendroclimatológicos na Amazônia; e **capítulo 02** – Dendroecologia de *Cedrela odorata* avaliada por múltiplos parâmetros dos anéis de crescimento.

## Referências

- Albiero-Júnior, A., Venegas-González, A., Botosso, P. C., Roig, F. A., Camargo, J. L. C., & Tomazello-Filho, M. (2019). What is the temporal extension of edge effects on tree growth dynamics? A dendrochronological approach model using *Scleronema micranthum* (Ducke) Ducke trees of a fragmented forest in the Central Amazon. *Ecological Indicators*, 101(November 2018), 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.040>
- Albuquerque, R. P., Brandes, A. F. N., Lisi, C. S., Moraes, L. F. D. De, & Barros, C. F. (2019). Tree-ring formation, radial increment and climate–growth relationship: assessing two potential tree species used in Brazilian Atlantic forest restoration projects. *Trees - Structure and Function*, 33(3), 877–892. <https://doi.org/10.1007/s00468-019-01825-6>
- Alves, E. S., & Angyalossy-Alfonso, V. (2000). Ecological trends in the wood anatomy of Vacciniioideae (Ericaceae s.l.). *IAWA*, 199(4), 309–319. <https://doi.org/10.1078/0367-2530-0058>
- Alves, L. ., Marengo, J. ., & Cavalcanti, I. F. . (2013). Histórico de secas na Amazônia. In *Secas na Amazônia: causas e consequências* (Vol. 53, Issue 9).
- Anderson LO, Aragão L, Valeriano DS, Cardoso M, Shimambukuro Y, Lima A (2013) Impactos das secas nas florestas Amazonicas. In: De Simone Borma L, Nobre CA (eds) *Secas na Amazonia: Causas e Consequencias*. Oficina de Textos Press, Sao Paulo
- Andreacci, F., Botosso, P. C., & Galvão, F. (2017). Fenologia Vegetativa e Crescimento de *Cedrela fissilis* na Floresta e Ambiente, 24.
- Babst, F., Alexander, M. R., Szejner, P., Bouriaud, O., Klesse, S., Roden, J., Ciais, P., Poulter, B., Frank, D., Moore, D. J. P., & Trouet, V. (2014). A tree-ring perspective on the terrestrial carbon cycle. *Oecologia*, 176(2), 307–322. <https://doi.org/10.1007/s00442-014-3031-6>
- Baker, J. C.A., Gloor, M., Spracklen, D. V., Arnold, S. R., Tindall, J. C., Clerici, S. J., Leng, M. J., & Brien, R. J. W. (2016). What drives interannual variation in tree ring oxygen isotopes in the Amazon? *Geophysical Research Letters*, 43(22), 11,831–11,840. <https://doi.org/10.1002/2016GL071507>
- Baker, Jessica C.A., Hunt, S. F. P., Clerici, S. J., Newton, R. J., Bottrell, S. H., Leng, M. J., Heaton, T. H. E., Helle, G., Argollo, J., Gloor, M., & Brien, R. J. W. (2015). Oxygen isotopes in tree rings show good coherence between species and sites in Bolivia. *Global and Planetary Change*, 133, 298–308. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.09.008>
- Björklund, J. A., Gunnarson, B. E., Seftigen, K., Esper, J., & Linderholm, H. W. (2014). Blue intensity and density from northern Fennoscandian tree rings, exploring the potential to improve summer temperature reconstructions with earlywood information. *Clim. Past*, 10(2), 877–885. <https://doi.org/10.5194/cp-10-877-2014>
- Bretfeld, M., Ewers, B. E., & Hall, J. S. (2018). Plant water use responses along secondary forest succession during the 2015–2016 El Niño drought in Panama. *New Phytologist*, 219(3), 885–899. <https://doi.org/10.1111/nph.15071>
- Brien, R. J. W., & Zuidema, P. A. (2003). el manejo de bosques y una guía metodológica UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES (IGEMA). April.
- Brien, R. J. W., & Zuidema, P. A. (2005). Relating tree growth to rainfall in Bolivian rain forests: A test for six species using tree ring analysis. *Oecologia*, 146(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0160-y>
- Brien, R. J. W., Gloor, E., & Zuidema, P. A. (2012). Detecting evidence for CO<sub>2</sub> fertilization from tree ring studies: The potential role of sampling biases. *Global Biogeochemical Cycles*, 26(1). <https://doi.org/10.1029/2011GB004143>
- Brien, R. J. W., Schöngart, J., & Zuidema, P. A. (2016). Tree Rings in the Tropics: Insights into the Ecology and Climate Sensitivity of Tropical Trees. 439–461. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-27422-5\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-319-27422-5_20)
- Buckeridge, Ma., Ribeiro, W.C., 2018. Livro branco da água. A crise hídrica na Região Metropolitana de São Paulo em 2013 - 2015: Origens, impactos e soluções, First. ed. Instituto de Estudos Avançados, São Paulo.
- Caetano-Andrade, V. L., Clement, C. R., Weigel, D., Trumbore, S., Boivin, N., Schöngart, J., & Roberts, P. (2020). Tropical Trees as Time Capsules of Anthropogenic Activity. *Trends in Plant Science*, 25(4), 369–380. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.12.010>

- Callado, C. H., Barros, C. F., Costa, M. S., & De Vasconcellos, T. J. (2013). Does growth rhythm of a widespread species change in distinct growth sites. *IAWA Journal*, 34(4), 498–509. <https://doi.org/10.1163/22941932-00000040>
- Callado, C. H., de Vasconcellos, T. J., Costa, M. S., Barros, C. F., Roig, F. A., & Tomazello-Filho, M. (2014). Studies on cambial activity: Advances and challenges in the knowledge of growth dynamics of Brazilian woody species. *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, 86(1), 277–283. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201320130033>
- Cintra, B. B. L., Gloor, M., Boom, A., Schöngart, J., Locosselli, G. M., & Brienens, R. (2019). Contrasting controls on tree ring isotope variation for Amazon floodplain and terra firme trees. *Tree Physiology*, 39(5), 845–860. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpz009>
- Costa, W., Silva, Da Cunha, M., José F. Pena Rodrigues, P., de Andrade Iguatemy, M., Valladares, F., & Franca Barros, C. (2020). Intraspecific variation in functional wood anatomy of tropical trees caused by effects of forest edge. *Forest Ecology and Management*, 473(March), 118305. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118305>
- Dansgaard, W. (1964). Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16(4), 436–468. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v16i4.8993>
- De Mil, T., Tarelkin, Y., Hahn, S., Hubau, W., Deklerck, V., Debeir, O., Van Acker, J., de Cannière, C., Beeckman, H., & Van den Bulcke, J. (2018). Wood density profiles and their corresponding tissue fractions in tropical angiosperm trees. *Forests*, 9(12). <https://doi.org/10.3390/f9120763>
- 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(1), 5–11.
- Dünisch, Oliver, Montóia, V. R., & Bauch, J. (2003). Dendroecological investigations on *Swietenia macrophylla* King and *Cedrela odorata* L. (Meliaceae) in the central Amazon. *Trees - Structure and Function*, 17(3), 244–250. <https://doi.org/10.1007/s00468-002-0230-2>
- Ehleringer, J. R., & Dawson, T. E. (1992). Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition. *Plant, Cell & Environment*, 15(9), 1073–1082. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1992.tb01657.x>
- Espinoza, J. C., Ronchail, J., Marengo, J. A., & Segura, H. (2019). Contrasting North–South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981–2017). *Climate Dynamics*, 52(9–10), 5413–5430. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4462-2>
- Ewers, F. W., & Carlquist, S. (1990). Comparative Wood Anatomy: Systematic, Ecological, and Evolutionary Aspects of Dicotyledon Wood. *Taxon*, 39(1), 67. <https://doi.org/10.2307/1223183>
- Fearnside, P. M. (2008). Amazon forest maintenance as a source of environmental services. *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, 80(1), 101–114. <https://doi.org/10.1590/s0001-37652008000100006>
- Fearnside, P. M. (2008). Amazon forest maintenance as a source of environmental services. *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, 80(1), 101–114. <https://doi.org/10.1590/s0001-37652008000100006>
- Fonti, P., & García-González, I. (2004). Suitability of chestnut earlywood vessel chronologies for ecological studies. *New Phytologist*, 163(1), 77–86. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01089.x>
- Franklin, S. L., & Pindyck, R. S. (2018). Tropical Forests, Tipping Points, and the Social Cost of Deforestation. *Ecological Economics*, 153(June), 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.06.003>
- Fritts, H. C. (1976). Dendrochronology and Dendroclimatology. In H. C. FRITTS (Ed.), *Tree Rings and Climate* (pp. 1–54). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-268450-0.50006-9>
- Gatti, L. V., Gloor, M., Miller, J. B., Doughty, C. E., Malhi, Y., Domingues, L. G., Basso, L. S., Martinewski, A., Correia, C. S. C., Borges, V. F., Freitas, S., Braz, R., Anderson, L. O., Rocha, H., Grace, J., Phillips, O. L., & Lloyd, J. (2014). Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements. *Nature*, 506(7486), 76–80. <https://doi.org/10.1038/nature12957>
- Gholami, V., Torkaman, J., & Dalir, P. (2019). Simulation of precipitation time series using tree-rings , earlywood vessel features , and artificial neural network. 1939–1948.
- Giraldo, J. A., del Valle, J. I., Sierra, C. A., & Melo, O. (2020). Dendrochronological Potential of Trees from America’s Rainiest Region. In M. Pompa-García & J. J. Camarero (Eds.), *Latin American Dendroecology: Combining Tree-Ring Sciences and Ecology in a Megadiverse Territory* (pp. 79–119). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-36930-9\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-36930-9_5)
- Gloor, M., Barichivich, J., Ziv, G., Brienens, R., Schöngart, J., & Peylin, P. (2015). Recent Amazon climate as background for possible ongoing Special Section : Global Biogeochemical Cycles, 29(9), 1384–1399. <https://doi.org/10.1002/2014GB005080>. Received
- Gloor, M., Brienens, R. J. W., Galbraith, D., Feldpausch, T. R., Schöngart, J., Guyot, J. L., Espinoza, J. C., Lloyd, J., & Phillips, O. L. (2013). Intensification of the Amazon hydrological cycle over the last two decades. *Geophysical Research Letters*, 40(9), 1729–1733. <https://doi.org/10.1002/grl.50377>
- Gonçalves, J. Q., Durgante, F. M., Wittmann, F., Piedade, M. T. F., Ortega Rodriguez, D. R., Tomazello-Filho, M., Parolin, P., & Schöngart, J. (2021). Minimum temperature and evapotranspiration in Central Amazonian floodplains limit tree growth of *Nectandra amazonum* (Lauraceae). *Trees - Structure and Function*, 35(4), 1367–1384. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02126-7>
- Granato-Souza, D., Stahle, D. W., Barbosa, A. C., Feng, S., Torbenson, M. C. A., de Assis Pereira, G., Schöngart, J., Barbosa, J. P., & Griffin, D. (2019). Tree rings and rainfall in the equatorial Amazon. *Climate Dynamics*, 52(3–4), 1857–1869. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4227-y>
- Granato-Souza, D., Stahle, D. W., Torbenson, M. C. A., Howard, I. M., Barbosa, A. C., Feng, S., Fernandes, K., & Schöngart, J. (2020). Multidecadal Changes in Wet Season Precipitation Totals Over the Eastern Amazon. *Geophysical Research Letters*, 47(8), 1–9. <https://doi.org/10.1029/2020GL087478>



- Hacke, U., & Sperry, J. S. (2001). Functional and ecological xylem anatomy. *Urban & Fischer Verlag*, 4/2, 97–115. <https://doi.org/1433-8319/01/4/02-97>
- Hietz, P., Wanek, W., & Dünisch, O. (2005). Long-term trends in cellulose  $\delta^{13}\text{C}$  and water-use efficiency of tropical *Cedrela* and *Swietenia* from Brazil. *Tree Physiology*, 25(6), 745–752. <https://doi.org/10.1093/treephys/25.6.745>
- Hughes, M. K. (2002). Hughes et al 2002 Dendrochronology in climatology.pdf. 2, 95–116.
- Humanes-Fuente, V., Ferrero, M. E., Muñoz, A. A., González-Reyes, Requena-Rojas, E. J., Barichivich, J., Inga, J. G., & Layme-Huaman, E. T. (2020). Two Centuries of Hydroclimatic Variability Reconstructed From Tree-Ring Records Over the Amazonian Andes of Peru. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(18), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2020JD032565>
- Islam, M., Rahman, M., & Bräuning, A. (2018). Xylem anatomical responses of diffuse porous *Chukrasia tabularis* to climate in a South Asian moist tropical forest. *Forest Ecology and Management*, 412(February), 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.01.035>
- Kunert, N., Schwendenmann, L., & Hölscher, D. (2010). Seasonal dynamics of tree sap flux and water use in nine species in Panamanian forest plantations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(3), 411–419. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.01.006>
- Lachenbruch, B., & Mcculloh, K. A. (2014). Traits, properties, and performance: How woody plants combine hydraulic and mechanical functions in a cell, tissue, or whole plant. *New Phytologist*, 204(4), 747–764. <https://doi.org/10.1111/nph.13035>
- Lisi, C. S., Pagotto, M. A., Anholetto, C. R., Nogueira, F. C., Santos, H. L., Costa, C. M., Menezes, Í. R. N., Roig Juñet, F. A., & Tommasiello Filho, M. (2020). Dendroecological Studies with *Cedrela odorata* L., Northeastern Brazil. In M. Pompa-García & J. J. Camarero (Eds.), *Latin American Dendroecology: Combining Tree-Ring Sciences and Ecology in a Megadiverse Territory* (pp. 37–59). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-36930-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-36930-9_3)
- Locosselli, G. M., Brienen, R. J. W., de Souza Leite, M., Gloor, M., Krottenhaler, S., de Oliveira, A. A., Barichivich, J., Anhof, D., Ceccantini, G., Schöngart, J., & Buckeridge, M. (2021). Global tree-ring analysis reveals rapid decrease in tropical tree longevity with temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(52), 33358–33364. <https://doi.org/10.1073/PNAS.2003873117>
- Marcelo-Peña, J. L., Roig, F. A., Goodwin, Z. A., & Tomazello-Filho, M. (2020). Characterizing growth rings in the trees of Perú: A wood anatomical overview for potential applications in dendroecological-related fields. *Dendrochronologia*, 62(April 2019), 125728. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125728>
- Marengo, J. A., & Espinoza, J. C. (2016). Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: Causes, trends and impacts. *International Journal of Climatology*, 36(3), 1033–1050. <https://doi.org/10.1002/joc.4420>
- Marengo, J., Nobre, C. a, Betts, R. a, Cox, P. M., Sampaio, G., & Salazar, L. (2009). Aquecimento Global e Mudança Climática na Amazônia: Retroalimentação Clima-Vegetação e Impactos nos Recursos Hídricos. 20. <https://doi.org/10.1029/2008GM000743>
- Marengo, Jose A, Tomasella, J., Alves, L. M., Soares, W. R., & Rodriguez, D. A. (2011). The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. 38, 1–5. <https://doi.org/10.1029/2011GL047436>
- McCarroll, D., & Loader, N. J. (2006). ISOTOPES IN TREE RINGS. In M. J. Leng (Ed.), *Isotopes in Palaeoenvironmental Research* (pp. 67–116). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/1-4020-2504-1\\_02](https://doi.org/10.1007/1-4020-2504-1_02)
- Muellner, A. N., Pennington, T. D., & Chase, M. W. (2009). Molecular phylogenetics of Neotropical *Cedreleae* (mahogany family, Meliaceae) based on nuclear and plastid DNA sequences reveal multiple origins of “*Cedrela odorata*.” *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 52(2), 461–469. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2009.03.025>
- Pacheco, A., Camarero, J. J., Pompa-García, M., Battipaglia, G., Voltas, J., & Carrer, M. (2020). Growth, wood anatomy and stable isotopes show species-specific couplings in three Mexican conifers inhabiting drought-prone areas. *Science of the Total Environment*, 698, 134055. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134055>
- Pagotto, M. A., DeSoto, L., Carvalho, A., Nabais, C., Tomazello Filho, M., Ribeiro, A., & Lisi, C. S. (2017). Evaluation of X-ray densitometry to identify tree-ring boundaries of two deciduous species from semi-arid forests in Brazil. *Dendrochronologia*, 42, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.01.007>
- Pagotto, M. A., Menezes, I. R. N., Costa, C. M., Lisi, C. S., & Bräuning, A. (2021). Oxygen isotopes in tree rings of *Cedrela odorata* L. as an indicator of hydroclimate variations in a seasonally dry tropical forest in northeastern Brazil. *Trees - Structure and Function*, 2(0123456789). <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02158-z>
- Phillips, O. L. (2009). Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest. <https://doi.org/10.1126/science.1164033>
- Pompa-García, M., Venegas-González, A., Júnior, A. A., & Sigala-Rodríguez, J. A. (2018). Dendroecological Approach to Assessing Carbon Accumulation Dynamics in Two *Pinus* Species from Northern Mexico. *Tree-Ring Research*, 74(2), 196–209. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-74.2.196>
- Rodriguez, D. R., & Tomazello-Filho, M. (2019). Clues to wood quality and production from analyzing ring width and density variabilities of fertilized *Pinus taeda* trees. *New Forests*, 11. <https://doi.org/10.1007/s11056-018-09702-9>
- Rodriguez, D. R., Andrade, G. de C., Bellote, A. F. J., & Tomazello-Filho, M. (2018). Effect of pulp and paper mill sludge on the development of 17-year-old loblolly pine (*Pinus taeda* L.) trees in Southern Brazil. *Forest Ecology and Management*, 422(April), 179–189. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.04.016>
- Santos, G. M., Granato-Souza, D., Barbosa, A. C., Oelkers, R., & Andreu-Hayles, L. (2020). Radiocarbon analysis confirms annual periodicity in *Cedrela odorata* tree rings from the equatorial Amazon. *Quaternary Geochronology*, 58, 101079. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2020.101079>

- Schweingruber, Fritz Hans. (1989). Tree rings Basics and Applications of Dendrochronology. In Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-1273-1>
- Stahle, D. W., Torbenson, M. C. A., Howard, I. M., Granato-Souza, D., Barbosa, A. C., Feng, S., Schöngart, J., Lopez, L., Villalba, R., Villanueva, J., & Fernandes, K. (2020). Pan American interactions of Amazon precipitation, streamflow, and tree growth extremes. *Environmental Research Letters*, 15(10). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ababc6>
- Tomazello Filho, M., Botosso, P. C., Lisi, C. S., & Roig, F. A. (2000). Potencialidade da família Meliaceae para dendrocronologia em regiões tropicais e subtropicais. *Dendrocronología En América Latina*. Editorial de La Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, August 2015, 381–431.
- Tomazello, M., Brazolin, S., Chagas, M. P., Oliveira, J. T. S., Ballarin, A. W., & Benjamin, C. A. (2008). Application of x-ray technique in nondestructive evaluation of eucalypt wood. *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, 10(2), 139–149. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2008000200006>
- Tomazello-Filho, M., Barros, C. F., Callado, C. H., & Roig, F. A. (2013). Cambial growth periodicity studies of south american woody species-a review. *IAWA Journal*, 34(3), 213–230. <https://doi.org/10.1163/22941932-00000019>
- Tomazello-Filho, M., Botosso, P. C., & Lisi, C. S. (2001). Análise e aplicação dos anéis de crescimento das árvores como indicadores ambientais: dendrocronologia e dendroclimatologia. *Indicadores Ambientais: Conceitos e Aplicações*, January, 117–143.
- Venegas-González, A., Roig, F. A., Lisi, C. S., Junior, A. A., Alvares, C. A., & Tomazello-Filho, M. (2018). Drought and climate change incidence on hospot Cedrela forests from the Mata Atlântica biome in southeastern Brazil. *Global Ecology and Conservation*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00408>
- Volland, F., Pucha, D., & Bräuning, A. (2016). Hydro-climatic variability in southern ecuador reflected by tree-ring oxygen isotopes. *Erdkunde*, 70(1), 69–82. <https://doi.org/10.3112/erdkunde.2016.01.05>
- Wimmer, R. (2002). Wood anatomical features in tree-rings as indicators of environmental change. *Dendrochronologia*, 20(1–2), 21–36.
- Worbes, M. (1999). Annual growth rings, rainfall-dependent growth and long-term growth patterns of tropical trees from the Caparo Forest Reserve in Venezuela. *Journal of Ecology*, 87(3), 391–403. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.1999.00361.x>



## 2. *Cedrela* P. BROWNE (MELIACEAE), UM GÊNERO POTENCIAL PARA A DENDROCLIMATOLOGIA NA AMAZÔNIA

### RESUMO

As alterações climáticas vêm exigindo, cada vez mais, informações sobre os impactos do aumento da temperatura no neotrópico, em especial na floresta tropical amazônica. O gênero *Cedrela* mostrou grande potencial para pesquisas dendroclimatológicas, podendo contribuir na obtenção dessas informações. Nesse estudo, avaliam-se artigos em dendrocronologia aplicados ao gênero *Cedrela*, publicados entre 2000 a 2021, na região da Amazônia. Busca-se discutir as seguintes questões: onde, como e quais cronologias, utilizando o gênero, já foram produzidas na Amazônia? Quais parâmetros dos anéis de crescimento melhor respondem às variações climáticas? E quais pesquisas já foram conduzidas e as oportunidades para futuros trabalhos na região? Baseado na literatura, verifica-se um grande potencial dendrocronológico do gênero, em especial *C. odorata*, para estudos ecológicos e climatológicos, voltados para análise da largura e sinal isotópico de oxigênio nos anéis de crescimento. Destaca-se a necessidade de mais informações sobre anatomia do lenho, formação dos anéis de crescimento, sistema radicular de outras espécies do gênero. Como também, a exploração de outros parâmetros, como anatomia quantitativa e densidade interanual, para avaliações da estrutura hidráulica e mecânica de espécies sob estresse hídrico.

**Palavras-chave:** Meliaceae, Dendrocronologia, Dendroclimatologia, Anéis de crescimento.

### ABSTRACT

Climate change is increasingly demanding information on the impacts of temperature increases in the Neotropics, especially in the Amazon rainforest. The *Cedrela* genus showed great potential for dendroclimatological research, and may contribute to obtaining this information. In this study, articles in dendrochronology applied to the *Cedrela*, published between 2000 and 2021, in the Amazon region are evaluated. It seeks to discuss the following questions: where, how and which chronologies of *Cedrela* have already been produced in the Amazon? Which tree ring parameters best respond to climatic variations? And what research has already been conducted and the opportunities for future work in the region? Based on the literature, the genus *Cedrela* has great dendrochronological potential, especially *C. odorata*, for ecological and climatological studies. Tree ring width and the oxygen stable isotopic signal are the main proxies applied. There is a need for more information on wood anatomy, cambial activity, root system of other species of the genus. As well as the exploration of other proxies, such as quantitative anatomy and interannual density, to evaluate the hydraulic and mechanical structure of species under water stress.

**Keywords:** Meliaceae, Dendrochronology, Dendroclimatology, Tree-ring.

### 2.1. Introdução

A mudança climática é o principal desafio deste século (IPCC, 2021) e que contribui para o aumento da frequência e intensidade de eventos hidroclimáticos em regiões tropicais, incluindo a bacia amazônica (Espinoza et al., 2019). Nas últimas décadas, mais de 15 % do território original amazônico foi alterado (Franklin & Pindyck, 2018) e se registra elevação de 0,6-0,7 °C na temperatura atmosférica (Marengo & Espinoza, 2016),

proporcionando danos regional (ex. impacto na biodiversidade, no agronegócio, serviços ecossistêmicos) e global (ex. na segurança biológica, dinâmica atmosférica) (Reis et al., 2021; Leite-Filho et al., 2021; Locosselli et al., 2021). Os danos causados por essas alterações despertam cada vez mais a necessidade de análises paleoclimáticas e construção de modelos preditivos para compreender o efeito da mudança climática na floresta tropical amazônica, a curto e longo prazos (Espinoza et al., 2014, 2019; Marengo et al., 2012, 2013). No entanto, a difusão de estações meteorológicas na Amazônia somente ocorreu nos últimos 70 anos e está sujeita a um significativo número de registros incertos, durante os primeiros anos de observação (Granato-Souza et al., 2020). Nesse sentido, o potencial temporal e a sensibilidade climáticas dos anéis de crescimento de árvores tropicais representam uma peça chave para contribuir com avaliações contínuas da dinâmica florestal e climáticas na floresta tropical amazônica (Fritts, 1976; Schweingruber, 1989; Worbes, 1999; Hughes, 2002).

A dendrocronologia neotropical é uma ciência recente (Schöngart et al., 2017), que vem mostrando grande potencial para estudos em ecologia (Pompa-García et al., 2018), conservação florestal (Albiero-Júnior et al., 2019) e reconstrução climática (Granato-Souza et al., 2020). Essa crescente aplicação está ligada ao seu potencial multidisciplinar, que associa às características dos anéis de crescimento (e.g.: largura, densidade, registro isotópico, elemento químicos, entre outros) ao ano de formação, para a construção de séries históricas das condições ambientais e processos ecológicos (Baker et al., 2015; Alves et al., 2021; Gonçalves et al., 2021). Essa abordagem integrada traz uma nova perspectiva ecológica das espécies arbóreas tropicais, relacionando as funções fisiológicas e genéticas das plantas (Caetano-Andrade et al., 2020) e fortalecendo a manutenção e integridade das florestas (Rodríguez-Ramírez & Luna-Vega, 2020). No entanto, para fins climatológicos, ainda são poucas as cronologias construídas na Amazônia e publicadas em repositórios internacionais de livre acesso, como o *International Tree-Ring Data Bank* (ITRDB). Até o presente momento, foram publicadas no ITRDB somente sete cronologias de anéis de crescimento (Ballantyne et al., 2011; Köhl et al., 2017; Lopez et al., 2017; Granato-Souza et al., 2019, 2020) e três cronologias de reconstrução climática a partir dos anéis de crescimento, de espécies da floresta amazônica (Granato-Souza et al., 2019, 2020; Lopez et al., 2017)

Apesar do grande número de espécies tropicais com potencial dendrocronológico (Brienen et al., 2016; Barbosa et al., 2018; Rodríguez-Ramírez & Luna-Vega, 2020), ainda são muitas as espécies que necessitam de estudos mais aprofundados sobre a periodicidade dos anéis de crescimento, os fatores que influenciam o crescimento e a sensibilidade climática (Giraldo et al., 2020; Marcelo-Peña et al., 2020). Em contraponto, nos últimos anos, o gênero neotropical *Cedrela P. Browne* vem se destacando por suas características anatômicas, ecológicas, fenológicas e fisiológicas, chamando a atenção dos pesquisadores em dendrocronologia para a sua aplicação na dendroclimatologia neotropical, em especial na floresta tropical amazônica (Brienen & Zuidema, 2005; Dünisch, 2003, 2005; Volland et al., 2016; Layme-Huaman et al., 2018; Granato-Souza et al., 2019, 2020; Stahle et al., 2020).

Este trabalho busca responder às seguintes questões: Onde, como e quais cronologias, utilizando o gênero *Cedrela*, já foram produzidas na Amazônia? Quais parâmetros dos anéis de crescimento melhor respondem às variações climáticas? E quais pesquisas já foram conduzidas e as oportunidades para futuros trabalhos na região?

## 2.2. Retrospectiva do potencial dendrocronológico do gênero *Cedrela*

*Cedrela* P. Browne é um gênero da família Meliaceae, distribuída por grande parte dos países do neotrópico (Pennington et al., 2010). O gênero abrange, oficialmente, 17 espécies reconhecidas (*Cedrela balansae* C.DC., *Cedrela domatifolia* W.Palacios, *Cedrela eolancifolia* MacGinitie, *Cedrela fissilis* Vell., *Cedrela kuelapensis* T.D.Penn. & Daza, *Cedrela lilloi* C.DC., *Cedrela molinensis* T.D.Penn. & Reynel, *Cedrela monroensis* T.D.Penn., *Cedrela montana* Moritz ex Turcz., *Cedrela nebulosa* T.D.Penn. & Daza, *Cedrela ngobe* Köcke, T.D.Penn. & Muellner, *Cedrela oaxacensis* C.DC. & Rose ex Rose, *Cedrela odorata* L., *Cedrela saltensis* M.A.Zapater & del Castillo, *Cedrela salvadorensis* Standl., *Cedrela tonduzii* C.DC. e *Cedrela weberbaueri* Harms) (Pennington et al., 2010, The Plant List, 2021). O potencial do gênero aplicado à dendrocronologia nas regiões tropicais e subtropicais é ressaltada no início do século vinte-um por Tomazello et al. (2000), trazendo o uso das espécies para estudos em ecologia, clima e manejo florestal. Recentemente, Lisi et al. (2020) apresentaram novos estudos em dendrocronologia desenvolvidos com o gênero nos últimos 20 anos, trazendo avanços no tema com a aplicação do radiocarbono e isótopos estáveis de  $^{13}\text{C}$  e  $^{18}\text{O}$ , além de comprovar a aplicação do gênero nos estudos dendrocronológicos no Nordeste brasileiro. Dentre essa gama de espécies, a dendrocronologia já foi utilizada como técnica em muitas, como: *Cedrela fissilis* (Paredes-Villanueva et al. 2016, Andreacci et al. 2014, Menezes et al., 2022), *Cedrela odorata* (Köhl et al. 2017, Espinoza et al. 2014, Becerra-Montalvo and Zevallos-Pollito 2014), *Cedrela montana* (Bräuning et al. 2009, Volland et al. 2016), *Cedrela angustifolia* (Paredes-Villanueva et al. 2016, Tomazello-Filho et al. 2001), *Cedrela nebulosa* (Layme-Huaman et al. 2018) e *Cedrela lilloi* (Grau, 2000).

Nessas pesquisas, algumas características principais do gênero são destacadas e que potencializam a aplicação das espécies na dendrocronologia, sendo: i) anéis de crescimento anuais distinguíveis (Callado et al., 2014; Dünisch et al., 2002, 2003; Tomazello-Filho et al., 2013, Barbosa et al. 2018); ii) ampla distribuição em todo o neotrópico (Muellner et al., 2009); iii) comportamento decidual (Callado et al., 2013; Andreacci et al., 2017); e iv) sistema radicular superficial, com sensibilidade climática à precipitação (Brienen & Zuidema, 2005; Dünisch, 2005, 2003; Granato-Souza et al., 2019, 2020; Hietz et al., 2005).

### **Anatomia e formação dos anéis de crescimento**

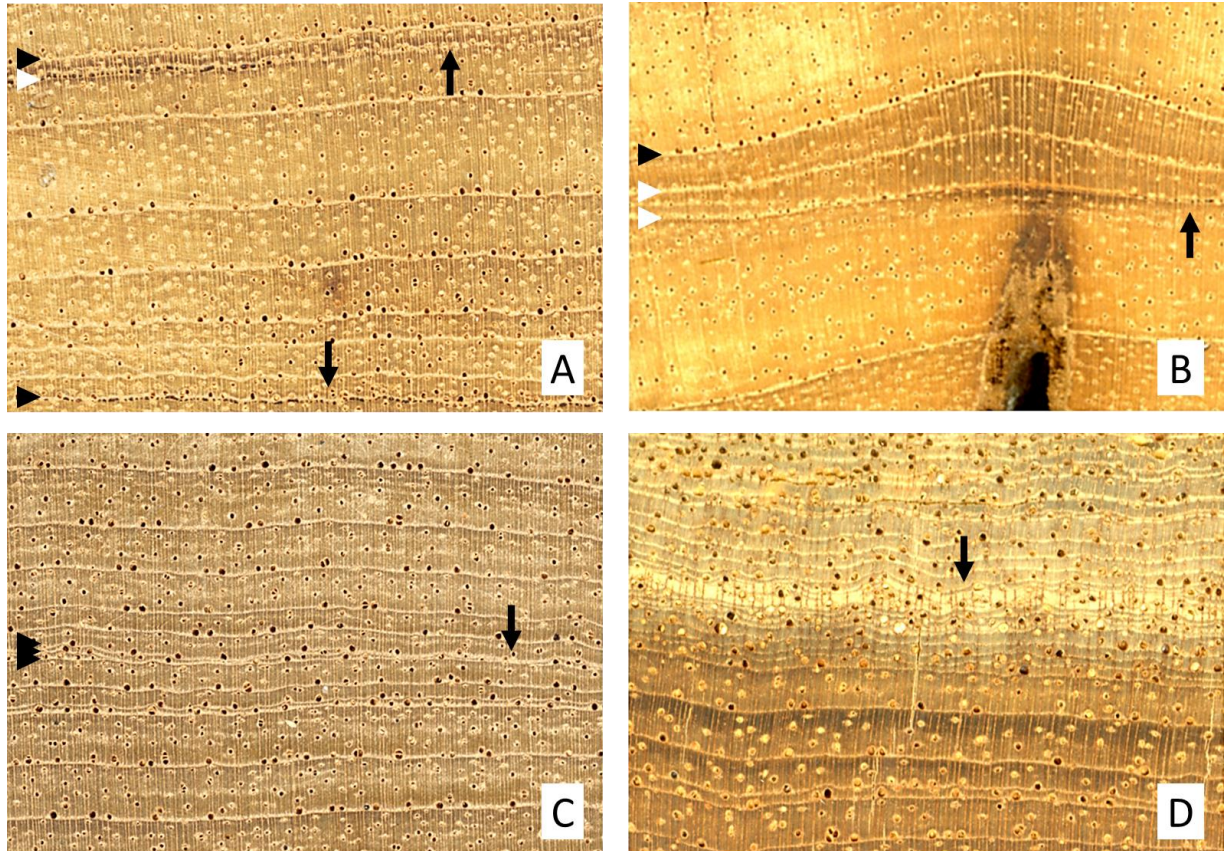
O potencial dendrocronológico dos anéis de crescimento de *Cedrela* foi descrito por diversos autores (Barbosa et al., 2018; Brienen & Zuidema, 2005; Dunisch et al., 2002, 2003; Lisi et al., 2020; Lotfiomran & Köhl, 2017; Marcati et al., 2006; Roig et al., 2005; Tomazello Filho et al., 2000). Pode-se observar anéis de crescimento bem visíveis e demarcados pelo parênquima marginal terminal (ex. *C. odorata*, Fernandes et al., 2018, *C. nebulosa*, Layme-Huaman et al, 2018), inicial (ex. *C. angustifolia*, Tomazello Fo et al 2001, *C. montana*, Bräuning et al. 2009, *C. fissilis*, Marcati et al. 2006 ) ou terminal e inicial (*C. fissilis*, Marcati et al. 2006). O parênquima marginal é comumente acompanhado por vasos semi-porosos (e.g. *C. fissilis*, Marcati et al. 2006, *C. odorata*, Dünisch et al. 2002, *C. savadoresnsi*, *C. tonduzii*, Moya et al, 2013), porosos (e.g. *C. montana*, Bräuning et al. 2009) e, em alguns casos também por vasos difusos (*C. odorata* e *C. fissilis*, Moya et al. 2013).

Associados ao parênquima marginal também se registram a formação de dutos de goma-resina em disposição tangencial, paralela ao parênquima marginal, o quais se confundem com os anéis de crescimento (Dünisch

et al., 2002, 2003, Figura 1A). Esses dutos, bastante observados no xilema das árvores da família Meliaceae (e.g. *Switenia macrophylla*, Dünish et al. 2003), são formados pela deposição de terpeno, durante o processo de cicatrização de eventos traumáticos, que podem formar anéis de crescimento falsos (Dünish et al. 2001). Estes podem aparecer por qualquer evento traumático nas árvores, como danos no tronco, incêndios florestais, anomalias climáticas, estresse hídrico, ataques de insetos, etc. (Roig 2000, Tomazello Filho 2001, 2004). Em alguns anéis de crescimento de rápido incremento radial pode-se identificar a formação de faixas parenquimáticas, associadas a grande concentração de vasos semiporosos (Détienne, 1989, Figura 1B).

Para fins dendrocronológicos, os anéis de crescimento falsos são um problema na datação, pois a camada de crescimento não corresponde ao final da estação seca, causando erros na datação para estudos climáticos e ecológicos que exigem alta precisão cronológica (Rozendaal & Zuidema, 2011; Worbes, 1999). A *Cedrela* também registra anéis ausentes e confluentes (Brienen & Zuidema, 2005), caracterizados por um conjunto de linhas de parênquima, sem a associação com vasos, o que torna difícil somente a utilização do incremento radial para sua separação (Lisi et al. 2020, Pereira et al. 2019, Figura 1CD). Alguns estudos trazem parâmetros que podem auxiliar na identificação desses anéis, para a sua exclusão ou inclusão. Em caso de anéis de crescimento falsos, anatomicamente pode-se visualizar o espessamento das camadas do parênquima marginal ao longo do tronco e a continuidade do parênquima, uma vez que os anéis falsos tendem a ser mais finos e descontínuos (Détienne, 1989; Lisi et al., 2020; Worbes, 2002). Análise de discos do lenho inteiros é bastante recomendado para a espécie (Brienen & Zuidema, 2005) e o aumento no número amostral também pode ser uma saída para sanar erros de datação, conforme mostrados por Dünisch (2003) e Granato-souza et al. (2018), os quais usaram números expressivos de mais de 50 discos do lenho para a codatação. Porém a coleta de discos do lenho depende dos recursos financeiros para coleta, quantidade de árvores de *Cedrela* no sítio amostral e liberação do seu corte, o que faz da parcerias com empresas de manejo florestal uma alternativa para trabalhar com discos do lenho (Andrade et al., 2019; Brienen & Zuidema, 2005; Granato-Souza et al., 2020; Worbes & Schöngart, 2019).

Outras técnicas foram testadas para auxiliar na datação dos anéis de crescimento como radiocarbono (Baker et al 2017) e isótopos estáveis de oxigênio (Brienen et al, 2012; Baker et al., 2015). São técnicas de alta resolução cronológica para identificação de erros na datação e registro da sensibilidade dos anéis de crescimento às variações hidroclimáticas, que trazem bons resultados (Baker et al., 2015, 2016; Cintra et al., 2019; Pagotto et al., 2021), porém demandam maior custo de investimento. A densitometria de raios X, a partir da variação da intranual de densidade (Tomazello Filho et al, 2008) ainda foi pouco explorada, mas traz uma perspectiva da variação dos limites dos anéis de crescimento, caracterizados pelo decréscimo abrupto da densidade da madeira no parênquima marginal e vasos semiporosos e um acréscimo da densidade no lenho tardio (Albuquerque et al. 2016). Alguns estudos também vêm explorando a densidade intra-anual como base para cálculos de incremento em biomassa do lenho e estoque de carbono (Khöl et al. 2015, Hornink et al. 2020). A autofluorescência é a técnica mais recente testada por Godoy-Veiga et al. (2019), a qual indicou o uso do filtro GFP (Green Fluorescent Protein - excitation 470/40 nm, emission) e RFP (Red Fluorescent Protein – excitation 546/10 nm, emission 605/70 nm) de apoio para identificação de anéis de crescimento falsos em amostras do lenho de 5 mm de diâmetro, principalmente em períodos de crescimento suprimido.



**Figure 1.** Anatomia macroscópica dos anéis de crescimento de *Cedrela odorata*, do norte da Amazônia brasileira. A) Canais traumáticos associados ao parênquima marginal. B) Bandas de parênquima marginal, com anéis de crescimento semiporosos, causadas por evento traumático. C e D) Múltiplos micro anéis de crescimento. Anéis de crescimento verdadeiros (triângulo preto) e anéis de crescimento falso (triângulo branco).

#### ***Fenologia e anualidade dos anéis de crescimento***

A formação anual dos anéis de crescimento, correspondentes às variações climáticas, é a base para os estudos dendrocronológicos (Schweingruber, 1993). Em regiões neotropicais, diversas espécies arbóreas apresentam ciclos de crescimento diferenciados, favorecendo a formação de anéis de crescimento anatomicamente distinguíveis e correspondentes às variações do clima (Worbes 2004; Zuidema et al. 2012, Brienen et al. 2016). A visualização dos anéis de crescimento é mais favorável em espécies decíduas (Brienen et al. 2016) ou em espécies de florestas de planícies de inundação (Schongart et al. 2007), uma vez que essas condições favorecem o período de dormência cambial e, conseqüentemente, a formação dos anéis de crescimento (Brienen et al. 2016). As árvores de *Cedrela* têm o ciclo fenológico comumente caracterizado como semidecíduo (Marscarti et al. 2006) ou decíduo (Mendiveleosa et al. 2016, Andreacci et al. 2017), perdendo suas folhas de forma parcial ou total no período seco. Essas características tendem a variar conforme as condições de cada árvore, mesmo dentro da mesma floresta (Marscarti et al. 2006) e correspondem às variações climáticas de um ano (Callado et al. 2013).

São poucos os estudos que abrangem a atividade cambial das espécies de *Cedrela*. Callado et al. (2013) trazem uma revisão dos estudos desenvolvidos para a *C. fissilis*, *C. odorata* e *C. montana*, na floresta amazônica, na floresta sazonal brasileira e em floresta tropical de montanha, respectivamente. Posteriormente, outros estudos sobre o incremento radial da *C. fissilis* e *C. odorata* foram realizados em florestas ombrófila (densa e mista) (Costa et al. 2013,



Andreacci et al. 2017). A atividade cambial da *Cedrela* pode estar associada ao período de precipitação (Mendivelso et al., 2016), fotoperíodo e temperatura (Andreacci et al., 2017) e expansão das fases fenológicas (Callado et al., 2013). Em casos de relação com a precipitação, observou-se uma relação direta entre a expansão foliar, incremento radial e menor densidade de alburno (Mendivelso et al., 2016). Em contraponto, a dormência cambial associa-se ao período seco e perda das folhas (Tomazello-Filho et al., 2013). As alterações anatômicas, da mesma forma, estão ligadas a essas variáveis, podendo reduzir a área de vasos (*C. fissilis*, Marcarti et al. 2006, Andreacci et al. 2017) e incrementar a espessura da parede celular (*C. odorata*, Dünish et al 2002) um pouco antes e durante seu período de dormência até a formação da banda de parênquima axial marginal terminal e/ou inicial.

Segundo Callado et al (2014), estudos que trazem a caracterização da natureza do parênquima marginal com maior precisão para determinar o limite do anel de crescimento, aumentam a confiança das correlações com fatores de crescimento indutivos ou inibidores. Além dos estudos fenológicos, técnicas avançadas de radiocarbono também vêm contribuindo para confirmação dos anéis de crescimento anuais desse gênero (Santos et al., 2021; Baker et al., 2016, 2015; Hammerschlag et al., 2019; Santos et al., 2020). Conforme avaliado por Baker et al. (2017), em diferentes populações de *Cedrela* ao longo do neotrópico, confirmou-se que árvores de *Cedrela* da Bolívia, Equador, Brasil e Venezuela produzem anel de crescimento anuais, associados a fase de crescimento ao período de maior umidade regional (Baker et al., 2016, 2015). Resposta diferente ao observado em árvores de *Cedrela* no Suriname, que apresentam a formação de dois anéis de crescimento anuais em resposta a um padrão bimodal na precipitação, reforçando a resposta dessa espécie às variações climáticas (Baker et al., 2017).

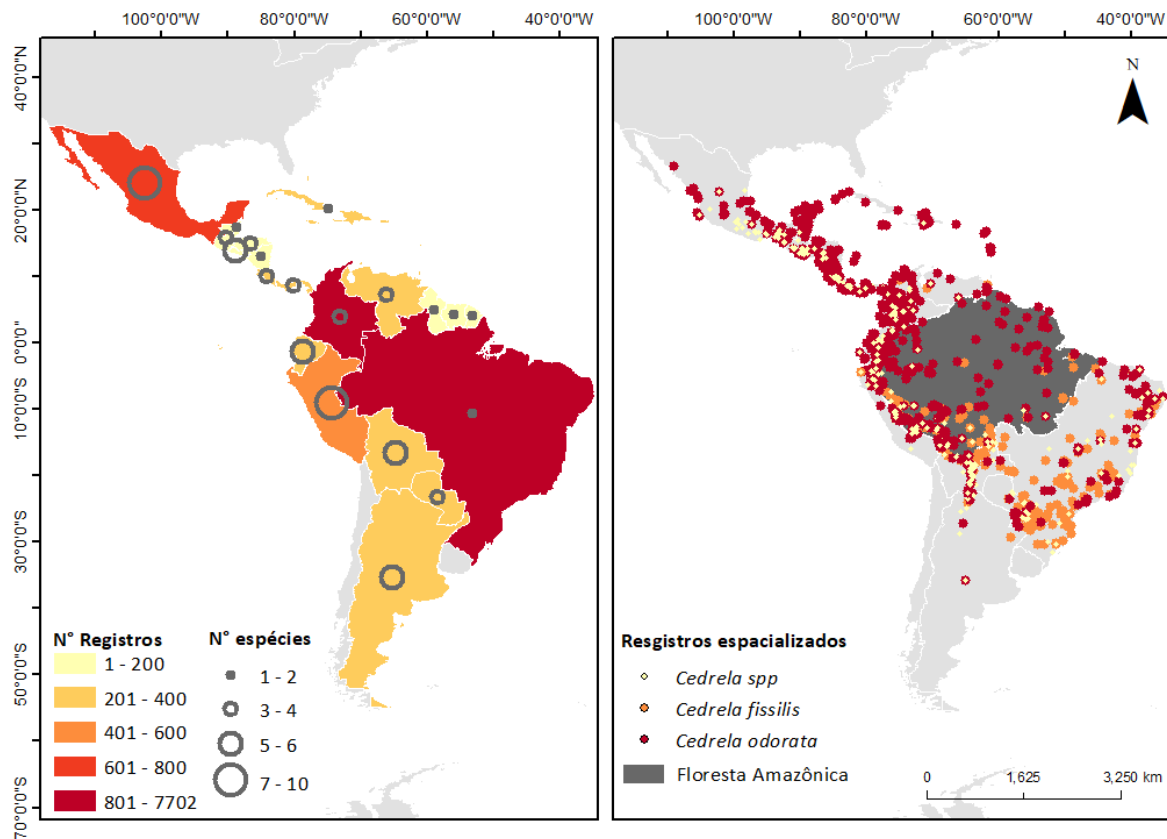
### **Amplitude geográfica em diferentes ecorregiões**

O gênero *Cedrela* está entre as principais espécies de ampla distribuição no neotrópico, encontrado na Argentina, Brasil, Bolívia, Colômbia, Equador, Costa Rica, El Salvador, Guiana Francesa, Guatemala, Guiana, Honduras, México, Nicarágua, Panamá, Paraguai, Peru, Suriname, Uruguai, Venezuela, Belize e ilhas caribenhas (Muellner et al., 2009; Pennington et al., 2010). Trabalhos de modelagem de nicho ecológico pelo sistema de informação geográfica (SIG) têm contribuído para compreender a distribuição das espécies desse gênero, para estudos que buscam conservação e restauração, delimitação de áreas com maior probabilidade e potencial de ocorrência ou instalação de plantações (Cotrina Sánchez et al., 2021; Estrada-Contreras et al., 2016; Ramos et al., 2018). Conforme a base de dados geoespacializada do Global Biodiversity Information Facility (GBIF), há mais de 1.750 registros de espécies do gênero com coordenadas geográficas confiáveis e disponíveis, para análise e estudo. Desse total, cerca de 88% das espécies registradas encontram-se em florestas tropicais e subtropicais (16 espécies), 8% em áreas predominantemente de pastagem (8 espécies) e aproximadamente 3% em regiões áridas e semi-áridas (4 espécies).

Segundo o Botanic Gardens Conservation International, dentre o total de espécies do gênero *Cedrela*, 3 são encontradas unicamente no México (*Cedrela discolor*, *Cedrela dugesii*, *Cedrela oaxacensis*), 5, no Peru (*Cedrela kuelapensis*, *Cedrela longipetiolulata*, *Cedrela molinensis*, *Cedrela nebulosa*, *Cedrela weberbaueri*) e 1, em El Salvador (*Cedrela monroensis*) (Figura 02). O Peru também destaca-se por abranger dez espécies nativas (*C. angustifolia*, *C. fissilis*, *C. kuelapensis*, *C. longipetiolulata*, *C. molinensis*, *C. montana*, *C. nebulosa*, *C. odorata*, *C. saltensis*, *C. weberbaueri*) (Cotrina Sánchez et al., 2021). Entre as espécies de maior distribuição, destaca-se a

*Cedrela odorata* registrada em 31 países neotropicais, seguida da *C. fissilis*, encontrada em 10. Ambas são identificadas em tipologias vegetais bastante distintas, podendo ocorrer em florestas úmidas ou secas, com solos bem drenados (Pennington et al., 2010). Somente no Brasil, essas espécies são encontradas na Caatinga (stricto sensu), Cerrado (lato sensu), Floresta Ciliar ou Galeria, Floresta de Terra Firme, Floresta de Várzea, Floresta Estacional Decidual, Floresta Estacional Perenifólia, Floresta Estacional Semidecidual, Floresta Ombrófila (Floresta Pluvial) (Flores, 2021). No entanto, devido ao grande porte das árvores e qualidade da madeira, essas espécies foram amplamente exploradas, resultando na estimativa de decréscimo populacional de 30% nos últimos 100 anos, descaracterizando o seu habitat natural (CNCFlora 2012). Em reconhecimento ao declínio populacional, as duas espécies são classificadas como vulneráveis (CITIES).

Estudos da anatomia ecológica do lenho, em espécies com ampla distribuição geográfica, têm demonstrado que a variação dos fatores climáticos atua diretamente na estrutura anatômica do lenho (Pandey, 2021). Em regiões de efeito de borda, causado pela fragmentação dos habitats naturais, a *Cedrela odorata* já mostrou apresentar uma alteração em mais de 11 elementos anatômicos, pela baixa umidade relativa do ar (Luchi, 2011). Nesse sentido, a ampla distribuição geográfica associada à sensibilidade climática da *Cedrela*, potencializam a aplicação do gênero para compreender o comportamento ecológico anatômico do lenho (Luchi, 2011) e o crescimento das espécies em diferentes ambientes (Bare & Ashton, 2016; da Cunha et al., 2013, 2016; Grau, 2000; Lotfiomran & Köhl, 2017; Stepka et al., 2021; Venegas-González et al., 2018). Além disso, dados do crescimento dessas espécies de *Cedrela* em diferentes regiões tornam-se bases de dados interessantes para ajustes de modelo generalista de crescimento em biomassa do lenho, acúmulo de carbono (Khöl et al. 2017) e reconstruções e previsões climáticas, de grande escala regional (Granato-Souza et al., 2020; Humanes-Fuente et al., 2020; Stahle et al., 2020).



**Figure 2.** Mapa do número de espécies e de árvores do gênero *Cedrela* registrado por país neotropical (esquerda). Distribuição geoespacial de registros de *Cedrela* ao longo do neotrópico, considerando nativas e não nativas (direita). Dados obtidos no Botanic Gardens Conservation International e Global Biodiversity Information Facility (Data coleta dos dados: Agosto/2022)

### *Raízes superficiais e sinal isotópico de oxigênio*

A aplicação de isótopos estáveis na dendrocronologia é crescente e seu uso em espécies tropicais também (Boninsegna et al. 2009). Nos últimos 20 anos, ao menos dez artigos abordando isótopos estáveis em anéis de crescimento de *Cedrela* foram publicados, destacando Brienen, R.J.W. e colaboradores como principais contribuintes (Brienen, et al. 2017, Brienen et al. 2012, Baker et al. 2015). Dentre esses, a *Cedrela odorata* é a espécie mais utilizada para estudos de eventos e reconstrução hidroclimática (Pagotto et al. 2021, Volland et al. 2016; Cintra et al., 2019, 2021) e compreensão dos aspectos ecofisiológicos (Hietz et al. 2005, Brienen et al 2017), principalmente as análises que envolvem isótopos estáveis de oxigênio nos anéis de crescimento ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$ ).

A preferência dessa espécie nos estudos de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  justifica-se pelas características do sistema radicular da *C. odorata*, a qual apresenta grande parte de suas raízes na parte superficial do solo, principalmente durante os primeiros anos de seu crescimento (Cintron 1990, Kunert et al. 2010). Na região da Amazônia, estudos recentes indicam que as estratégias de captação de água estão relacionadas à profundidade do enraizamento, tolerância ao potencial hídrico e a condições de luz (Brum et al., 2019). Além disso, a avaliação de 49 espécies tropicais indicou que grande parte da água evapotranspirada provém da água superficial do solo, sugerindo-se que essas espécies têm a maior parte da biomassa das raízes nas camadas superiores do solo para otimizar sua aquisição de nutrientes e água (Brum et al., 2017; Sohel et al., 2021). A água superficial não é fracionada durante a absorção

pela planta o que sugere que o sinal de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  provém predominantemente de precipitação recente, registrando com precisão as variações hidroclimáticas regionais através do fenômeno conhecido por “*amount effect*”, o qual representa o  $\delta^{18}\text{O}$  da precipitação em função da temperatura de condensação e/ou pela taxa de precipitação da chuva (Dansgaard 1964; Rozanski et al. 1993, Cintra et al. 2019). Em espécies longevas, de ampla distribuição espacial e temporal, como a *Cedrela*, essa informação abre a perspectiva de reconstrução climática de grande parte da região neotropical (Baker et al., 2016, 2015; Volland et al., 2016; Brienen et al., 2012; Pagotto et al., 2021), podendo ser uma alternativa às espécies que apresentaram baixa sensibilidade às variações climáticas.

### 2.3. Material e métodos

#### ***Revisão sistemática da literatura***

O levantamento bibliográfico foi realizado em bancos de dados eletrônicos: *Scopus*, *SciELO* e *Web of Science*, utilizando-se as palavras chaves: “*Cedrela*”, “*Amazon\* forest*”, “*tropical*”, “*Dendro\**”, “*Tree ring*”, “*Growth ring*” e “*cambial growth*” combinados em diferentes operadores *Booleans*. Foram selecionados somente artigos científicos i) publicados entre o ano de 2000 e 2021, ii) revisados por parceiros, e iii) que apresentam cronologias construídas a partir de parâmetros dos anéis de crescimento. Considerou-se artigos que utilizaram os anéis de crescimento para obtenção da cronologia, que apresentassem ao menos um parâmetro estatísticos do *cross-dating*, a exemplo da Intercorrelação (*r*), sensibilidade média (MS), *expressed population signal* (EPS), *subsample signal strength* (SSS) e intercorrelação média entre séries (RBAR) (Cook & Pederson, 2011; Wigley et al., 1984). Excluiu-se da sistematização outros formatos de divulgação científica, como casos de estudo, notas técnicas, materiais educativos, entre outros, por não serem revisados por parceiros.

#### ***Bases de dados (espécies e distribuição geográfica)***

Foi utilizada a base de dados do website *The Plant Science*, para aferição dos nomes científicos aceitos, para cada espécie do gênero (ThePlantList, 2013). A distribuição e número de espécies nativas registradas por países foram obtidas na base de dados do Botanic Gardens Conservation International, por trazer confiabilidade em relação ao número de espécies registradas em herbários. As coordenadas geográficas e a distribuição espacial de cada espécie no neotrópico foram obtidas na base de dados do *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF, 2021), utilizando-se os filtros “*Cedrela P. Browne*”, “*Preserved Specimen*”, “*Including coordinates*”, “*North and South America*”. Excluiu-se da base as árvores registradas com problemas geoespaciais contaminantes da base (ex. coordenadas zero, coordenadas incompatíveis com o país de origem, coordenadas inválidas e coordenadas fora da amplitude espacial). Não foi utilizado o filtro de origem da espécie, pois essa informação constava para menos de 20 registros na base. Assim, foram consideradas espécies nativas e introduzidas. O processamento dos dados foi organizado e mapeado no software ArcGIS.

### 2.4. Resultados

O levantamento bibliográfico registrou 32 resultados relacionados às palavras chaves selecionadas, dessas foram selecionados os artigos que atendiam os critérios desta revisão sistemática. Devido à pouca

quantidade de cronologias desenvolvidas dentro das ecorregiões amazônicas, também foram consideradas as cronologias que constavam em áreas de transição com o bioma amazônico. Dessa forma, foram trabalhados 14 artigos, que registram 17 cronologias desenvolvidas, a partir de parâmetros de anéis de crescimento validados por técnicas dendrocronológicas (Tabela 01). As cronologias foram construídas para cinco espécies de *Cedrela*, em quatro países neotropicais, alcançando latitudes de 0,98°S – 18,47S, longitudes de 53,27W – 79,04W e altitudes de 80 a 2.150 metros em relação ao mar (Figura 03). A *C. odorata* é a espécie com maior número de cronologias construídas (9), em três países e amplitude de elevação bastante variada, dentre os artigos revisados. Em contrapartida, somente uma cronologia de *C. angustifolia* e *C. nebulosa* foram registradas, sendo estas na Bolívia e Peru, respectivamente. A Bolívia é o país com maior número de registros de cronologias (6), construídas com três espécies de *Cedrela*, enquanto que o Equador registra somente duas cronologias, provenientes da mesma população de *Cedrela*.

O principal parâmetro utilizado para a construção das séries cronológicas foi a largura dos anéis de crescimento. Somente três cronologias foram construídas a partir do sinal de  $\delta^{18}\text{O}$  registrados no lenho anual. As cronologias de largura foram utilizadas para a avaliação ecológica do crescimento radial do lenho (Dünisch, 2005; Dünisch et al., 2003; Espinoza et al., 2014; Layme-Huaman et al., 2018; Paredes-Villanueva et al., 2016), reconstruções climáticas (Granato-Souza et al., 2019, 2020) e manejo florestal (Inga & del Valle, 2017). As cronologias de isótopos ID 5 e 7 foram desenvolvidas a partir da cronologia 3, e a ID 11, a partir da 4 (Tabela 1). Essas cronologias foram desenvolvidas para a compreensão do sinal isotópico de oxigênio ao longo da bacia amazônica (Baker et al., 2015; Brienen et al., 2012) e a relação com as variáveis climáticas (Volland et al., 2016).

**Tabela 1.** Cronologias de *Cedrela* publicadas entre 2000 e 2021. ID: Identificação da série cronológica. Parâmetro: RW = Largura do anel de crescimento e IO = Isótopos estáveis de oxigênio do anel de crescimento. MA (método de amostragem): ND = não destrutivo, D = destrutivo.

| ID | Espécie                | Parâmetro | País    | Lat.   | Long.  | Alt. (m.a.s.l) | Autor                          |
|----|------------------------|-----------|---------|--------|--------|----------------|--------------------------------|
| 1  | <i>C. odorata</i>      | RW        | Brasil  | -10.15 | -59.43 | 190            | Dunisch et al 2003             |
| 2  | <i>C. fissilis</i>     | RW        | Brasil  | -10.15 | -59.43 | 190            | Dunisch 2005                   |
| 3  | <i>C. odorata</i>      | RW        | Bolívia | -11.4  | -68.72 | 170            | Brienen et al. 2005            |
| 4  | <i>C. montana</i>      | RW        | Equador | -3.58  | -79.04 | 2000           | Bräuning et al. 2009           |
| 5  | <i>C. odorata</i>      | IO        | Bolívia | -11.4  | -68.72 | 170            | Brienen et al. 2012            |
| 6  | <i>C. odorata</i>      | RW        | Peru    | -11.76 | -74.24 | 1250           | Espinoza et al 2013            |
| 7  | <i>C. odorata</i>      | IO        | Bolívia | -10.08 | -66.3  | 170            | Baker et al. 2015              |
| 8  | <i>C. angustifolia</i> | RW        | Bolívia | -18.47 | -65    | 2030           | Paredes-Villanueva et al. 2016 |
| 9  | <i>C. fissilis</i>     | RW        | Bolívia | -15.72 | -64    | 247            | Paredes-Villanueva et al. 2016 |
| 10 | <i>C. fissilis</i>     | RW        | Bolívia | -17.33 | -62.17 | 497            | Paredes-Villanueva et al. 2016 |
| 11 | <i>C. montana</i>      | IO        | Equador | -3.58  | -79.04 | 2000           | Volland et al. 2016            |
| 12 | <i>C. odorata</i>      | RW        | Peru    | -10.77 | -74.27 | 1248           | Inga & del Valle 2017          |
| 13 | <i>C. nebulosa</i>     | RW        | Peru    | -11.31 | -75.33 | 2150           | Layme-Huaman et al. 2018       |
| 14 | <i>C. odorata</i>      | RW        | Brasil  | -0.98  | -53.33 | 80             | Granato-Souza et al. 2019      |
| 15 | <i>C. odorata</i>      | RW        | Brasil  | -0.98  | -53.33 | 80             | Granato-Souza et al. 2019      |
| 16 | <i>C. odorata</i>      | RW        | Brasil  | -1     | -53.27 | 80             | Granato-Souza et al. 2020      |
| 17 | <i>C. fissilis</i>     | RW        | Brasil  | -9     | -62.73 | 200            | Santos et al. 2021             |

Dentre os métodos de amostragem (Tabela 2), 70,59% (12) das cronologias foram construídas com amostras obtidas pelo método destrutivo, em área de manejo florestal, sendo que, em três desses casos, o método não destrutivo foi utilizado para complementar o número amostral. As cronologias que utilizaram somente o método não destrutivo (29,41%, 5) foram coletadas em áreas de proteção ambiental, onde não é possível o corte de árvores. Observa-se que a altura da coleta da amostra do lenho variou conforme o estudo, podendo ser obtida próxima da base (Dunisch et al 2003, Brienen et al. 2005, 2012), no diâmetro a altura do peito (DAP) ou no topo da primeira tora extraída para manejo, à 6 metros (Santos et al. 2021).

Avaliando as cronologias de largura, o número amostral para a construção das cronologias mostrou elevada amplitude, sendo o mínimo 11 árvores e máximo de 87 (Tabela 02). O aproveitamento médio do n amostral é acima de 70%, descartando-se amostras do lenho em caso de dificuldade na datação (Espinoza et al., 2014) ou para melhorar o sinal climático (Granato-Souza, et al., 2019). As cronologias foram construídas com no mínimo de 9 árvores e máximo de 63 árvores, avaliando-se de 2 a 4 raios do lenho, por árvores coletadas, somando-se um mínimo de 16 raios e máximo de 89. A cronologias construídas a partir do sinal de  $\delta^{18}\text{O}$  apresentaram um número amostral menor, analisando-se somente um raio do lenho entre 9 a 15 árvores, com 100% de aproveitamento. O comprimento das cronologias atingiu no mínimo de 50 anos e máximo de 258 anos, em média de 139 anos ( $\pm 66,05$  anos). As cronologias mais antigas, acima de 200 anos, encontram-se no Brasil e Peru, utilizando a largura dos anéis dos crescimento de *C. odorata*. As mais curtas, menores de 100 anos, encontram-se na Bolívia, construídas com a largura dos anéis de crescimento *C. fissilis*, *C. odorata* e *C. angustifolia*.

A validação da datação dessas cronologias fundamentou-se nas estatísticas dendrocronológicas, como a intercorrelação ( $r$ ), sensibilidade média (MS), *expressed population signal* (EPS), RBAR (Speer, 2009) e, em alguns casos, na datação por radiocarbono (Baker et al., 2015; Inga & del Valle, 2017). Entre essas, 52,94% dos artigos apresentaram o EPS, 70%, o RBAR, 41,17%, a MS e 35,29 %, a intercorrelação. Entre as cronologias de largura, a intercorrelação e a sensibilidade média variou de 0.41 a 0.57 (0.47 média) e de 0.27 a 0.57 (0,44 média), respectivamente. Todos os artigos que apresentaram o EPS, utilizaram o corte de 0.85 (Wigley et al., 1984), para indicar períodos robustos para a reconstrução climática. O EPS mínimo registrado foi 0.79 e o RBAR entre 0,22 a 0,43 (0,30 média). As cronologias de isótopos estáveis, apresentaram somente a intercorrelação, EPS e RBAR, sendo esses de 0.63 a 0.71, >0.85 e 0.18, respectivamente. Nenhuma publicação apresentou a estatística *subsample signal strength* (SSS) (Tabela 02).

As cronologias de largura dos anéis de crescimento foram padronizadas, para a remoção de tendências biológicas de crescimento, redução do efeito endógeno da planta e aumentar o sinal comum presente no anel de crescimento das séries. O *detrending* foi realizado, em sua maioria (67%), utilizando-se o modelo de spline cúbico de comprimento variado, com 50% de retenção da variância da largura dos anéis de crescimento. Alguns artigos mencionam métodos complementares para a construção das cronologias, como a aplicação de modelos autorregressivos (Granato-Souza et al., 2020; Granato-Souza, Stahle, et al., 2019; Paredes-Villanueva et al., 2016b), *Bi-weighted robust mean*, como valores esperados da função (Paredes-Villanueva et al., 2016b) e *power transformation*, para reduzir o efeito de outliers (Bräuning et al., 2009).

**Tabela 2.** Dados estatísticos das cronologias de *Cedrela sp* construídas na Amazônia e áreas de transição. M.A.: Método de coleta, A.C.: Altura de coleta, N.A.: Número de amostras coletadas, N°Arv (raios): Número de árvores e raios incluídos na cronologia, (Período (anos): Comprimento e período cronológico, r: intercorrelação média, MS: sensibilidade média, *Detrend*: CS = spline cúbica, RLL = regressão linear logarítmica, EN = exponencial negativa. (\*) valores indicados para 1938 a 2011.

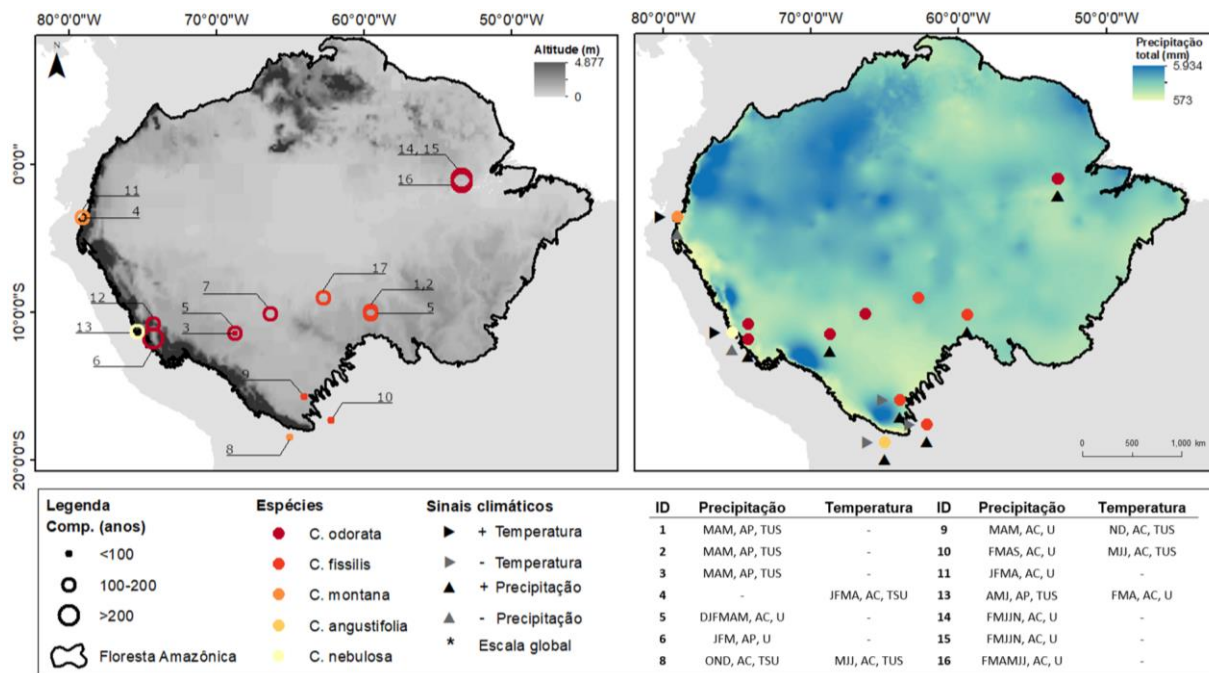
| ID                   | M.A    | A.C.      | N.A.         | Nº Arv (raios).     | Período (anos)  | r           | MS          | RBAR   | EPS   | <i>Detrend</i>   |
|----------------------|--------|-----------|--------------|---------------------|-----------------|-------------|-------------|--------|-------|------------------|
| 1                    | D      | Base      | 64           | 51 ()               | 2000-1890 (111) | -           | -           | 0.24   | -     | RLL              |
| 2                    | D      | 1.3 m     | 87           | 63 ()               | 2000-1890 (111) | 0.43        | -           | -      | -     | RLL              |
| 3                    | D      | 0.5-2.5 m | 33           | 24 (62)             | 2000-1950 (51)  | 0.57        | -           | -      | -     | CS 50% -5 anos   |
| 4                    | ND     | 1.3 m     | 37           | 37 (89)             | 2007-1908 (100) | -           | 0.3         | 0.3    | >0.85 | CS 50% (67%)     |
| 5                    | D      | 0.3-2.5 m |              | 8 (8)               | 2001-1900 (102) | 0.63        | -           | -      | 0.97  | -                |
| 6                    | D e ND | 1.3 - 3 m | 54           | 27 (47)             | 2009-1795 (215) | -           | 0.27        | 0.26   | 0.87  | EN               |
| 7                    | D      | 0.5-2.5 m |              | 9 (9)               | 2010-1901 (110) | 0.71        | -           | -      | 0.96  | -                |
| 8                    | ND     | 1.3 m     | 30           | 30 (57)             | 2011-1936 (76)  | -           | 0.52        | 0.37   | -     | CS 50% - 31 anos |
| 9                    | ND     | 1.3 m     | 11           | 11 (20)             | 2011-1928 (84)  | -           | 0.57        | 0.28   | -     | CS 50% - 51 anos |
| 10                   | ND     | 1.3 m     | 12           | 12 (20)             | 2012-1925 (88)  | -           | 0.56        | 0.26   | -     | CS 50% - 45 anos |
| 11                   | ND     | 1.3 m     |              | 15 (25)             | 2011-1885 (127) | -           | -           | >0.18* | >0.85 | -                |
| 12                   | D e ND | 1.3 m     | 13           | 9 (16)              | 2012-1890 (123) | 0.419       | 0.524       | 0.22   | 0.79  | CS 50% - 32 anos |
| 13                   | D e ND | -         | 13           | 13 (23)             | 2015-1883 (133) | 0.47        | 0.36        | 0.43   | 0.91  | CS 50% -128 anos |
| 14                   | D      | 6 m       | 47           | 27 (56)             | 2016-1786 (231) | -           | -           | 0.246  | >0.85 | CS 50%           |
| 15                   | D      | 6 m       | 47           | 10 (27)             | 2016-1786 (231) | -           | -           | 0.319  | >0.85 | CS 50%           |
| 16                   | D      | 6 m       | 60           | 22 (50)             | 2016-1759 (258) | -           | -           | >0.27  | >0.85 | CS 50%-100 anos  |
| 17                   | D      | 6 m       | 29           | 22 (72)             | 2018-1832 (187) | 0.51        | -           | 0.38   | 0.94  | -                |
| <b>Média</b>         |        |           | <b>38.36</b> | <b>22.94(38.73)</b> | <b>(137.52)</b> | <b>0.53</b> | <b>0.44</b> |        |       |                  |
| <b>Desvio Padrão</b> |        |           | <b>22.88</b> | <b>15.57(24.81)</b> | <b>(62.35)</b>  | <b>0.11</b> | <b>0.13</b> |        |       |                  |

Dentre as cronologias, 14 de 17 foram testadas com variáveis climáticas (Figura 03), dando destaque para as variações de precipitação e temperatura, em sua maioria, e outras como número de dias úmidos, cobertura de nuvens e vazão do rio (Volland et al. 2016, Brienen et al. 2012). Seis artigos relacionaram a cronologia com variáveis globais, como índices de El Niño Oscilação Sul, Temperatura superficial do oceano (SST), índice de El Niño oceânico (ONI) e o índice multivariado de ENOS (MEI) (Brienen, Helle, et al., 2012; O. Dünisch, 2005; Volland et al., 2016, Layme-Huaman et al, 2018, Granato-Souza et al 2019,2020). Foram registradas relações positivas com a precipitação durante o período úmido ou transição entre o período úmido-seco ou seco-úmido, para as dez cronologias dos anéis de crescimento de *C. angustifolia*, *C. odorata* e *C. fissilis*, na Bolívia, Brasil e Peru. Relações negativas para o período úmido foram observadas para a cronologia de *C. nebulosa*, em região de elevada altitude no Peru (Figura 03). As cronologias de isótopos estáveis de oxigênio, relacionadas com variáveis climáticas apresentaram correlações negativas com a precipitação e relações positivas com a temperatura e eventos



macroclimáticos que interferem na temperatura. Essas também indicaram boas correlações com outras cronologias de isótopos estáveis de anéis de crescimento de outras espécies, precipitação e gelo.

**Figure 3.** Mapa das cronologias de *Cedrela*, construídas na Amazônia e regiões de transição, utilizando largura dos anéis de crescimento e isótopos estáveis de oxigênio. Os números indicam o ID de cada cronologia (esquerda) e o tamanho dos círculos, o comprimento de cada série. Mapa da influências de variáveis climáticas observadas em cada cronologia, plotados no mapa de precipitação anual (direita).



## 2.5. Discussão

### *Espécies, distribuição e temporalidade*

Foram revisadas todas as cronologias de *Cedrela* construídas dentro dos limites e área de transição da floresta tropical amazônica. Apesar das doze espécies registradas dentro desse domínio e nas proximidades (*C. balansae*, *C. domatifolia*, *C. fissilis*, *C. kuelapensis*, *C. lilloi*, *C. montana*, *C. nebulosa*, *C. odorata*, *C. saltensis*, *C. salvadorensis* e *C. weberbaueri*, *C. angustifolia*), somente cinco foram utilizadas para a dendrocronologia. O potencial dendrocronológico dos anéis de crescimento das espécies avaliadas é abordado ou mencionado dentro dos artigos analisados (Bräuning et al., 2009; Brienen & Zuidema, 2005; Oliver Dünisch et al., 2003; Layme-Huaman et al., 2018). Em contraposição, entre as sete espécies não utilizadas, somente, a *Cedrela kuelapensis* e *Cedrela salvadorensis*, apresentam estudos referentes a anatomia do lenho e descrição dos anéis de crescimento (Marcelo-Peña et al., 2020; Moya et al., 2013), porém carecem de informação sobre fatores que influenciam na formação do anel de crescimento, que auxiliam na confiabilidade das correlações com fatores de crescimento indutivos ou inibidores (Callado et al. 2014). As outras espécies mencionadas ainda necessitam de estudos sobre a anatomia e comprovação da anuidade do anel de crescimento. Espécies de *Cedrela* em regiões de regime climático bimodal já indicaram a formação de dois anéis de crescimento (Baker et al., 2017), durante um período de crescimento anual. Além disso, os presentes artigos estudados já indicam a precipitação como um dos fatores

principais indutivos ou inibidores do crescimento radial (Figura 3). Isso reforça a necessidade de estudos sobre a formação e comportamento ecológico do crescimento para a espécie (Baker et al., 2016; Marcelo-Peña et al., 2020).

Dentre as espécies analisadas, a *C. odorata* teve maior destaque, por apresentar ampla distribuição geográfica em diferentes habitats do neotrópico (Cavers et al., 2003). Na região amazônica, essa espécie encontra-se em todos os setes países que o bioma abrange, entre 17°S-8.5°N (latitude) e -79.2W-48.4W (longitude), e apresenta um comportamento ecológico conservativo, associado ao período de maior precipitação (Callado et al., 2013). A Amazônia é composta, inteira ou parcialmente, por 32 ecorregiões, o que torna complexo o clima e a topografia da região (Cleary, 2006; Dinerstein et al., 1995). A amplitude ecológica das espécies é determinada, em sua maioria, por essas características (Gaston, 2003), reforçando a importância do uso de espécies como *C. odorata* para estudos ecológicos (Fritts, 1976) e efeito de distúrbios climáticos e antropogênicos na região (Brienen et al., 2016). A *C. odorata* é uma espécie heliófita, capaz de crescer sob luz difusa e florestas de sucessão secundária, em bordas ou clareiras (Lisi et al. 2020). Na Amazônia, no entanto, é comumente encontrada em área não alagadas (ex. terra-firme), apresentando raízes tabulares adaptadas para áreas de baixa taxa de sedimentação (Parolin et al., 2004). Em áreas periodicamente inundadas (ex. várzeas), essa espécie é encontrada em baixa densidade (Queiroz et al., 2007), dificultando o desenvolvimento de estudos dendrocronológicos nessas regiões, pela ciência exigir um grande número amostral e árvores próximas (Worbes, 1999). Nesse sentido, destacam o potencial de espécies de áreas alagadas para cobrir as lacunas espaciais na Amazônia (Batista & Schöngart, 2018; Bruno B.L. Cintra et al., 2021; Schöngart et al., 2004, 2007), a fim de complementar os registros de episódios climáticos comuns de escalas locais, regionais ou continentais (Boninsegna et al., 2009).

Em relação ao comprimento das cronologias, as espécies estudadas mostraram-se relativamente antigas, atingindo idades centenárias e abrangendo em torno de dois séculos e meio de vida da planta. Essa variação está dentro da média de vida de espécies tropicais (207 anos) (Brienen et al., 2016) e excede a idade de espécies consideradas secundárias na sucessão ecológica (Lima et al., 2011). A longevidade da espécie se mostra um parâmetro complementar para os estudos ecológicos da dinâmica e produtividade florestal, regimes de perturbação, ciclos biogeoquímicos, gestão de recursos naturais e conservação de florestas tropicais (Schöngart et al., 2017). Segundo Babst et al. (2014), espécies longevas e de ampla distribuição geográfica podem contribuir para estudos de modelagem de biomassa do lenho e alocação de carbono, a fim de melhorar a resolução temporal dos inventários florestais periódicos e possibilitar comparações entre zonas climáticas e tipos de floresta (Babst et al., 2014; Köhl et al., 2017). Apesar do potencial longo da *Cedrela*, dois dos grandes desafios para o gênero, em especial *C. odorata* e *C. fissilis*, estão relacionados a replicação de indivíduos nessa faixa de idade, como também a obtenção de amostras do lenho que não estejam com podridão no cerne. Devido ao grande porte das árvores e qualidade do lenho, essas espécies foram amplamente exploradas, resultando na estimativa de decréscimo populacional nos últimos 100 anos, o que reduziu o número de indivíduos mais antigos nos habitats naturais (CNCFlora 2012) e as classificou como vulneráveis a extinção (CITIES, 2021). Além disso, estudos indicam que as árvores senescentes ou de maior diâmetro do tronco são mais propensas a podridão de cerne (Gibbons & Lindenmayer, 1997; Lindenmayer et al., 2000), tendo em vista o maior tempo que ficam expostas a danos causados por fatores bióticos e abióticos (Santini Jr, 2018). Consequentemente, as metodologias de coleta de amostras não

destrutivas por trados de incremento não conseguem representar todo o lenho, devido às limitações técnicas do uso do equipamento. Dessa forma, a parceria com empresas atuantes em áreas de manejo florestal na Amazônia se mostram eficientes (Brienen & Zuidema, 2005; Dunisch, 2005; Granato-Souza, Stahle, et al., 2019). Essa parceria pode auxiliar na identificação das espécies de *Cedrela* mais antigas, através do inventário florestal, como também favorece a obtenção de amostras de discos do lenho, a qual possibilita a amostragem em regiões sem interferência das áreas afetadas por organismos xilófagos e que causam o oco interno dos troncos.

### **Qualidade e validação das cronologias**

As cronologias foram validadas a partir das estatísticas clássicas dendrocronológicas ( $r$ , MS, EPS e RBAR) (Speer, 2009) e por datação por radiocarbono. O coeficiente de correlação para cada série comparada com a série mestra ( $r$ ) foi um indicador pouco utilizado para a representação da qualidade da cronologia e indicou valores significativos acima de 0,4. As cronologias mostraram-se altamente sensíveis às variações ambientais, representadas pelo índice MS acima de 0,3 (Grissino-Mayer, 2001). A sensibilidade média muito alta tende a apresentar grande variação na largura do anel de crescimento, causado por microanéis ou anéis ausentes, dificultando a datação (Speer, 2009). Anéis de crescimento micro, ausentes e casados são bastante mencionados para as espécies do gênero (Barbosa et al., 2018; Brienen & Zuidema, 2005; Détienne, 1989; Dunisch et al., 2002; Dünisch et al., 2003; Lisi et al., 2020), porém podem ser solucionados com as técnicas de *cross-dating*, incluindo a utilização de *skeleton plot* (Granato-Souza et al., 2019; Inga & del Valle, 2017; Speer, 2009) ou por técnicas menos frequentes como a densitometria de raios X ou autofluorescência (Albuquerque et al., 2016; Godoy-Veiga et al., 2019). Observa-se que a utilização de discos do lenho do tronco para essas espécies é bastante frequente, em parceria com áreas de manejo florestal, e se mostra bastante eficiente para evitar área de deformação causada pelas raízes tabulares e para a identificação dos anéis de crescimento pela continuidade do parênquima ao longo do disco e (Brienen & Zuidema, 2005; Dunisch, 2005; Espinoza et al., 2014).

O coeficiente de correlação médio aplicado para cada par de séries possíveis ao longo de um mesmo período da cronologia (RBAR), foi bastante utilizado em relação a  $r$ , a fim de representar a intensidade do sinal de cada série ao longo da cronologia (Speer, 2009). Em conjunto, foi comumente adotado o EPS acima de 0,85, para indicar regiões da cronologia com maior intensidade da força do sinal comum em uma amostra da população. No entanto, nenhuma cronologia apresentou valores de SSS, que estima a perda da variação explicada de uma cronologia, devido a um número decrescente no tamanho de amostra, e que melhor indica a qualidade da cronologia para reconstrução climática (Wigley et al., 1984). Segundo Wigley et al., (1984), o limite de 0.85 deveria ser utilizado para valores de SSS, pois indicaria regiões que apresentam aproximadamente 15% de incerteza na datação devido a redução amostral nos anos cronológicos mais antigos. Tendo em vista a dificuldade de se obter amostras de *Cedrela* longevas, conforme discutido anteriormente, essa estatística é bastante importante para indicar até que ponto da cronologia seria confiável a utilização dos dados para estudos dendroclimatológicos. Destaca-se ainda que, em comparação com a largura dos anéis de crescimento, as cronologias de isótopos estáveis apresentam maior coerência do sinal isotópico de oxigênio entre séries, e valor de EPS com poucos raios por amostra. Em contrapartida, para a obtenção de valores significativos com a largura dos anéis de crescimento, exigisse um mínimo de 30 amostras do lenho (Schweingruber, 1989).

Além dessas estatísticas, algumas cronologias também foram validadas pela técnica de radiocarbono, utilizando-se a curva de radiocarbono atmosférico pós-testes de bombas nucleares no hemisfério sul, durante a construção (Baker et al., 2015a; Inga & del Valle, 2017) e outras foram validadas posteriormente (Baker et al., 2017; Santos et al., 2020). Na Amazônia central, a aplicação de radiocarbono já registrou espécies com maior longevidade (Schöngart et al., 2017). A aplicação de isótopos estáveis também foi utilizada como parâmetro para a validação da datação, relacionando o sinal isotópico de oxigênio dos anéis de crescimento com a variação da precipitação e pelo *cross-dating* (Baker et al., 2015; Brien et al., 2012; Cintra et al., 2019; Volland et al., 2016).

### ***Relação com as variáveis climáticas***

As cronologias testadas com as variáveis climáticas apresentaram ao menos uma correlação significativa com precipitação, temperatura ou índices macroclimáticos. A precipitação mostrou-se o principal fator que influencia o crescimento dessas espécies, principalmente no período úmido do crescimento. Esse padrão muda para as espécies de regiões montanhosas, como *C. nebulosa* e *C. montana*, as quais são mais influenciadas pela temperatura, devido a sazonalidade térmica mais acentuada (Bräuning et al., 2009; Layme-Huaman et al., 2018). Diversos estudos dendrocronológicos já identificaram essa relação entre os anéis de crescimento e a precipitação na região amazônica (Brien et al., 2016; Rodríguez-Ramírez & Luna-Vega, 2020; Schöngart et al., 2017), e outros já vem evidenciando, cada vez mais, o impacto das alterações climáticas no crescimento das árvores e na estrutura anatômica do lenho (Pandey, 2021). A performance hidráulica e mecânica da árvore está diretamente associada à largura do lenho do anel de crescimento, a variação do diâmetro do lúme dos vasos condutores e a densidade intranual (Lachenbruch & Mcculloh, 2014). Ainda há pouca informação sobre essas variações em espécies tropicais, mas estudos já vem mostrando suas aplicações para a avaliação climática, principalmente em espécies de vasos porosos a semiporosos (De Mil et al., 2018; Gholami et al., 2019; Gonçalves et al., 2021; Islam et al., 2018; Wimmer, 2002). À medida que as mudanças climáticas são agravadas (IPCC, 2021; Espinoza et al., 2019), serão cada vez mais demandados estudos que abordam as estratégias ecológicas das plantas em períodos de estresse (Lachenbruch & Mcculloh, 2014), para trabalhos multidisciplinares (Pandey, 2021).

Dentre as cronologias avaliadas, quatro foram utilizadas para reconstruções climáticas, sendo duas na região oriental da Amazônia (Granato-Souza et al., 2020) e duas nos Andes da Amazônia Peruana (Humanes-Fuente et al., 2020). Essas cronologias vêm refletindo uma forte variação multidecadal e a influência do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) na precipitação na Amazônia em escalas interanuais, reforçando a utilização da largura dos anéis de crescimento como parâmetro para a reconstrução climática (Boninsegna et al., 2009). Dentre essas, somente as cronologias de Granato-Souza et al (2019, 2020) estão disponíveis no banco de dados internacional de dados de anéis de crescimento (ITRDB). As cronologias de isótopos estáveis de oxigênio dos anéis de crescimento, por outro lado, também vem se mostrando um bom parâmetro para o *cross-dating* dos anéis de crescimento (Baker et al., 2015a), com relações negativas fortes com a variabilidade da precipitação ao longo da bacia Amazônica (Baker et al., 2016; Brien et al., 2012; Cintra et al., 2019) e dentre outros índices climáticos (Volland et al., 2016). Em geral, o  $\delta^{18}O$  em anéis de crescimento de *Cedrela* preservam o sinal climático da chuva  $\delta^{18}O$ , fornecendo registros históricos de quantidades de precipitação em larga escala durante o período úmido (Baker et al. 2015, 2016). Em áreas alagadas, esse parâmetro também vem mostrando o registro da precipitação de períodos secos, referentes

ao de baixa nas áreas de várzea (Cintra et al. 2021). Observa-se que para a aplicação de isótopos estáveis de oxigênio, a fonte de  $\delta^{18}\text{O}$  dos anéis de crescimento é bastante importante, e pode interferir diretamente nos resultados (Sohel et al., 2021). Até o momento, os trabalhos de isótopos estáveis de oxigênio em anéis de crescimento de *Cedrela*, baseiam-se em alguns estudos de raízes com *Cedrela odorata*, os quais indicam que essa espécie apresenta raízes superficiais (Kunert et al., 2010). No entanto, há registros que indicam que a *Cedrela* pode desenvolver raízes profundas em solos pouco agregados ou fissurados (Citron, 1990), o que ressalta a importância de estudos sobre o comportamento de outras espécies do gênero.

## 2.6. Considerações finais

Em geral, somente cinco espécies de *Cedrela* foram utilizadas para a construção de cronologias com boas estatísticas dendrocronológicas na Amazônia. Em termos de aplicação, as cronologias de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$ , largura dos anéis de crescimento e as de reconstruções dendroclimáticas fornecem um bom ponto de partida para as análises preliminares das variações climáticas (anuais e decadais) e ecológicas do bioma e suas regiões de transição. Porém ainda existem lacunas temporais e espaciais a serem preenchidas, para complementar o que hoje se sabe, uma vez que grande parte dessas cronologias encontra-se abaixo de  $10^{\circ}\text{S}$  de latitude, sendo necessário a complementação de outras espécies para as áreas alagadas. Destaca-se ainda que existem sete espécies de *Cedrela* na região, que necessitam estudo da anatomia do lenho da madeira e/ou da formação dos anéis de crescimento, para avaliar a aplicação na dendrocronologia. Da mesma forma, faltam estudos sobre a formação e profundidade das raízes dessas espécies, para avaliar o sinal de  $\delta^{18}\text{O}$  nos anéis de crescimento. Além disso, previsões futuras para a floresta amazônica, as quais indicam a desertificação de algumas regiões (IPCC, 2021), cada vez mais exigirão parâmetros que avaliam as estratégias hidráulicas e mecânica das espécies tropicais sob regime de estresse hídrico (Lachenbruch & Mcculloh, 2014). A exemplo das cronologias de parâmetros anatômicos do lenho e da densidade intranual dos anéis de crescimento. A *Cedrela*, como espécie de ampla distribuição e adaptação ecológica em diferentes ecorregiões amazônicas, em especial a *C. odorata*, é uma espécie chave para contribuir com esses novos parâmetros, para estudos ecológico da dinâmica e produtividade florestal, regimes de perturbação, ciclos biogeoquímicos, gestão de recursos naturais e conservação de florestas tropicais (Schöngart et al., 2017).

## REFERÊNCIAS

- Albiero-Júnior, A., Venegas-González, A., Botosso, P. C., Roig, F. A., Camargo, J. L. C., & Tomazello-Filho, M. (2019). What is the temporal extension of edge effects on tree growth dynamics? A dendrochronological approach model using *Scleronema micranthum* (Ducke) Ducke trees of a fragmented forest in the Central Amazon. *Ecological Indicators*, 101(November 2018), 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.040>

- Albuquerque, A. R., Castro, V. R. De, Lobão, M. S., Sarto, C., Filho, M. T., & Guedes, F. T. P. (2016). Comparative analysis of anatomy and micro-densitometry of the growth rings of hardwoods and conifers, with emphasis on dendrochronology. *Análise comparativa da anatomia e microdensitometria dos anéis de crescimento de folhosas e de coníferas, com ênfase. Scientia Forestalis*, 44(111), 595–610.
- Albuquerque, R. P., Brandes, A. F. N., Lisi, C. S., Moraes, L. F. D. De, & Barros, C. F. (2019). Tree-ring formation, radial increment and climate–growth relationship: assessing two potential tree species used in Brazilian Atlantic forest restoration projects. *Trees - Structure and Function*, 33(3), 877–892. <https://doi.org/10.1007/s00468-019-01825-6>
- Alves, E. E. N., Ortega Rodriguez, D. R., Rocha, P. de A., Vergütz, L., Santini Junior, L., Hesterberg, D., Pessenda, L. C. R., Tomazello-Filho, M., & Costa, L. M. da. (2021). Synchrotron-based X-ray microscopy for assessing elements distribution and speciation in mangrove tree-rings. *Results in Chemistry*, 3(March), 100121. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2021.100121>
- Andrade, V. H. F., Machado, S. do A., Figueiredo Filho, A., Botosso, P. C., Miranda, B. P., & Schöngart, J. (2019). Growth models for two commercial tree species in upland forests of the Southern Brazilian Amazon. *Forest Ecology and Management*, 438(February), 215–223. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.030>
- Andreacci, F., Botosso, P. C., & Galvão, F. (2017). Fenologia Vegetativa e Crescimento de Cedrela fissilis na. *Floresta e Ambiente*, 24.
- Babst, F., Alexander, M. R., Szejner, P., Bouriaud, O., Klesse, S., Roden, J., Ciais, P., Poulter, B., Frank, D., Moore, D. J. P., & Trouet, V. (2014). A tree-ring perspective on the terrestrial carbon cycle. *Oecologia*, 176(2), 307–322. <https://doi.org/10.1007/s00442-014-3031-6>
- Baker, J. C.A., Gloor, M., Spracklen, D. V., Arnold, S. R., Tindall, J. C., Clerici, S. J., Leng, M. J., & Brien, R. J. W. (2016). What drives interannual variation in tree ring oxygen isotopes in the Amazon? *Geophysical Research Letters*, 43(22), 11,831–11,840. <https://doi.org/10.1002/2016GL071507>
- Baker, Jessica C.A., Hunt, S. F. P., Clerici, S. J., Newton, R. J., Bottrell, S. H., Leng, M. J., Heaton, T. H. E., Helle, G., Argollo, J., Gloor, M., & Brien, R. J. W. (2015). Oxygen isotopes in tree rings show good coherence between species and sites in Bolivia. *Global and Planetary Change*, 133, 298–308. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.09.008>
- Baker, Jessica C.A., Santos, G. M., Gloor, M., & Brien, R. J. W. (2017). Does Cedrela always form annual rings? Testing ring periodicity across South America using radiocarbon dating. *Trees - Structure and Function*, 31(6), 1999–2009. <https://doi.org/10.1007/s00468-017-1604-9>
- Ballantyne, A. P., Baker, P. A., Chambers, J. Q., Villalba, R., & Argollo, J. (2011). Regional differences in south american monsoon precipitation inferred from the growth and isotopic composition of tropical trees. *Earth Interactions*, 15(5), 1–35. <https://doi.org/10.1175/2010EI277.1>
- Barbosa, A. C. M., Pereira, G. A., Granato-Souza, D., Santos, R. M., & Fontes, M. A. L. (2018). Tree rings and growth trajectories of tree species from seasonally dry tropical forest. *Australian Journal of Botany*, 66(5), 414–427. <https://doi.org/10.1071/BT17212>
- Bare, M. C., & Ashton, M. S. (2016). Growth of native tree species planted in montane reforestation projects in the Colombian and Ecuadorian Andes differs among site and species. *New Forests*, 47(3), 333–355. <https://doi.org/10.1007/s11056-015-9519-z>
- Becerra-Montalvo, V., & Zevallos-Pollito, P. A. (2014). Determinacion del turno de corta de Cedrela odorata L., Retrophyllum rospigliosii Pilger y Prumnopitys harmsiana Pilger a traves del estudio dendrocronológico en San Ignacio, Región Cajamarca-Perú. In *El Ceprosimad Florestal* (Vol. 02, Issue 2, pp. 33–47).
- Boninsegna, J. A., Argollo, J., Aravena, J. C., Barichivich, J., Christie, D., Ferrero, M. E., Lara, A., Le Quesne, C., Luckman, B. H., Masiokas, M., Morales, M., Oliveira, J. M., Roig, F., Srur, A., & Villalba, R. (2009). Dendroclimatological reconstructions in South America: A review. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3–4), 210–228. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.07.020>
- Botanic Gardens Conservation International. Richmond, U.K. Available at [www.bgci.org](http://www.bgci.org). Accessed on 17/02/2022. DOI: 10.13140/RG.2.2.33593.90725
- Bräuning, A., Volland-Voigt, F., Burchardt, I., Ganzhi, O., Nauss, T., & Peters, T. (2009). Climatic control of radial growth of Cedrela montana in a humid mountain rainforest in southern Ecuador. *Erdkunde*, 63(4), 337–345. <https://doi.org/10.3112/erdkunde.2009.04.04>
- Brien, R. J. W., & Zuidema, P. A. (2003). *el manejo de bosques y una guía metodológica UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES (IGEMA)*. April.
- Brien, R. J. W., & Zuidema, P. A. (2005). Relating tree growth to rainfall in Bolivian rain forests: A test for six species using tree ring analysis. *Oecologia*, 146(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0160-y>
- Brien, R. J. W., Helle, G., Pons, T. L., Guyot, J. L., & Gloor, M. (2012). Oxygen isotopes in tree rings are a good parâmetro for Amazon precipitation and El Niño-Southern Oscillation variability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(42), 16957–16962. <https://doi.org/10.1073/pnas.1205977109>
- Brien, R. J. W., Schöngart, J., & Zuidema, P. A. (2016). *Tree Rings in the Tropics: Insights into the Ecology and Climate Sensitivity of Tropical Trees*. 439–461. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-27422-5\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-319-27422-5_20)
- Brum, M., Teodoro, G. S., Abrahão, A., & Oliveira, R. S. (2017). Coordination of rooting depth and leaf hydraulic traits defines drought-related strategies in the campos rupestres, a tropical montane biodiversity hotspot. *Plant and Soil*, 420(1–2), 467–480. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3330-x>

- Brum, M., Vadeboncoeur, M. A., Ivanov, V., Asbjornsen, H., Saleska, S., Alves, L. F., Penha, D., Dias, J. D., Aragão, L. E. O. C., Barros, F., Bittencourt, P., Pereira, L., & Oliveira, R. S. (2019). Hydrological niche segregation defines forest structure and drought tolerance strategies in a seasonal Amazon forest. *Journal of Ecology*, *107*(1), 318–333. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13022>
- Caetano-Andrade, V. L., Clement, C. R., Weigel, D., Trumbore, S., Boivin, N., Schöngart, J., & Roberts, P. (2020). Tropical Trees as Time Capsules of Anthropogenic Activity. *Trends in Plant Science*, *25*(4), 369–380. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.12.010>
- Callado, C. H., Barros, C. F., Costa, M. S., & De Vasconcellos, T. J. (2013). Does growth rhythm of a widespread species change in distinct growth sites. *IAWA Journal*, *34*(4), 498–509. <https://doi.org/10.1163/22941932-00000040>
- Callado, C. H., de Vasconcellos, T. J., Costa, M. S., Barros, C. F., Roig, F. A., & Tomazello-Filho, M. (2014). Studies on cambial activity: Advances and challenges in the knowledge of growth dynamics of Brazilian woody species. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, *86*(1), 277–283. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201320130033>
- Cavers, S., Navarro, C., & Lowe, A. J. (2003). Chloroplast DNA phylogeography reveals colonization history of a neotropical tree, *Cedrela odorata* L., in Mesoamerica. *Molecular Ecology*, *12*(6), 1451–1460. <https://doi.org/10.1046/j.1365-294X.2003.01810.x>
- Cintra, B. B. L., Gloor, M., Boom, A., Schöngart, J., Locosselli, G. M., & Brienen, R. (2019). Contrasting controls on tree ring isotope variation for Amazon floodplain and terra firme trees. *Tree Physiology*, *39*(5), 845–860. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpz009>
- Cleary, D. (2006). The questionable effectiveness of science spending by international conservation organizations in the tropics. *Conservation Biology*, *20*(3), 733–738. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00413.x>
- Cook, E. R., & Pederson, N. (2011). *Uncertainty, Emergence, and Statistics in Dendrochronology* (Issue September). [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5725-0\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5725-0_4)
- da Cunha, T. A., Finger, C. A. G., & Hasenauer, H. (2016). Tree basal area increment models for *Cedrela*, *Amburana*, *Copaifera* and *Swietenia* growing in the Amazon rain forests. *Forest Ecology and Management*, *365*, 174–183. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.12.031>
- da Cunha, T. A., Finger, C. A. G., & Schneider, P. R. (2013). Linear mixed model to describe the basal area increment for individual cedro (*Cedrela odorata* L.) trees in occidental Amazon, Brazil. *Ciência Florestal, Santa Maria*, *23*(3), 461–470. <https://doi.org/10.5902/1980509810557>
- De Mil, T., Tarelkin, Y., Hahn, S., Hubau, W., Deklerck, V., Debeir, O., Van Acker, J., de Cannière, C., Beeckman, H., & Van den Bulcke, J. (2018). Wood density profiles and their corresponding tissue fractions in tropical angiosperm trees. *Forests*, *9*(12). <https://doi.org/10.3390/f9120763>
- Détienne, P. (1989). *Appearance and periodicity of growth rings in some tropical woods*. *10*(2), 123–132.
- Dinerstein, E., Olson, D. M., Graham, D., Webster, A. L., Primm, S. A., Bookbinder, M. P., Ledec, G., Bank, W., & Washington, W. (1995). Ecoregions of Latin America and the Caribbean. In *A Conservation Assessment of the Terrestrial Ecoregions of Latin America and the Caribbean*. <http://documents.worldbank.org/curated/en/957541468270313045/pdf/multi-page.pdf>
- dos Reis, M., Graça, P. M. L. de A., Yanai, A. M., Ramos, C. J. P., & Fearnside, P. M. (2021). Forest fires and deforestation in the central Amazon: Effects of landscape and climate on spatial and temporal dynamics. *Journal of Environmental Management*, *288*(February), 112310. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112310>
- 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*(1), 5–11.
- Dünisch, O., Bauch, J., & Gasparoy. (2002). *Formation Of Increment Zones And Intraannual Growth Dynamics In The Xylem Of Swietenia Macrophylla, Carapa Guianensis, And Cedrela Odorata ( Meliaceae )\** by In the Central Amazon the demand for wood for the local market and for export is satisfied exclu. *23*(2), 101–119.
- Dünisch, O., Oliver, Montóia, V. R., & Bauch, J. (2003). Dendroecological investigations on *Swietenia macrophylla* King and *Cedrela odorata* L. (Meliaceae) in the central Amazon. *Trees - Structure and Function*, *17*(3), 244–250. <https://doi.org/10.1007/s00468-002-0230-2>
- Ehleringer, J. R., & Dawson, T. E. (1992). Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition. *Plant, Cell & Environment*, *15*(9), 1073–1082. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1992.tb01657.x>
- Espinoza, J. C., Marengo, J. A., Ronchail, J., Carpio, J. M., Flores, L. N., & Guyot, J. L. (2014). The extreme 2014 flood in southwestern Amazon basin: The role of tropical-subtropical South Atlantic SST gradient. *Environmental Research Letters*, *9*(12), 124007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/12/124007>
- Espinoza, J. C., Ronchail, J., Marengo, J. A., & Segura, H. (2019). Contrasting North–South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981–2017). *Climate Dynamics*, *52*(9–10), 5413–5430. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4462-2>
- Espinoza, M. J. P., Guillen, G. J. I., Morales, M. S., & Ariméndiz, R. R. (2014). *dendrocronológicos en la selva central del Perú*. *62*(June), 783–793.
- Estrada-Contreras, I., Equihua, M., Laborde, J., Meyer, E. M., & Sanchez-Velasquez, L. R. (2016). Current and future distribution of the tropical tree *Cedrela Odorata* L. in Mexico under Climate Change Scenarios Using Maxlike. *PLoS ONE*, *11*(10), 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0164178>
- Fernandes, N. C. L., Valle, M. L. A., & Calderon, C. M. A. (2018). Características físicas e anatômicas de *Cedrela odorata* L. e *Cedrelinga cateniformis* Ducke. *Floresta e Ambiente*, *25*(1), 1–10. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.100814>
- Flores, T. B. 2020. (2021). *Meliaceae in Flora do Brasil 2020*. Jardim Botânico Do Rio de Janeiro. <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB9992>

- Fonti, P., & García-González, I. (2004). Suitability of chestnut earlywood vessel chronologies for ecological studies. *New Phytologist*, *163*(1), 77–86. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01089.x>
- Franklin, S. L., & Pindyck, R. S. (2018). Tropical Forests, Tipping Points, and the Social Cost of Deforestation. *Ecological Economics*, *153*(June), 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.06.003>
- FRITTS, H. C. (1976). Dendrochronology and Dendroclimatology. In H. C. FRITTS (Ed.), *Tree Rings and Climate* (pp. 1–54). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-268450-0.50006-9>
- Gaston, K. (2003). *The Structure and Dynamics of Geographic Ranges*.
- GBIF.org. (2016). *Occurrence download: Plantae*. The Global Biodiversity Information Facility. <https://doi.org/10.15468/DL.2XCKMR>
- Giraldo, J. A., del Valle, J. I., Sierra, C. A., & Melo, O. (2020). Dendrochronological Potential of Trees from America's Rainiest Region. In M. Pompa-García & J. J. Camarero (Eds.), *Latin American Dendroecology: Combining Tree-Ring Sciences and Ecology in a Megadiverse Territory* (pp. 79–119). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-36930-9\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-36930-9_5)
- Godoy-Veiga, M., Slotta, F., Alecio, P. C., Ceccantini, G., Buckeridge, M. S., & Locosselli, G. M. (2019). Improved tree-ring visualization using autofluorescence. *Dendrochronologia*, *55*(March), 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.03.003>
- Gonçalves, J. Q., Durgante, F. M., Wittmann, F., Piedade, M. T. F., Ortega Rodriguez, D. R., Tomazello-Filho, M., Parolin, P., & Schöngart, J. (2021). Minimum temperature and evapotranspiration in Central Amazonian floodplains limit tree growth of *Nectandra amazonum* (Lauraceae). *Trees - Structure and Function*, *35*(4), 1367–1384. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02126-7>
- Granato-Souza, D., Stahle, D. W., Barbosa, A. C., Feng, S., Torbenson, M. C. A., de Assis Pereira, G., Schöngart, J., Barbosa, J. P., & Griffin, D. (2019). Tree rings and rainfall in the equatorial Amazon. *Climate Dynamics*, *52*(3–4), 1857–1869. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4227-y>
- Granato-Souza, D., Stahle, D. W., Torbenson, M. C. A., Howard, I. M., Barbosa, A. C., Feng, S., Fernandes, K., & Schöngart, J. (2020). Multidecadal Changes in Wet Season Precipitation Totals Over the Eastern Amazon. *Geophysical Research Letters*, *47*(8), 1–9. <https://doi.org/10.1029/2020GL087478>
- Grau, H. R. (2000). Regeneration patterns of *Cedrela lilloi* (Meliaceae) in northwestern Argentina subtropical montane forests. *Journal of Tropical Ecology*, *16*(2), 227–242. <https://doi.org/10.1017/S0266467400001371>
- Grissino-Mayer, H. (2001). Evaluating Crossdating Accuracy: A Manual and Tutorial for the Computer Program COFECHA. *Tree-Ring Research*.
- Hammerschlag, I., Macario, K. D., Barbosa, A. C., De Assis Pereira, G., Farrapo, C. L., & Cruz, F. (2019). Annually Verified Growth of *Cedrela Fissilis* from Central Brazil. *Radiocarbon*, *61*(4), 927–937. <https://doi.org/10.1017/RDC.2019.52>
- Hietz, P., Wanek, W., & Dünisch, O. (2005). Long-term trends in cellulose  $\delta^{13}\text{C}$  and water-use efficiency of tropical *Cedrela* and *Swietenia* from Brazil. *Tree Physiology*, *25*(6), 745–752. <https://doi.org/10.1093/treephys/25.6.745>
- Hughes, M. K. (2002). *Hughes et al 2002 Dendrochronology in climatology.pdf*, 2, 95–116.
- Humanes-Fuente, V., Ferrero, M. E., Muñoz, A. A., González-Reyes, Requena-Rojas, E. J., Barichivich, J., Inga, J. G., & Layme-Huaman, E. T. (2020). Two Centuries of Hydroclimatic Variability Reconstructed From Tree-Ring Records Over the Amazonian Andes of Peru. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *125*(18), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2020JD032565>
- Inga, J. G., & del Valle, J. I. (2017). Log-relative growth: A new dendrochronological approach to study diameter growth in *Cedrela odorata* and *Juglans neotropica*, Central Forest, Peru. *Dendrochronologia*, *44*, 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.03.009>
- IPCC. (2021). Climate change 2021: the physical science basis. *South African Geographical Journal*. <https://doi.org/10.1080/03736245.2010.480842>
- ITRDB. Paleo Data Search. (n.d.). <https://www.ncdc.noaa.gov/paleo-search/?dataTypeld=18>
- Köhl, M., Neupane, P. R., & Lotfiomran, N. (2017). *The impact of tree age on biomass growth and carbon accumulation capacity : A retrospective analysis using tree ring data of three tropical tree species grown in natural forests of Suriname*. 1–17.
- Kunert, N., Schwendenmann, L., & Hölscher, D. (2010). Seasonal dynamics of tree sap flux and water use in nine species in Panamanian forest plantations. *Agricultural and Forest Meteorology*, *150*(3), 411–419. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.01.006>
- Lachenbruch, B., & McCulloh, K. A. (2014). Traits, properties, and performance: How woody plants combine hydraulic and mechanical functions in a cell, tissue, or whole plant. *New Phytologist*, *204*(4), 747–764. <https://doi.org/10.1111/nph.13035>
- Layme-Huaman, E. T., Ferrero, M. E., Palacios-Lazaro, K. S., & Requena-Rojas, E. J. (2018). *Cedrela nebulosa*: A novel species for dendroclimatological studies in the montane tropics of South America. *Dendrochronologia*, *50*(June), 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.06.004>
- Leite-Filho, A. T., Soares-Filho, B. S., Davis, J. L., Abrahão, G. M., & Börner, J. (2021). Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon. *Nature Communications*, *12*(1), 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22840-7>
- Lima, R. B. de A., Silva, J. A. A. da, Marangon, L. C., Ferreira, R. L. C., & Silva, R. K. S. da. (2011). Sucessão ecológica de um trecho de Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas, Carauari, Amazonas. *Pesquisa Florestal Brasileira*, *2011*(67), 161–172. <https://doi.org/10.4336/2011.pfb.31.67.161>



- Lisi, C. S., Pagotto, M. A., Anholetto, C. R., Nogueira, F. C., Santos, H. L., Costa, C. M., Menezes, Í. R. N., Roig Juñet, F. A., & Tommasiello Filho, M. (2020). Dendroecological Studies with *Cedrela odorata* L., Northeastern Brazil. In M. Pompa-García & J. J. Camarero (Eds.), *Latin American Dendroecology: Combining Tree-Ring Sciences and Ecology in a Megadiverse Territory* (pp. 37–59). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-36930-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-36930-9_3)
- Locosselli, G. M., Brienen, R. J. W., de Souza Leite, M., Gloor, M., Krotenthaler, S., de Oliveira, A. A., Barichivich, J., Anhof, D., Ceccantini, G., Schöngart, J., & Buckeridge, M. (2021). Global tree-ring analysis reveals rapid decrease in tropical tree longevity with temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *117*(52), 33358–33364. <https://doi.org/10.1073/PNAS.2003873117>
- Lopez, L., Stahle, D., Villalba, R., Torbenson, M., Feng, S., & Cook, E. (2017). Tree ring reconstructed rainfall over the southern Amazon Basin. *Geophysical Research Letters*, *44*(14), 7410–7418. <https://doi.org/10.1002/2017GL073363>
- Lotfiomran, N., & Köhl, M. (2017). Retrospective analysis of growth A contribution to sustainable forest management in the tropics. *IAWA Journal*, *38*(3), 297–S21. <https://doi.org/https://doi.org/10.1163/22941932-20170173>
- Luchi, A. E. (2011). Quantitative features of *Cedrela odorata* L. wood (Meliaceae). *Revista Brasileira de Botânica*, *34*(3), 403–410. <https://doi.org/10.1590/s0100-84042011000300013>
- Marcati, C. R., Angyalossy, V., & Evert, R. F. (2006). Seasonal variation in wood formation of *Cedrela fissilis* (Meliaceae). *IAWA Journal*, *27*(2), 199–211. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000149>
- Marcelo-Peña, J. L., Roig, F. A., Goodwin, Z. A., & Tomazello-Filho, M. (2020). Characterizing growth rings in the trees of Perú: A wood anatomical overview for potential applications in dendroecological-related fields. *Dendrochronologia*, *62*(April 2019), 125728. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125728>
- Marengo, J. A., & Espinoza, J. C. (2016). Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: Causes, trends and impacts. *International Journal of Climatology*, *36*(3), 1033–1050. <https://doi.org/10.1002/joc.4420>
- Marengo, J. A., Liebmann, B., Grimm, A. M., Misra, V., Silva Dias, P. L., Cavalcanti, I. F. A., Carvalho, L. M. V., Berbery, E. H., Ambrizzi, T., Vera, C. S., Saulo, A. C., Nogueira-Paegle, J., Zipser, E., Seth, A., & Alves, L. M. (2012). Recent developments on the South American monsoon system. *International Journal of Climatology*, *32*(1), 1–21. <https://doi.org/10.1002/joc.2254>
- Marengo, Jose A., Alves, L. M., Soares, W. R., Rodriguez, D. A., Camargo, H., Riveros, M. P., & Pabló, A. D. (2013). Two contrasting severe seasonal extremes in tropical South America in 2012: Flood in Amazonia and drought in Northeast Brazil. *Journal of Climate*, *26*(22), 9137–9154. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00642.1>
- Mendivelso, H. A., Camarero, J. J., Gutiérrez, E., & Castaño-Naranjo, A. (2016). Climatic influences on leaf phenology, xylogenesis and radial stem changes at hourly to monthly scales in two tropical dry forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, *216*, 20–36. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.09.014>
- Menezes, I. R. N., Aragão, J. R. V., Pagotto, M. A., & Lisi, C. S. (2022). Teleconnections and edaphoclimatic effects on tree growth of *Cedrela odorata* L. in a seasonally dry tropical forest in Brazil. *Dendrochronologia*, *72*(January). <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.125923>
- Moya, R., Wiemann, M. C., & Olivares, C. (2013). Identification of endangered or threatened costa rican tree species by wood anatomy and fluorescence activity. *Revista de Biología Tropical*, *61*(3), 1133–1156. <https://doi.org/10.15517/rbt.v61i3.11909>
- Muellner, A. N., Pennington, T. D., & Chase, M. W. (2009). Molecular phylogenetics of Neotropical Cedreleae (mahogany family, Meliaceae) based on nuclear and plastid DNA sequences reveal multiple origins of “*Cedrela odorata*.” *Molecular Phylogenetics and Evolution*, *52*(2), 461–469. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2009.03.025>
- Pagotto, M. A., DeSoto, L., Carvalho, A., Nabais, C., Tomazello Filho, M., Ribeiro, A., & Lisi, C. S. (2017). Evaluation of X-ray densitometry to identify tree-ring boundaries of two deciduous species from semi-arid forests in Brazil. *Dendrochronologia*, *42*, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.01.007>
- Pagotto, M. A., Menezes, I. R. N., Costa, C. M., Lisi, C. S., & Bräuning, A. (2021). Oxygen isotopes in tree rings of *Cedrela odorata* L. as an indicator of hydroclimate variations in a seasonally dry tropical forest in northeastern Brazil. *Trees - Structure and Function*, *2*(0123456789). <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02158-z>
- Pandey, S. (2021). Climatic influence on tree wood anatomy: a review. *Journal of Wood Science*, *67*(1). <https://doi.org/10.1186/s10086-021-01956-w>
- Paredes-Villanueva, K., López, L., & Navarro Cerrillo, R. M. (2016). Regional chronologies of *Cedrela fissilis* and *Cedrela angustifolia* in three forest types and their relation to climate. *Trees - Structure and Function*, *30*(5), 1581–1593. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1391-8>
- Paredes-Villanueva, K., López, L., & Navarro Cerrillo, R. M. (2016b). Regional chronologies of *Cedrela fissilis* and *Cedrela angustifolia* in three forest types and their relation to climate. *Trees - Structure and Function*, *30*(5), 1581–1593. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1391-8>
- Pennington, T. D., Muellner, A. N. (Alexandra N. ), Wise, R., & 1941-. (2010). *Cedrela*. dh books.
- Pereira, G. A., Barbosa, A. C. M. C., Torbenson, M. C. A., Stahle, D. W., Granato-Souza, D., Santos, R. M. Dos, & Barbosa, J. P. D. (2018). The Climate Response of *Cedrela Fissilis* Annual Ring Width in the Rio São Francisco Basin, Brazil. *Tree-Ring Research*, *74*(2), 162–171. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-74.2.162>
- Perez-Contreras, O. (2011). *Estudio de mercado de Cedrela odorata en Bolovia, Brasil y Peru*. 150. ESTUDIO DE MERCADO DE *Cedrela odorata* EN%5CnBOLIVIA, BRASIL Y PERU
- Pompa-García, M., Venegas-González, A., Júnior, A. A., & Sigala-Rodríguez, J. A. (2018). Dendroecological Approach to Assessing Carbon Accumulation Dynamics in Two *Pinus* Species from Northern Mexico. *Tree-Ring Research*, *74*(2), 196–209. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-74.2.196>

- Ramos, J. H., Santos, R. R., Ramos, A. H., Cuevas, X. G., Hernández-Máximo, E., Uicab, J. V. C., & López, D. S. (2018). Historical, current and future distribution of *Cedrela odorata* in Mexico. *Acta Botanica Mexicana*, 2018(124), 117–134. <https://doi.org/10.21829/abm124.2018.1305>
- Rodríguez-Ramírez, E. C., & Luna-Vega, I. (2020). Dendroecology as a Research Tool to Investigate Climate Change Resilience on *Magnolia vovidesii*, a Threatened Mexican Cloud Forest Tree Species of Eastern Mexico. In M. Pompa-García & J. J. Camarero (Eds.), *Latin American Dendroecology: Combining Tree-Ring Sciences and Ecology in a Megadiverse Territory* (pp. 3–20). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-36930-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-36930-9_1)
- Roig, F. A., Osornio, J. J., Diaz, J. V., Luckman, B., Tiessen, H., Medina, A., & Noellemeier, E. J. (2005). Anatomy of growth rings at the Yucatán Peninsula. *Dendrochronologia*, 22(3), 187–193. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2005.05.007>
- Rozendaal, D. M. A., & Zuidema, P. A. (2011). Dendroecology in the tropics: A review. *Trees - Structure and Function*, 25(1), 3–16. <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0480-3>
- Santos, G. M., Granato-Souza, D., Barbosa, A. C., Oelkers, R., & Andreu-Hayles, L. (2020). Radiocarbon analysis confirms annual periodicity in *Cedrela odorata* tree rings from the equatorial Amazon. *Quaternary Geochronology*, 58, 101079. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2020.101079>
- 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*. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-61669-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-61669-8_3)
- Schöngart, J., Wittmann, F., Worbes, M., Piedade, M. T. F., Krambeck, H. J., & Junk, W. J. (2007). Management criteria for *Ficus insipida* Willd. (Moraceae) in Amazonian white-water floodplain forests defined by tree-ring analysis. *Annals of Forest Science*, 64(6), 657–664. <https://doi.org/10.1051/forest:2007044>
- Schweingruber, Fritz H. (2013). *Microscopic Preparation Techniques for Plant Stem Analysis* (Issue August).
- Schweingruber, Fritz Hans. (1989). Tree rings Basics and Applications of Dendrochronology. In *Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents*. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-1273-1>
- Speer, J. H. (2009). Fundamentals of tree-ring research. In *University of Arizona press* (3rd ed., Vol. 26, Issue 3). <https://doi.org/10.1002/gea.20357>
- Stahle, D. W., Torbenson, M. C. A., Howard, I. M., Granato-Souza, D., Barbosa, A. C., Feng, S., Schöngart, J., Lopez, L., Villalba, R., Villanueva, J., & Fernandes, K. (2020). Pan American interactions of Amazon precipitation, streamflow, and tree growth extremes. *Environmental Research Letters*, 15(10). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ababc6>
- Stepka, T. F., Mattos, P. P. de, Figueiredo Filho, A., Braz, E. M., & Machado, S. do A. (2021). Growth of *Araucaria angustifolia*, *Cedrela fissilis* and *Ocotea porosa* in different locations within the *Araucaria* forest in the southern Brazil. *Forest Ecology and Management*, 486(August 2020). <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118941>
- ThePlantList (2010). *Version 1. Published on the Internet*. <http://www.theplantlist.org/>
- Tomazello Filho, M., Botosso, P. C., Lisi, C. S., & Roig, F. A. (2000). Potencialidade da família Meliaceae para dendrocronologia em regiões tropicais e subtropicais. *Dendrocronologia En América Latina. Editorial de La Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, August 2015*, 381–431.
- Tomazello, M., Botosso, P. C., Lisi, C. S., & Spathelf, P. (2001). *Cedrela angustifolia* Ses. et Moc. ex Dc., Meliaceae: potential species for tropical dendrochronology. *The Palaeobotanist*, 50(August 2015), 47–53.
- Tomazello-Filho, M., Barros, C. F., Callado, C. H., & Roig, F. A. (2013). Cambial growth periodicity studies of south american woody species-a review. *IAWA Journal*, 34(3), 213–230. <https://doi.org/10.1163/22941932-00000019>
- Tropicos.org. (2021). *No Title*. Missouri Botanical Garden. <https://tropicos.org>
- Venegas-González, A., Roig, F. A., Lisi, C. S., Junior, A. A., Alvares, C. A., & Tomazello-Filho, M. (2018). Drought and climate change incidence on hospot *Cedrela* forests from the Mata Atlântica biome in southeastern Brazil. *Global Ecology and Conservation*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00408>
- Volland, F., Pucha, D., & Bräuning, A. (2016). Hydro-climatic variability in southern ecuador reflected by tree-ring oxygen isotopes. *Erdkunde*, 70(1), 69–82. <https://doi.org/10.3112/erdkunde.2016.01.05>
- Wigley, T. M. ., Briffa, K. R., & Jones, P. D. (1984). On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and syndrometeorology. *American Meteorological Society*.
- Worbes, M. (1999). Annual growth rings, rainfall-dependent growth and long-term growth patterns of tropical trees from the Caparo Forest Reserve in Venezuela. *Journal of Ecology*, 87(3), 391–403. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.1999.00361.x>
- Worbes, M. (2002). One hundred years of tree-ring research in the tropics - A brief history and an outlook to future challenges. *Dendrochronologia*, 20(1–2), 217–231. <https://doi.org/10.1078/1125-7865-00018>
- Worbes, M., & Schöngart, J. (2019). Measures for sustainable forest management in the tropics – A tree-ring based case study on tree growth and forest dynamics in a Central Amazonian lowland moist forest. *PLoS ONE*, 14(8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219770>



### 3. DENDROECOLOGIA DE *Cedrela odorata* AVALIADA POR MÚLTIPLOS PARÂMETROS DOS ANÉIS DE CRESCIMENTO

#### RESUMO

Alterações fitogeográficas e climáticas vêm interferindo para intensificação de eventos hidroclimáticos e o desbalanço ecológico da floresta tropical amazônica. A dendrocronologia, por fornecer uma perspectiva temporal e espacial, destaca parâmetros dos anéis de crescimento como potenciais para avaliações contínuas da dinâmica florestal. Este trabalho apresenta a construção de cronologias de parâmetros estruturais (largura, densidade, número de vasos) e ecofisiológicos (isótopos estáveis de oxigênio) dos anéis de crescimento de *Cedrela odorata*. Busca-se i) analisar a relação das variáveis estruturais dentro das árvores de *Cedrela odorata*; ii) avaliar a relação entre as variáveis dos anéis de crescimento e as variáveis climáticas regionais e globais, e iii) caracterizar o sinal que esses parâmetros trazem em anos de extrema variação hidroclimática. Os parâmetros estruturais apresentam relação complexa entre si e resposta a períodos distintos da precipitação. A largura responde positivamente ao período úmido, enquanto que a densidade do lenho responde negativamente a transição seco-úmido e o número de vasos ao período seco. As análises de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  indicam que a espécie reflete a variabilidade interanual da precipitação da estação chuvosa (JFMAM) sobre o nordeste do Brasil. As correlações mais fortes foram observadas com as chuvas, que correspondem ao pico de precipitação sobre o Nordeste do Brasil, quando a ZCIT atinge suas posições mais ao sul. A análise de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  e do incremento em largura do anel de crescimento indicaram forte papel do aquecimento do Oceano Atlântico Tropical Norte e Sul e do El Niño Oscilação Sul (El Niño 3.4), na ecologia da *Cedrela odorata*, principalmente após a década de 1980.

**Palavras-chave:** 1. Largura do anel 2. Densidade do lenho 3. Isótopos de oxigênio 4. Área e número de vasos

#### ABSTRACT

Phytogeographic and climatic changes have contributed to hydroclimatic events and ecological imbalance in Amazon rainforest. Dendrochronology provides a temporal and spatial perspective, highlighting tree-ring as potential proxy for continuous assessments of forest dynamics. This work presents the construction of chronologies of structural (width, density, number of vessels) and ecophysiological (stable oxygen isotopes) proxies of *Cedrela odorata* tree-rings. It seeks to i) analyze the relationship of structural variables within *Cedrela odorata* trees; ii) to evaluate the relationship between the growth ring variables and the regional and global climatic variables, and iii) to characterize the signal that these proxies bring in years of extreme hydroclimatic variation. The structural parameters show a complex relationship within *Cedrela odorata* trees and respond to different periods of precipitation. Tree-ring width responds positively to the wet period, while the wood density responds negatively to the dry-wet transition, and the number of vessels respond negatively to dry period. The  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  analyzes indicate that the species reflects the interannual variability of the rainy season (JFMAM) over Northeastern Brazil. The strongest correlations were observed with rainfall, which corresponds to the peak of precipitation over Northeast Brazil, when the ITCZ reaches its southernmost positions. The analysis of  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  and the tree-ring width indicated a strong role of the warming of the North and South Tropical Atlantic Ocean and the El Niño Southern Oscillation (El Niño 3.4) in *Cedrela odorata* trees ecology, especially after the 1980s.

**Keywords:** 1. Tree-ring 2. Wood density 3. Oxygen stable isotope 4. Area and number of vessels

### 3.1. Introdução

A floresta tropical amazônica vem apresentando atualmente intensas alterações no ciclo hidrológico da água, com longos períodos de inundações e secas comparado com as décadas anteriores (Marengo et al., 2009, 2011, 2016; Gloor et al., 2013; Espinoza et al., 2019). Na Amazônia oriental, estudos indicam um aumento na frequência de secas e temperaturas extremas, sugerindo maior risco de incêndios florestais e queimadas em função dos eventos hidroclimáticos e antropogênicos (Marengo et al., 2018; Silva et al., 2019). O aumento da estação seca vem se mostrando fortemente relacionado ao gradiente norte-sul do atlântico tropical SST, o qual intensifica o deslocamento da zona de convergência intertropical (ZCIT) para o norte e fortalece a circulação da células de Hadley, aumentando a duração e a intensidade do período seco no leste da Amazônia (Espinoza et al., 2019; Li et al., 2006; Malhi et al., 2008). Secas resultantes de alterações fitogeográficas e alterações climáticas tendem a interferir na movimentação de massas de ar responsáveis pela distribuição da chuva no continente (Phillips, 2009), além de aumentar o desbalanço ecológico, reduzindo-se a biomassa e longevidade das espécies tropicais (Gatti et al., 2014; Bretfeld et al., 2018; Locosselli et al., 2020). Isso evidencia a vulnerabilidade dessa floresta às alterações presentes. Assim, um dos principais desafios é determinar quais são os impactos que essas alterações gerarão na dinâmica florestal e no manejo de espécies tropicais amazônicas, a curto e longo prazo, em um contexto de mudanças climáticas e alterações da composição florestal (Fearnside, 2008).

Avaliações contínuas da dinâmica florestal constituem-se em um dos principais indicadores para diagnosticar o estado de equilíbrio e alterações florestais (Botosso & Tomazello-Filho, 2001). A dendrocronologia e suas especialidades, utiliza as mensurações de indicadores biológicos registrados nos anéis de crescimento, e sua relação com as variáveis ambientais edafoclimáticas (Fritts, 1976; Schweingruber, 1989; Worbes, 1999; Hughes, 2002; Caetano-Andrade et al., 2020). A associação da largura dos anéis de crescimento ao seu ano de formação tem-se mostrado um bom indicador para a construção de séries históricas das condições ambientais e processos ecológicos ao longo do tempo (Albiero-Júnior et al., 2019; Albuquerque et al., 2019, Granato-Souza et al., 2019, 2020; Humanes-Fuente et al., 2020; Stahle et al., 2020). Além desse, outros indicadores dos anéis de crescimento, como elementos anatômicos do lenho (Wimmer, 2002; Costa et al., 2020), densidade intranual do lenho (Gonçalves et al., 2021) e isótopos estáveis de oxigênio ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$ ) (Brienen et al., 2012; Baker et al., 2015; Volland et al., 2016) também têm mostrado bons resultados para compreender a interação planta e ambiente quando integrados (Pacheco et al., 2020).

Em angiospermas, a alteração do diâmetro, frequência e agrupamento dos vasos são estratégias fundamentais para a condutividade hidráulica (Lachenbruch & Mcculloh, 2014). Diversos estudos associando a anatomia com a temporalidade da dendrocronologia, vêm mostrando que essas estratégias estão associadas às variações climáticas (Fonti & García-González, 2004, 2009; Souto-Herrero et al., 2017; Pandey et al., 2018, 2020; Giraldo et al., 2020). Isso ocorre devido a uma ampla distribuição no número de vasos durante a atividade cambial, para facilitar o transporte de água, enquanto que, em período de dormência, o inverso é observado, a fim de aumentar a resistência do fluxo de seiva no xilema (De Mil et al., 2018; Wimmer, 2002). Essa relação é bastante promissora em espécies com anéis porosos e semi-porosos (García-González et al., 2016), fornecendo

informações sobre a temperatura e precipitação em florestas temperadas e tropicais (Bhattacharyya et al., 2007; Fonti & García-González, 2004; Islam et al., 2018; Gholami et al., 2019).

A densidade intranual é um parâmetro bastante difundido na dendrocronologia (Schweingruber, 1989; Briffa et al., 2004), associada aos parâmetros visuais e quantitativos anatômicos que caracterizam o anel de crescimento (Tomazello et al., 2008; Albuquerque et al., 2016; Pagotto et al., 2017). A redução do diâmetro dos vasos é comumente relacionada ao aumento da densidade do lenho, como estratégia para evitar a cavitação, podendo registrar as variações climáticas (Wimmer, 2002; De Mil et al., 2018). Diversos estudos já foram realizados em espécie temperadas, apresentando altas correlações entre a densidade máxima (Allen et al., 2012; Kłusek et al., 2015) e densidade mínima (Camarero et al., 2014), com temperatura e precipitação. Na região tropical, por sua vez, os poucos estudos realizados indicam que a densidade mínima pode ser um indicador da temperatura mínima local em regiões de várzea (Gonçalves et al., 2021).

Da mesma forma que a densidade intranual, os isótopos estáveis de oxigênio ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$ ) vêm sendo amplamente aplicados na dendroclimatologia na Amazônia, por estar fortemente relacionados ao acúmulo de precipitação ao longo das trajetórias de massas de ar (*rainout upwind*) e a vazão do rio ao longo da bacia amazônica (Brienen et al., 2012; Baker et al., 2015; Volland et al., 2016; Cintra et al., 2021). A assinatura climática da precipitação ( $\delta^{18}\text{O}_p$ ), pode ser registrada nos anéis de crescimento, a partir da absorção da água do solo pelas raízes mais superficiais (McCarroll & Loader, 2006). A água superficial não é fracionada durante a absorção pela planta (Cintra et al., 2019) e sabe-se que grande parte da água evapotranspirada por espécies tropicais provém da água superficial do solo, sugerindo que o sinal de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  provém predominantemente da precipitação recente (Brum et al., 2017; Soheli et al., 2021). Dessa forma, o  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  tende a registrar com precisão as variações hidroclimáticas regionais através do fenômeno conhecido por “*amount effect*”, o qual representa o  $\delta^{18}\text{O}_{\text{precipitação}}$  em função da temperatura de condensação e/ou pela taxa de precipitação da chuva (Dansgaard 1964; Rozanski et al. 1993, Cintra et al. 2019).

Na floresta Amazônica, largura dos anéis de crescimento e isótopos estáveis de oxigênio são os principais indicadores utilizados para avaliação ecológica das taxas de crescimento (Dünisch et al., 2003; Inga & del Valle, 2017) e variações hidroclimáticas (Brienen & Zuidema, 2005; Baker et al., 2015; Granato-Souza et al., 2019, 2020). No entanto, estudos que integram outros parâmetros dos anéis de crescimento para avaliação ecológica e climática, foram pouco explorados (Worbes, 2002; Brienen et al., 2016), destacando-se a necessidade de pesquisas complementares para entender a relação de outros indicadores dendrocronológicos na relação planta-ambiente. Dessa forma, este trabalho propõe-se a construir cronologias de parâmetros obtidos dos anéis de crescimento, utilizando-se a espécie *C. odorata*, a qual vem mostrando grande potencial dendrocronológico nos trópicos (Layme-Huaman et al., 2018; Granato-Souza et al., 2019, 2020; Pagotto et al., 2021; Stepka et al., 2021). Tem-se por objetivo testar três variáveis estruturais dos anéis de crescimento (incremento radial anual, densidade intra anual, área de vasos) e uma variável ecofisiológica ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$ ), para a construção de cronologias, a fim de i) analisar a relação das variáveis estruturais dentro das árvores de *Cedrela odorata*; ii) avaliar a relação entre as variáveis dos anéis de crescimento e as variáveis climáticas regionais e globais, e iii) caracterizar o sinal que esses parâmetros trazem em anos de extrema variação hidroclimática.

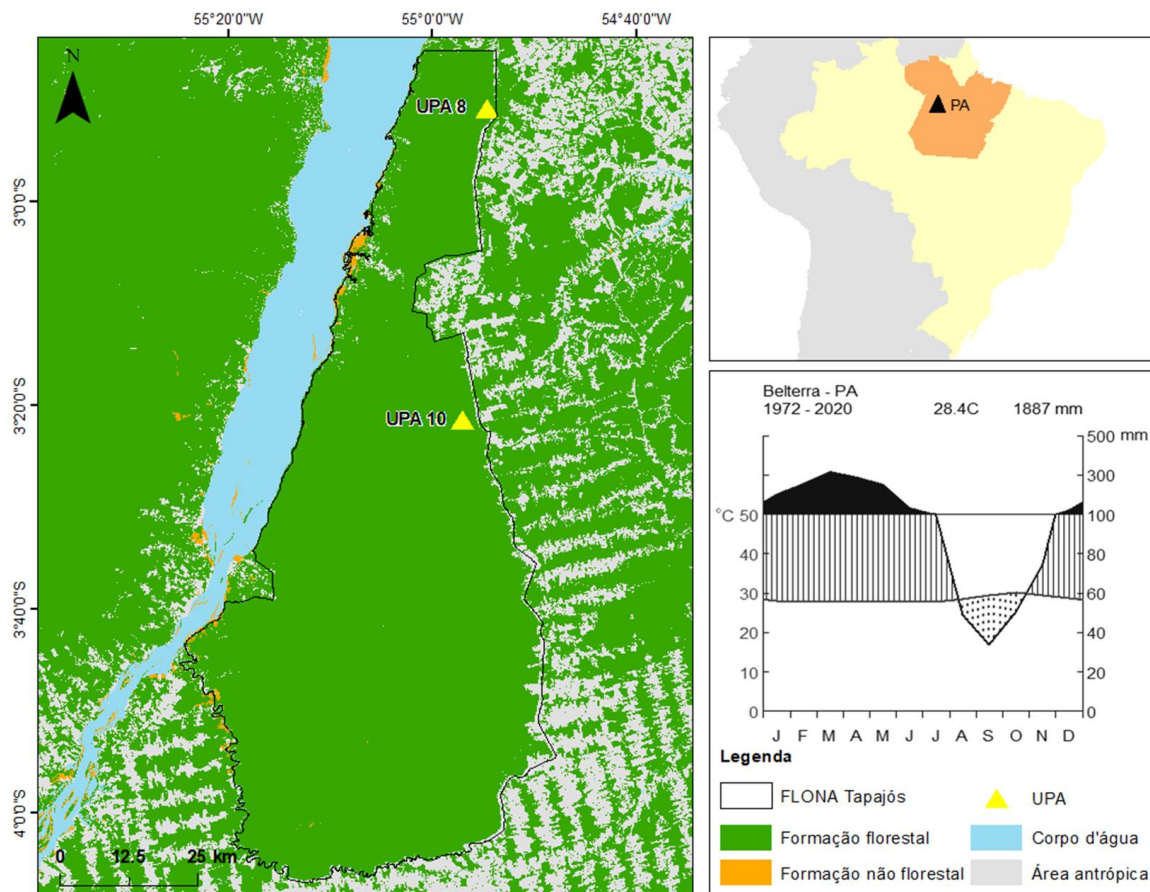
## 3.2. Material e métodos

### 3.2.1. Área de estudo

A área de estudo localiza-se na Amazônia oriental brasileira, no estado do Pará ( $2^{\circ} 45' - 4^{\circ} 10' S$ ,  $54^{\circ} 45' - 55^{\circ} 30' W$ , 175 m) (Figure 1), dentro da unidade de conservação de uso sustentável, Floresta Nacional do Tapajós (Flona, Tapajós – Brasil, 1974). A área abrange cerca de 527.319 ha, sendo 32.586,56 ha ministrado pela cooperativa mista da floresta nacional do Tapajós (COOMFLONA), através da implementação do projeto de manejo sustentável Ambé (Ibama nº 40, 22 august 2003), onde o projeto foi desenvolvido com o apoio da cooperativa. O clima da região é caracterizado como Ami (tropical úmido), pela classificação de Köppen, com temperaturas variando menos de  $5^{\circ} C$ , ao longo do ano. A precipitação anual é de 1.887 mm, com temperaturas médias de  $25,5^{\circ} C$  (estação meteorológica de Belterra-PA) (Figura 01). A estação chuvosa concentra-se entre janeiro a maio, e a estação seca, entre agosto e setembro, sendo a mínima evapotranspiração em maio e a máxima em outubro. A estação meteorológica mais próxima é a de Belterra-PA, 20 km da Flona, cobrindo um período de 1972 a 2021 (INMET, 2021). A vegetação é dominada por floresta ombrófila densa, mata de terra firme não inundável (Rodrigues et al., 2015), caracterizada por dossel emergente das planícies, com árvores de grande porte, cipós lenhosos, palmeiras e epífitas, sob regime climático de alta temperatura (Velooso et al., 1991).

### 3.2.2. Coleta do lenho das árvores

A coleta do lenho das árvores foi realizada em duas unidades de produção do projeto Ambé: UPA nº8 ( $2^{\circ}50'50,8'' S$ ;  $54^{\circ}54'40,9'' W$ ) e UPA nº10 ( $3^{\circ}21'23,8'' S$ ;  $54^{\circ}56'59,1'' W$ ) (Figure 1), 60 km distantes uma da outra. Todas as árvores de *C. odorata* coletadas foram pré-selecionadas do inventário florestal do projeto, previamente aprovado pelo órgão ambiental competente (ICMbio, 2019) (Figure 01). A coleta foi realizada em dois períodos por métodos distintos. A primeira ocorreu entre 2013 a 2015, coletando-se 20 discos (7 UPA nº 8 e 13 UPA nº 10) da base do tronco de árvores de *C. odorata* (diâmetro a altura do peito – DAP > 50 cm), pelo método destrutivo (R Core Team, 2019). A segunda coleta ocorreu em julho de 2021 somente na UPA nº 10. Coletou-se 2 a 4 baquetas do lenho de 28 árvores vivas, com sonda motorizada de 2 cm de diâmetro, e com sonda de *pressler* de 5 mm (Caetano-Andrade et al., 2021). As amostras do lenho das duas coletas foram transportadas para o Laboratório de Anatomia, Dendrocronologia e Identificação da Madeira, do LCF/ESALQ/Universidade de São Paulo, onde se encontram armazenadas para futuros trabalhos.



**Figure 1.** Floresta Nacional do Tapajós, Pará, Brasil. Unidade de produção número 10 (UPA 10) e número 8 (UPA 8). Climograma da cidade de Belterra, PA (Source: INMET weather station).

### 3.2.3. Preparo das amostras do lenho

O preparo das amostras do lenho foi dividido em quatro etapas, para melhor compreensão: i) análise da largura dos anéis de crescimento (RW), ii) análise da microdensidade dos anéis de crescimento (RD), iii) análise quantitativa de área e número dos vasos (RMV, RNV) e iv) análise dos isótopos de oxigênio ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$ ). Destaca-se que as análises de RD, RMV, RNV e  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  iniciaram-se antes da segunda coleta de campo. A nova coleta de 2021 foi utilizada unicamente para aumentar a robustez da cronologia de largura e aumentar o período de análise da séries de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$ . Isso justifica a diferença que se apresenta entre os períodos de cada cronologia posteriormente construída.

#### i) *Análise da largura dos anéis de crescimento*

Todas as amostras da seção transversal do lenho foram secas ao ar livre e polidas, em gradiente de 80 a 1.200 grãos.mm<sup>2</sup>, em combinação com ar pressurizado para remoção de resíduos na cavidade dos vasos (Pilcher, 1989). Esse procedimento foi realizado para a clara visualização dos anéis de crescimento de *C. odorata*, caracterizados por banda de parênquima marginal, associados a vasos semi-porosos (Dünisch et al., 2002,2003; Brienem & Zuidema, 2005; Tomazello Filho et al., 2000; Sousa, 2019; Lisi et al., 2020). Nas amostras de disco do lenho, foram demarcados de 2 a 4 raios na sua seção transversal, evitando-se as regiões de deformação



(Schweingruber, 1989), para a demarcação dos anéis de crescimento sob microscópio estereoscópio (Figura 2A). Nas amostras do lenho de 2 cm e 5 mm de diâmetro, somente foi demarcado os anéis. Após as demarcações dos anéis de crescimento, as amostras do lenho foram escaneadas, em resolução de 1.200 dpi e os anéis de crescimento foram mensurados, seguindo os critérios dendrocronológicos (Fritts, 1976) (Figura 2B). A mensuração foi feita utilizando-se o software CooRecorder 7.8 (Figura 2b), sentido casca à medula, seguindo o ângulo do vaso, para a construção da cronologia de largura dos anéis de crescimento (RW). A cronologia de largura, uma vez construída, foi utilizada como base para as análises subsequentes.

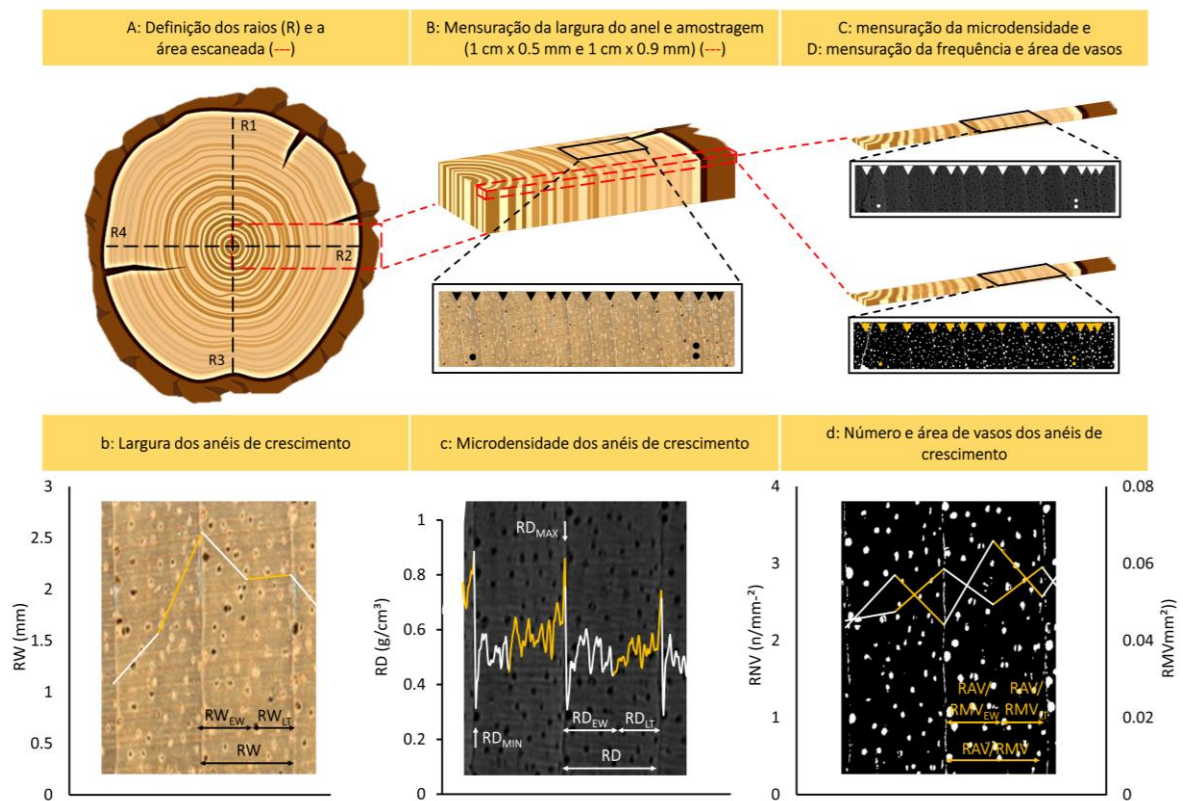
### **ii) Análise da microdensidade dos anéis de crescimento**

Selecionou-se dois a quatro raios, dos 20 discos do lenho coletados em 2013 e 2015, para a análise da microdensidade, pela densitometria de raios X, evitando-se regiões de deformidade do lenho (Schweingruber, 1989). Os discos do lenho foram cortados na marcação dos raios em serra de fita simples, e as subamostras, em dois equipamentos de cortes distintos. Um raio foi cortado, em serra de alta precisão IsoMet® 5000, com 1 cm (largura) x 0,5 mm (espessura) (Figura 2D) (Apêndice A). O restante das amostras foram cortadas em equipamento de serra circular, para obtenção de amostras de 1 cm (largura) x 0.9 mm (espessura) (figure 2C). Todos os raios foram armazenadas em câmara climatizadora (temperatura 20°C; umidade relativa 60%; 12 h)(Quintilhan et al., 2021; Tomazello et al., 2008), para obtenção de imagens de raios X, pelo equipamento Faxitron X-ray LX 60 junto a cunha de acetato de celulose para calibração da densidade. A microdensidade foi mensurada para todas as imagens, seguindo o ângulo do raio, utilizando-se o software Windendro Density 2017a<sup>®</sup> (Régent Instruments Inc.). Todas as amostras do lenho foram mensuradas independente da espessura. Em cada imagem, foi feita a calibração da densidade em função dos valores de pixel, a partir da cunha de calibração, e foi estabelecido um caminho de 2 mm de espessura ao longo do raio, evitando-se possíveis regiões danificadas, para mensuração da densidade. O lenho inicial e lenho tardio foi determinado manualmente, pela variação da densidade intranual, associado com a semiporosidade do anel. A partir da mensuração, obteve-se os seguintes parâmetros: densidade total do anel (RD), densidade do lenho inicial (RD<sub>EW</sub>), do lenho tardio (RD<sub>LW</sub>), densidade mínima (RD<sub>MIN</sub>) e máxima (RD<sub>MAX</sub>). O programa também traz o percentual de lenho inicial (RD<sub>EW%</sub>) e lenho tardio (RD<sub>LW%</sub>), o qual foi utilizado para determinar obter as informações de incremento em largura do lenho inicial (RW<sub>EW</sub>) e lenho tardio (RW<sub>LW</sub>) (figure 2c).

### **iii) Análise quantitativa de área e número de vasos**

Foram selecionados sete das melhores imagens de raios X, obtidas dos raios com 1 cm (largura) x 0.5 mm (espessura), para mensuração da área média (RMV, mm<sup>2</sup>), número de vasos (RNV, n°), densidade de vasos (RNV%, n°/mm<sup>2</sup>) e percentual de área de vasos em relação a área do anel (RAV, %), para o anel total, lenho inicial (EW) e lenho tardio (LW). A utilização de amostras com espessuras reduzidas e corte de precisão, teve por finalidade aumentar o contraste e reduzir o ruído das imagens, que podem ser causados pela dispersão de raios X (Kawamura et al., 2015). A quantificação de área e frequência de vasos foi mensurada pelo software Fiji (Schindelin et al. 2012). Os anéis de crescimento foram vetorizados do ano de 2012 ao ano de 1930, seguindo o caminho determinado pela mensuração de densidade (2 mm de espessura). Em sequência, foi realizada uma segmentação

de imagem com um *threshold* de 8 bits, discriminando automaticamente o lúmen dos vasos do fundo. Nos casos em que a classificação automática não identificou corretamente os vasos, foram feitas correções manuais na imagem. Vasos incompletos que ocorrem no limite do anel foram excluídos da análise, bem como vasos de regiões próximas da medula. A partir das mensurações foi obtida a área e número de vasos do lenho inicial, lenho tardio e total do anel de crescimento em unidade de  $\text{mm}^2$  (Figura 2d). Foi utilizada a determinação do lenho inicial e lenho tardio, definidos anteriormente, na análise de microdensidade.



**Figure 2.** Preparo das amostras do lenho para análise da seção transversal do lenho e mensuração da largura, área dos vasos e microdensidade. A) seção transversal polida e 2-4 raios demarcados em amostras de disco (linhas tracejadas). Linha vermelha indica área escaneada; B) Raio escaneado e mensuração da largura do anel de crescimento. Linha tracejada em vermelho representa a subamostragem para a microdensidade e mensuração de frequência e área dos vasos. C) Imagem de raios X obtida para análise de microdensidade. D) Imagem de raios X obtida para a mensuração dos vasos. b, c, d) variáveis obtidas dos anéis de crescimento.

#### iv) Análises de isótopos estáveis de oxigênio ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$ )

Foram selecionadas seis árvores, coletadas entre 2012 e 2015, e seis árvores coletadas com pressler, em 2021. Do tronco de cada árvore, foi selecionado um raio do lenho que apresentasse anéis de crescimento largos, sem anéis de crescimento faltantes ou anéis casados, para análise de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$ . Dentre as seis árvores coletadas entre 2012 e 2015, duas séries que não apresentavam correlações boas com a série mestre foram selecionadas para verificar possíveis erros de datação através do cross-dating, com os dados de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$ . Os discos do lenho selecionados foram cortados, na seção transversal, em serra circular, para obtenção de amostras com 2 cm de espessura e 1 cm de largura. Todas as amostras foram polidas, utilizando o micrótomo WLS de corte longo (Gärtner & Schweingruber, 2013), para evidenciar os anéis de crescimento. Em seqüência, essas amostras foram escaneadas, em resolução de 1.200 dpi e os anéis de crescimento foram mensurados, com o software

CooRecorder 7.8, conforme a delimitação dos anéis definidos para a cronologia de largura. Essa etapa serviu para auxiliar na identificação dos anéis de crescimento após a extração da holocelulose. Em sequência, todas as amostras foram seccionadas, em dimensões de 1 cm de largura, 0,4 cm de espessura e 5-6 cm de comprimento, em serra circular, e encaminhadas para o Laboratório de Isótopos Estáveis do Instituto de Geociências, da Universidade de São Paulo (LES/IGc/USP).

A extração da holocelulose foi feita seguindo o protocolo Wieloch et al. (2011), adaptado para o LES/IGc/USP, conforme Kagawa et al. (2015) (Apêndice B). As amostras (1 cm x 0,4 cm x 5-6 cm) foram inseridas em caixas de teflon inertes (Figura 1B), as quais foram imersas em hidróxido de sódio (NaOH) por 4 h, trocando a solução a cada 2h. Após 4 h. o material foi lavado em água destilada, para neutralização do pH, e submerso em solução de NaClO<sub>2</sub>, trocando a solução 4 vezes a cada 10h. Em sequência, o material foi lavado com água destilada, secado ao ar livre e cada amostra de holocelulose colocadas em lâminas histológicas, para separação dos anéis em microscópio estereoscópio. Cada anel separado foi colado em eppendorf com água destilada, homogeneizados, congelados (24h) e liofilizados (3 dias), para remoção total da umidade do material. A pesagem foi feita em parceria com o Laboratório de Isótopos Estáveis do CENA/USP e LES/IGc/USP, para a mensuração de 100 ± 10 µg de holocelulose de 100 anéis de crescimento de cada uma das seis árvores (600 anéis de crescimento analisados) amostrados do discos, período de 1905-2014, e 7 anéis de crescimento (42 anéis de crescimento analisados) das amostras de sonad de *pressler*, entre 2013-2020. Os anéis foram separados pesados em microbalança analíticas e embalados em cápsulas de prata, para análise de δ<sup>18</sup>O<sub>TR</sub>, em espectrômetro de massa de setor magnético *Delta Thermo Scientific* com sistemas de extração tipo GasBench, no LES/IGc/USP. A composição de isótopo estável apresentada em valores de δ em partes por mil (‰) em relação ao padrão internacional VSMOW usando a seguinte equação (Sleen et al., 2017):

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}} = \left[ \frac{\left(\frac{18\text{O}}{16\text{O}}\right)_{\text{sample}}}{\left(\frac{18\text{O}}{16\text{O}}\right)_{\text{VSMOW}}} \right] * 1000 \text{ (‰)}$$

### 3.2.4. Construção das cronologias

A cronologia de largura dos anéis de crescimento foi a primeira a ser contruída. O *cross-dating* foi feito, previamente, pelo método visual *skeleton plot* (Stokes & Smiley., 1968) antes de realizar as mensurações da largura dos anéis de crescimento. Posteriormente, o controle de qualidade da datação foi realizado no programa COFECHA (Holmes, 1983), removendo séries e trechos de séries com baixo sinal comum, até atingir valores estatísticos significativos, calculado com base em segmentos com comprimento de 50 anos e 99% de nível de confiança ( $\alpha > 0.3281$ ,  $p\text{-valor} = 0.01$ ) (Grissino-Mayer 2001). Para a obtenção da cronologia mestre, foram calculados os índices da largura dos anéis de crescimento para quantificar a variabilidade do crescimento em escalas interanuais, removendo-se tendências ecológicas causadas pela variação de idade, competição ou distúrbios, pelas metodologias padrão em dendrocronologia (Cook et al., 1990). Antes de realizar o *detrending*, a variância dos dados brutos de largura foi estabilizada aplicando o *power transformation*, para redução de outliers causados por erros de datação, e feita a estabilização da variância (Cook & Peters, 1997). Nos dados estabilizados, aplicou-se uma *spline* de suavização cúbica com 50% de corte de frequência igual a 30% do comprimento da série, e calculado uma *Biweight Robust Mean*, utilizando o programa ARSTAN (Cook, 1985).

A partir da cronologia de largura, foi construído a cronologia de RD, RD<sub>EW</sub>, RD<sub>LW</sub>, RD<sub>MIN</sub> e RD<sub>MAX</sub>. As árvores analisadas têm entre 80 a 100 anos e o período de análise ainda mantém registros das primeiras décadas de vida da planta. As estatísticas de controle de qualidade das séries pelo COFECHA foram utilizadas para remoção de séries de baixo sinal comum com a série média e seleção do período que apresentasse maior sinal comum. As séries de densidade, principalmente a máxima, tendem a apresentar baixa amplitude das tendências ecológicas, resultando em baixa autocorrelação e com frequências interanuais, comparadas as séries de largura (Briffa et al., 2002; Frank & Esper, 2005). Para fins de comparação entre séries, manteve-se a mesma sequência de tratamento de dados anteriormente supracitada, aplicando-se uma *spline* de suavização cúbica com 50% de corte de frequência igual a 30% do comprimento da série (Klusek et al., 2015; Schweingruber et al., 1978), a série mestre foi calculada por uma *Biweight Robust Mean*, utilizando o programa ARSTAN (Cook, 1985). Em sequência, foram construídas as séries cronológicas de RNV, RNV<sub>EW</sub>, RNV<sub>LW</sub>, RMV, RMV<sub>EW</sub>, RMV<sub>LW</sub>, RDV, RDV<sub>EW</sub>, RDV<sub>LW</sub>, RAV, RAV<sub>EW</sub>, RAV<sub>LW</sub>. As séries de área de vasos também apresentam tendências ontogenéticas, relacionadas ao transporte hidráulico da planta nas primeiras décadas de vida da planta, quando as taxas de crescimento são maiores (Carrer et al., 2014, García-González et al., 2016). As árvores analisadas têm entre 80 a 100 anos, sendo que o período de análise ainda mantém registros das primeiras décadas de vida da planta. Dessa forma, seguiu-se com a retirada da tendência, conforme descrito anteriormente.

A série cronológica de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  foi obtida a partir da média aritmética do sinal isotópico de oxigênio correspondente a cada ano das séries individuais analisadas. Para todas as séries, o sinal comum de crescimento entre séries foi mensurado pela correlação entre a séries (R<sub>BAR</sub>) e a confiabilidade amostral da cronologia foi obtida pelo *Expressed Population Signal* (EPS), calculado em função do R<sub>BAR</sub> e a replicação das séries cronológicas por árvore (Speer, 2009; Wigley et al., 1984).

### 3.2.5. Análises estatísticas

#### *Relação entre variáveis estruturais*

Foi analisada a relação das variáveis largura do anel (RW), densidade intra anual e área e número de vasos do anel total, do lenho inicial (EW) e lenho tardio (LW). Foi considerado o percentual de área de lenho inicial e lenho tardio, fornecido pelas análises de densidade feitas no software windendro, para obter os valores de incremento do lenho inicial e lenho tardio. Foi aplicado o teste de *Wilcoxon* pareado para avaliar a diferença estatística entre o lenho inicial e o lenho tardio, a partir dos dados brutos desses parâmetros (Loriaux, 1971), tendo em vista a não normalidade dos dados indicados pelo teste de *Shapiro-Wilk* ( $p < 0.05$ ). Foi feita a normalização dos dados, para deixar todos as variáveis em uma mesma escala, e realizado o teste de esfericidade de Bartlett, para determinar a adequabilidade dos dados para a análise fatorial de componentes principais (PCA) (García-González et al., 2016; Fávero & Belfiore, 2017). Em sequência, foi aplicada a PCA para redução da dimensionalidade da base de dados e evidenciação dos fatores ortogonais das variáveis estruturais. A fim de evitar redundância entre parâmetros com cargas fatoriais similares, as variáveis foram analisadas distinguindo o lenho total do anel, o lenho inicial e o lenho tardio.

### **Relação entre variáveis climáticas regionais e oceânicas**

As cronologias residuais de cada variável estrutural e a série média de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  e as variáveis climáticas ambientais tiveram a normalidade avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk ( $p < 0.05$ ). A relação entre as séries e os dados climáticos foram determinados por um relação de *Pearson*, considerando o ciclo total de crescimento, o período úmido de maior influência no crescimento (Dünisch et al., 2003) e o período de menor precipitação, do ano corrente e o ano anterior ao crescimento. Foram utilizados os dados de precipitação e temperatura do *Climatic Research Unit gridded Time Series* (CRU TS 4.04 0.5°, período 1901-2019), disponíveis na plataforma KNMI (Royal Netherlands Meteorological Institute, <http://climexp.knmi.nl>) (Mitchell & Jones, 2005). Tendo em vista que a difusão de estações meteorológicas na Amazônia somente ocorreu nos últimos 70 anos e estão sujeitas a um significativo número de registros incertos, durante os primeiros anos de observação (Granato-Souza et al., 2020), os dados de precipitação e temperatura do CRU TS foram comparados com os dados meteorológicos disponíveis nas estações meteorológicas mais próximas da área de estudo e que apresentassem ao menos 30 anos de série de precipitação e temperatura, obtidos no banco de dados meteorológico do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e os dados disponíveis no Portal HidroWeb da Agência Nacional da Água (ANA) (Apêndice C).

A fim de avaliar a possível região de *rainout* de  $\delta^{18}\text{O}$  durante o transporte de umidade até o local de estudo, foram calculadas as trajetórias de massas de ar usando modelo HYSPLIT (Draxler, 1992) para três alturas (2.000 m, 3.000 m e 4.000 m), de 2000 a 2018 (Cintra et al., 2021, Baker et al. 2016). Em sequência, foi calculado o acúmulo da precipitação ao longo de todas as trajetórias de massa de ar para os dias com precipitação acima de 0 mm. Foi feita a precipitação acumulada média de 3 meses ao longo de todas as trajetórias por ano, para comparar com a série temporal de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$ , por uma relação de *Pearson*.

A relação com as variáveis globais foram definidas com base nas correlações entre as séries cronológicas e os dados de reconstrução espacial da temperatura superficial do oceano SST, disponível no *National Center of Environmental Information* (Reynolds and Smith, 1994). Foi testada a associação entre as séries cronológicas dos parâmetros dos anéis de crescimento com o El Niño Oscilação Sul (El Niño 3.4) e variáveis oceânicas SST do tropical atlântico sul (TSA) e tropical atlântico norte (TNA), disponíveis no *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), período de 1950 a 2020. Todas as análises foram conduzidas no software RStudio e a montagem dos gráficos no OriginLab.

### **Relação com outras cronologias e caracterização dos anos extremos**

A série cronológica de RW foi comparada com as cronologias BRA001 (Granato-Souza et al., 2019) e BRA003 (Granato-Souza et al., 2020). São cronologias de referência para a Amazônia oriental, localizadas a aproximadamente 300 km da Flona Tapajós, e contempla 231 anos de extensão. Foi aplicada uma correlação de *Pearson* em dez anos deslocando a cada um ano, a fim de verificar períodos de semelhança entre séries cronológicas e anos de impacto regional. Foi utilizada a função *pointer*, do pacote *dplR* (Bunn & Korpela, 2019), para destacar os anos da cronologia RW que apresentaram variação maior que 10% do ano anterior para o ano presente (Becker et al., 1994). Identificados os anos, os mesmos foram avaliados nas cronologias de RD, RAV e  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  para verificar o sinal desses parâmetros em anos extremos da bacia amazônica e da região do nordeste brasileiro (Espinoza et al., 2019; Marengo et al., 2020).

### 3.3. RESULTADOS

#### 3.3.1. Séries cronológicas dos anéis de crescimento

Foram analisados os anéis de crescimento de 52 árvores de *Cedrela odorata* amostradas na Floresta Nacional do Tapajós, por técnicas dendrocronológicas (Tabela 01). As amostras apresentaram anéis de crescimento bem definidos e delimitados por parênquima marginal, associados a vasos semi-porosos. Um total de 77 raios foram datados e mensurados de 23 árvores para a construção da cronologia de largura, datada de 1840 a 2020 anos (RBAR = 0,241, EPS = 0.89)(Figura 3). Os valores estatísticos de RBAR e EPS indicam replicação adequada e bom sinal comum entre séries (Wigley et al., 1984). Todas as árvores foram passíveis de datação, no entanto, discos que apresentavam deformação no lenho, causada por raízes tuberosas ou injúrias, e baquetas com podridão de cerne foram excluídas, como também, séries de curta extensão, para evitar ruídos ecológicos e ontogenéticos.

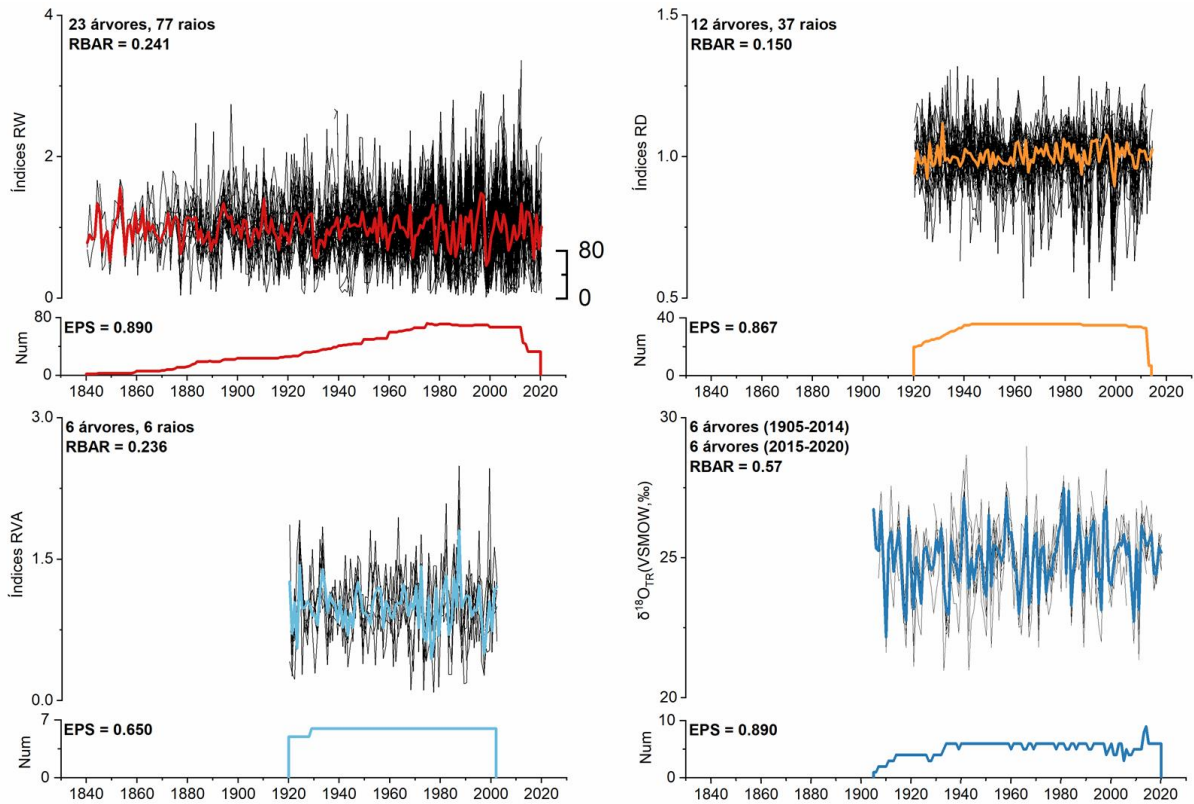
As cronologias de densidade total do anel (RD), do lenho inicial (RD<sub>EW</sub>), lenho tardio (RD<sub>LW</sub>) máxima (RD<sub>MAX</sub>), mínima (RD<sub>MIN</sub>) foram testadas a partir da mensuração de densidade de 47 raios de 20 árvores, para o período de 1840 a 2014. No entanto, a avaliação do sinal comum e representatividade não se mostrou satisfatória. Dessa forma, foram selecionados 37 raios de 12 árvores que apresentavam maior sinal comum, a partir de 1920 a 2014, período em que o sinal comum e a representatividade amostral ficaram maiores (Tabela 01). Quando as amostras são restritas a sete raios, as cronologias dos parâmetros de número e área dos vasos apresentaram valores estatísticos de RBAR e EPS inferiores aos dois parâmetros anteriores. Enquanto que os parâmetros de número de vasos indicaram sinais entre séries semelhantes a cronologia de RW (Tabela 1). Foi removido uma série de cada variável a fim de aumentar o sinal comum entre séries trabalhadas, ficando um raio de seis árvores.

A variação interanual do  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  das seis séries individuais apresentaram forte sinal comum, conforme indicado pela média de todas as correlações entre cada série ( $r = 0,57$ ) e o sinal populacional expresso (EPS = 0,89) para o período de 1905 a 2020. Não foi necessário ajustes na datação dos raios selecionados para análise de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$ , conforme sugerido no item 2.2.3.

**Tabela 1.** Estatísticas resumidas da largura do anel, densidade inter anual, área e número de vasos e valores isotópico de *Cedrela odorata*. Largura do anel de crescimento (RW, mm), densidade total do anel (RD, g/cm<sup>3</sup>), densidade mínima (RDMIN, g/cm<sup>3</sup>), máxima (RDMAX, g/cm<sup>3</sup>), mensuração da área média (RMV, mm<sup>2</sup>), número de vasos (RNV, n°), densidade de vasos (RNV%, n°/mm<sup>2</sup>) e percentual de área de vasos em relação a área do anel (RAV, %); lenho inicial (EW) e lenho tardio (LW). Sinal isotópico de oxigênio ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$ ). (\*seis árvores, período de 1905-2014, e seis árvores, entre 2013-2020).

| Parâmetros dos anéis de crescimento         | N° arv (raios) | Período (anos)  | Valores medianos (Máx) | RBAR  | EPS   |
|---|----------------|-----------------|------------------------|-------|-------|
| RW (mm)                                     | 23 (77)        | 2020-1840 (181) | 2.07 (24.19)           | 0.241 | 0.89  |
| $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$ (VSMOW,‰) | 6 (6)*         | 2020-1905 (116) | 24.97 (28.98)          | 0.57  | 0.89  |
| RD (g/cm <sup>3</sup> )                     | 12 (37)        | 2014-1920 (95)  | 0.46 (0.93)            | 0.15  | 0.867 |
| RD <sub>EW</sub> (g/cm <sup>3</sup> )       | 12 (37)        | 2014-1920 (95)  | 0.43 (1.02)            | 0.07  | 0.757 |
| RD <sub>LW</sub> (g/cm <sup>3</sup> )       | 12 (37)        | 2014-1920 (95)  | 0.53 (1.10)            | 0.07  | 0.749 |
| RD <sub>MIN</sub> (g/cm <sup>3</sup> )      | 12 (37)        | 2014-1920 (95)  | 0.34 (1.04)            | 0.015 | 0.368 |
| RD <sub>MAX</sub> (g/cm <sup>3</sup> )      | 12 (37)        | 2014-1920 (95)  | 0.60 (1.25)            | 0.07  | 0.76  |
| RMV (mm <sup>2</sup> )                      | 6 (6)          | 2012-1930 (83)  | 0.05 (0.17)            | 0.04  | 0.203 |
| RMV <sub>EW</sub> (mm <sup>2</sup> )        | 6 (6)          | 2012-1930 (83)  | 0.03 (0.12)            | 0.045 | 0.22  |
| RMV <sub>LW</sub> (mm <sup>2</sup> )        | 6 (6)          | 2012-1930 (83)  | 0.02 (0.11)            | 0.05  | 0.282 |
| RNV (n°)                                    | 6 (6)          | 2012-1930 (83)  | 9 (37)                 | 0.236 | 0.65  |
| RNV <sub>EW</sub> (n°)                      | 6 (6)          | 2012-1930 (83)  | 5 (35)                 | 0.155 | 0.525 |
| RNV <sub>LW</sub> (n°)                      | 6 (6)          | 2012-1930 (83)  | 3 (28)                 | 0.218 | 0.626 |
| RAV% (%)                                    | 6 (6)          | 2012-1930 (83)  | 0.06 (0.54)            | 0.071 | 0.315 |
| RAV <sub>EW</sub> % (%)                     | 6 (6)          | 2012-1930 (83)  | 0.06 (1.00)            | 0.103 | 0.408 |
| RAV <sub>LW</sub> % (%)                     | 6 (6)          | 2012-1930 (83)  | 0.04 (1.08)            | 0.114 | 0.437 |
| RDV (n°/mm <sup>2</sup> )                   | 6 (6)          | 2012-1930 (83)  | 2.00 (45.75)           | 0.102 | 0.406 |
| RDV <sub>EW</sub> (n°/mm <sup>2</sup> )     | 6 (6)          | 2012-1930 (83)  | 2.05 (21.74)           | 0.127 | 0.468 |
| RDV <sub>LW</sub> (n°/mm <sup>2</sup> )     | 6 (6)          | 2012-1930 (83)  | 2.00 (32.26)           | 0.176 | 0.562 |

A relação entre as variáveis climáticas e as cronologias dos parâmetros dos anéis de crescimento foi determinada para as cronologias residuais de RW, RD, RNV e série média de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  (Figura 3), tendo em vista as estatísticas da cronologia e resposta dos parâmetros às variáveis climáticas (Figura 4), nas análises subsequentes. A relação entre séries pode ser verificada no apêndice D.

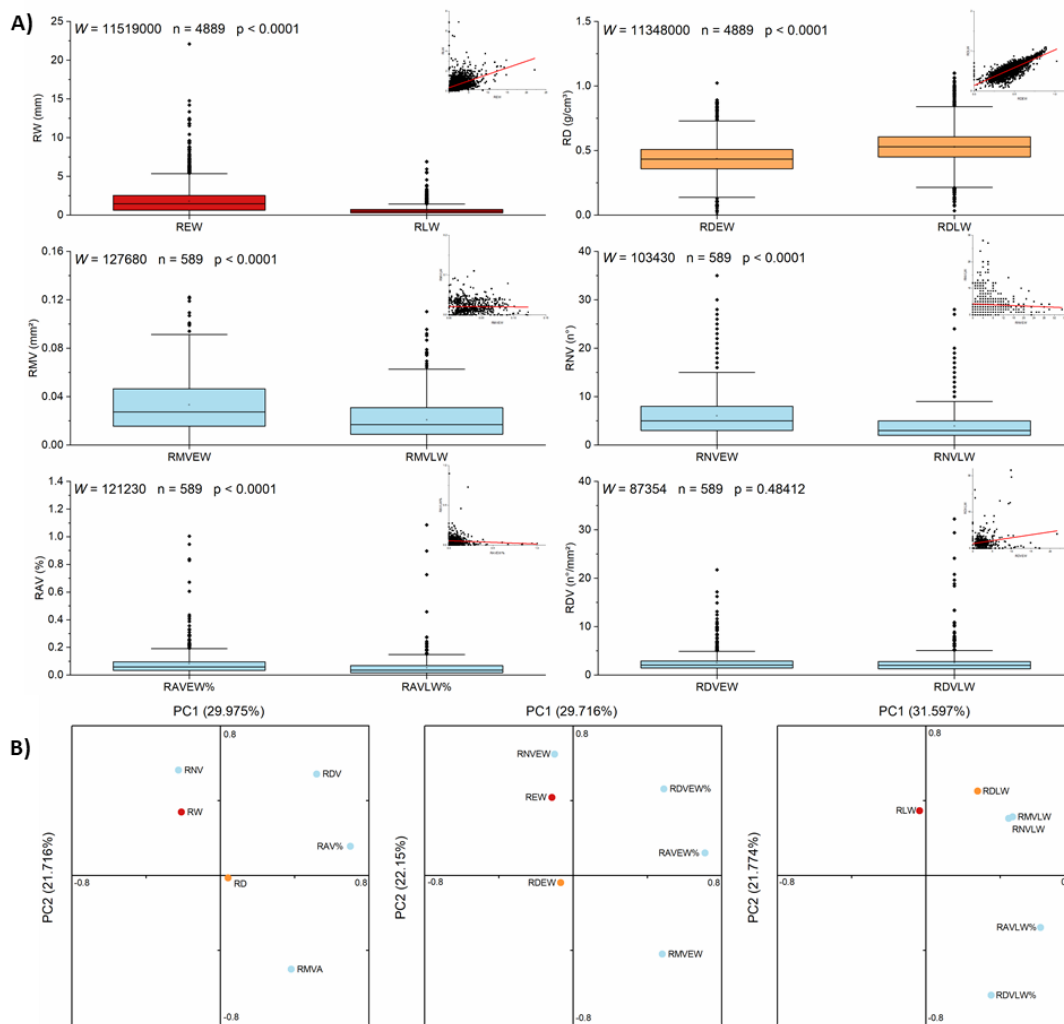


**Figure 3.** Séries cronológicas dos parâmetros dos anéis de crescimento de *Cedrela odorata*, selecionadas para correlação com as variáveis climáticas. Largura do anel (RW), densidade total do anel (RD), número de vasos (RNV), sinal isotópico de oxigênio ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$ ).

### 3.3.2. Relação entre os parâmetros estruturais dos anéis de crescimento

Avaliando os parâmetros estruturais, o teste de Wilcoxon pareado mostrou diferenças significativas entre o lenho inicial e lenho tardio para RW, RD, RMV, RNV e RAV% (Figura 3A). Há a indicativa da redução do incremento em largura, área média de vasos, número de vasos e ocupação de área de vasos por  $\text{mm}^2$ , e um aumento da densidade, do lenho inicial para o lenho tardio. Não foi observada diferença significativa no número dos vasos por  $\text{mm}^2$  do lenho inicial e lenho tardio. A variância explicada nos dois componentes principais da PCA foi de 51,691%, para o lenho total, 51,886%, para o lenho inicial e 53,371%, para o lenho tardio. Essa análise evidencia uma relação próxima entre a largura do anel total e do lenho inicial com o número de vasos, enquanto que a densidade e área média de vasos apresenta uma relação inversa à largura, durante o período de crescimento. No lenho tardio, a densidade apresenta um peso maior e indica uma relação próxima ao número de área de vasos, porém quando analisados esses parâmetros dos vasos por  $\text{mm}^2$ , observa-se uma relação inversa.





**Figure 4.** Boxplot dos diferentes parâmetros obtidos do lenho inicial e lenho tardio, apresentando o teste não paramétrico de Wilcoxon pareado ( $p < 0.05$ ), para comparação entre as medianas (A). Biplot da análise de componente principal dos parâmetros dos anéis de crescimento, para o lenho total, lenho inicial e lenho tardio. Parâmetros dos anéis de crescimento: largura do anel de crescimento (RW, mm), densidade total do anel (RD, g/cm³), densidade mínima (RDMIN, g/cm³), máxima (RDMAX, g/cm³), mensuração da área média (RMV, mm²), número de vasos (RNV, n°), densidade de vasos (RNV%, n°/mm²) e percentual de área de vasos em relação a área do anel (RAV, %); lenho inicial (EW) e lenho tardio (LW).

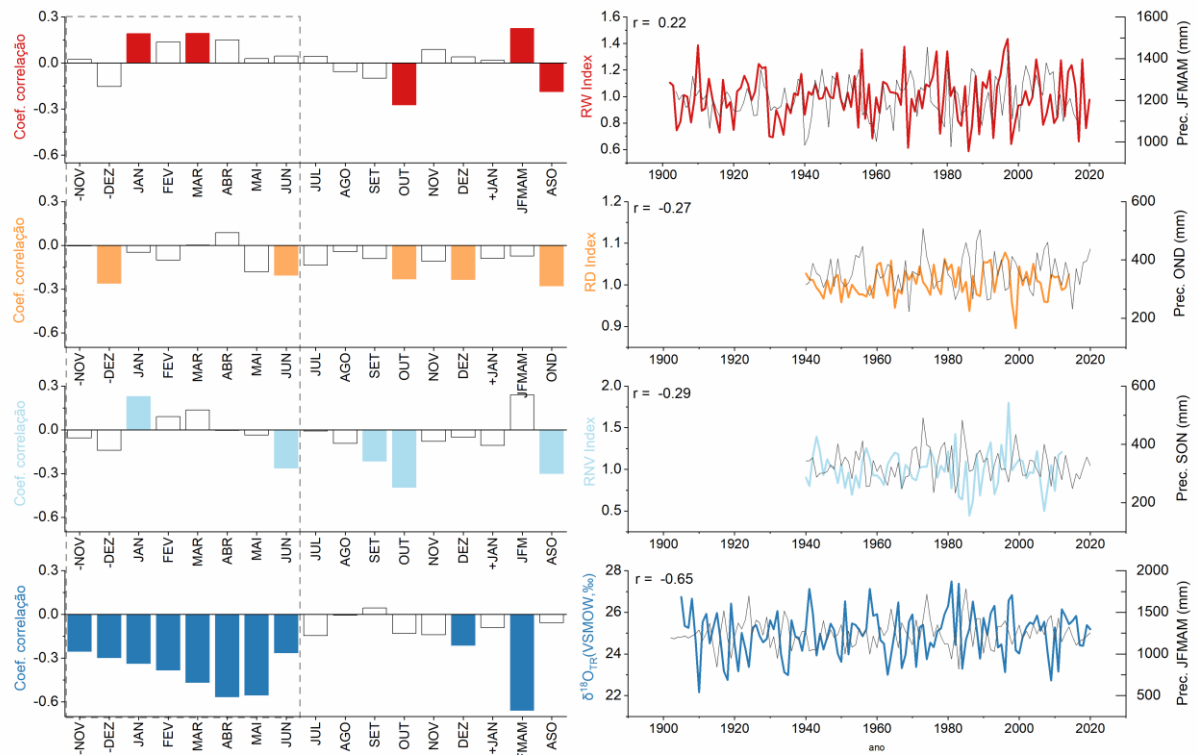
### 3.3.3. Relação entre as cronologias e as variáveis climáticas regionais

#### *Séries cronológicas e as variáveis climáticas regionais*

A precipitação mostrou-se a principal variável climática que influencia os parâmetros estruturais da *Cedrela odorata*, na Amazônia oriental (Figura 4). A cronologia de RW indicou correlações positivas ( $r = 0.22$ ,  $p < 0,05$ ) para o período de janeiro a maio e correlações negativas para os meses de agosto a outubro ( $r = -0.18$ ,  $p < 0,05$ ) do ano presente. A cronologia de RD indicou correlações negativas ( $r = -0.27$ ,  $p < 0,01$ ), associadas aos meses de outubro a dezembro do ano presente, como também mostrou correlações negativas à precipitação de dezembro do ano anterior ( $r = -0.26$ ,  $p < 0.05$ ). A cronologia de RNV apresentou sinais semelhantes a cronologia

de largura, com correlações negativa e significativas com o período de agosto a outubro do ano presente ( $r = -0,29$ ,  $p < 0,01$ ). Não foram observadas correlações significativas entre a temperatura e as variáveis estruturais.

As análises de correlação entre as variáveis climáticas e  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  indicaram uma associação com a variabilidade climática da região norte do nordeste brasileiro e pouca extensão com a variabilidade climática da bacia amazônica (Figura 5B). Foi observada uma forte correlação negativa entre a precipitação dos meses úmidos ( $r = -0,65$ ,  $p < 0,001$ ), destacando-se os meses de março a maio como principal pico de correlação ( $r = -0,63$ ,  $p < 0,001$ ) (Figura 4). Essa associação também é evidente em correlações espaciais e pela correlação entre as séries de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  e a precipitação acumulada das trajetórias de massas de ar ( $r = -0,87$ ,  $p < 0,001$ ) (Figura 5B). A temperatura não apresentou correlações significativas com a série de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  para o ano presente.



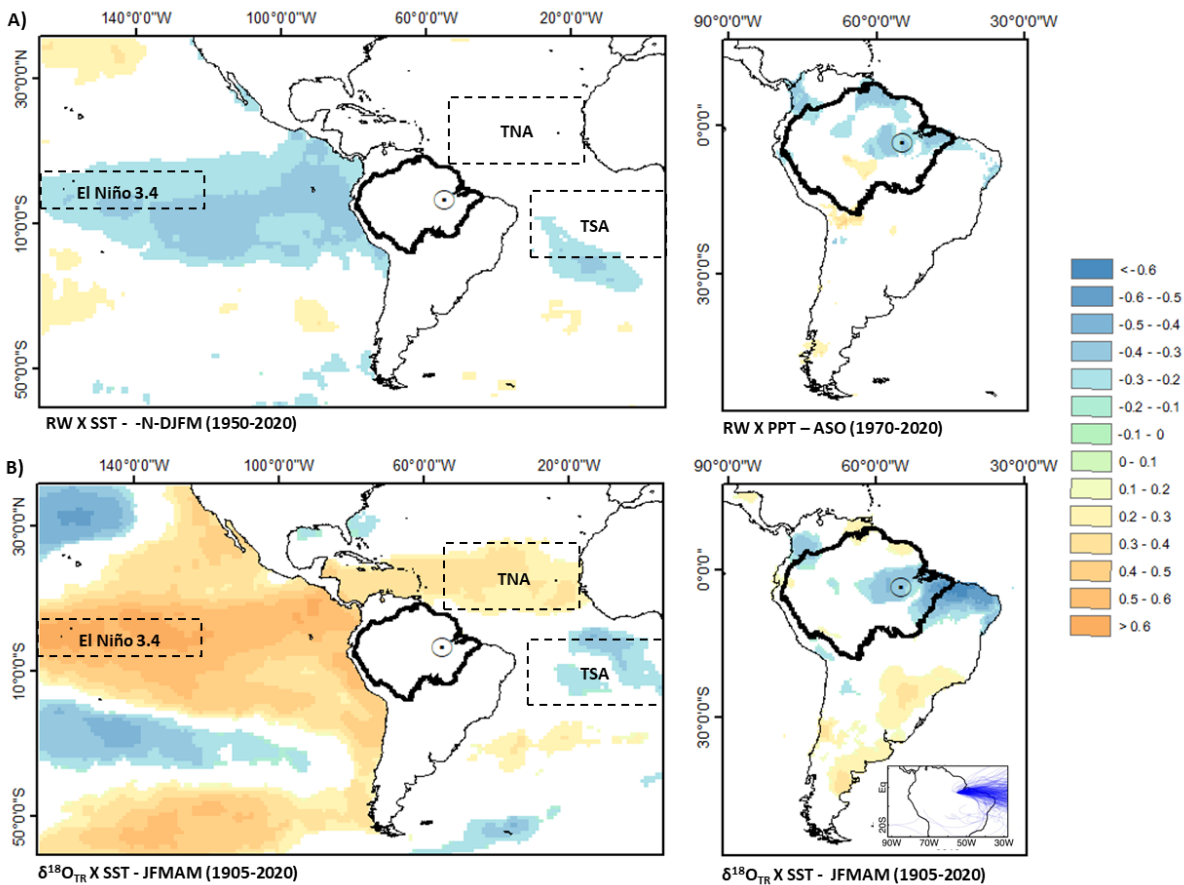
**Figure 5.** Correlação mensal entre os índices de RW, RD, RNV e valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  com a precipitação mensal do CRU TS 4.04 0.5°(Lat: 10° a -5°N, long: -65° a -45°, período: 1902-2020 e 1940-2012/2014), disponíveis na plataforma KNMI (Mitchell & Jones, 2005). Anos prévios são indicados pelo símbolo (-) e anos subsequentes por (+). Anos com correlações significativas ( $p < 0,05$ ) são indicados pelo preenchimento das cores nos gráficos de barra (esquerda). Região das linhas tracejadas, indicam período da chuva na região. Gráficos de linhas (direita) indicando os meses de maior precipitação com as cronologias.

### 3.3.4. Relação entre as cronologias e variáveis oceânicas

#### Séries cronológicas e as variáveis oceânicas

A variação interanual da cronologia de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  se mostrou a mais sensível às anomalias do SST. Esta indicou correlações positivas com o ENSO (El Niño 3.4) (dezembro prévio a abril presente,  $r = 0,60$ ,  $p < 0,001$ ) e um dipolo entre as anomalias do Atlântico tropical norte e sul, indicando correlações positivas com o TNA (março a maio presente,  $r = 0,40$ ,  $p < 0,001$ ) e negativas com o TSA (março a maio presente,  $r = -0,35$ ,  $p < 0,001$ ) do ano corrente.

As cronologias dos parâmetros estruturais dos anéis de crescimento não apresentaram grande sensibilidade às variáveis globais. A cronologia de RW foi negativamente relacionada com a região do El Niño 3.4 durante o mês de novembro do ano prévio a março do ano corrente ( $r = -0.25$ ,  $p < 0.05$ , Figura 5A), enquanto que a cronologia de número de vasos indicou correlações negativas com as anomalias do TSA, no período seco (junho a setembro presente,  $r = -0.251$ ,  $p < 0.05$ ). Não foram observadas relações com as anomalias do TNA com os parâmetros estruturais dos anéis de crescimento.

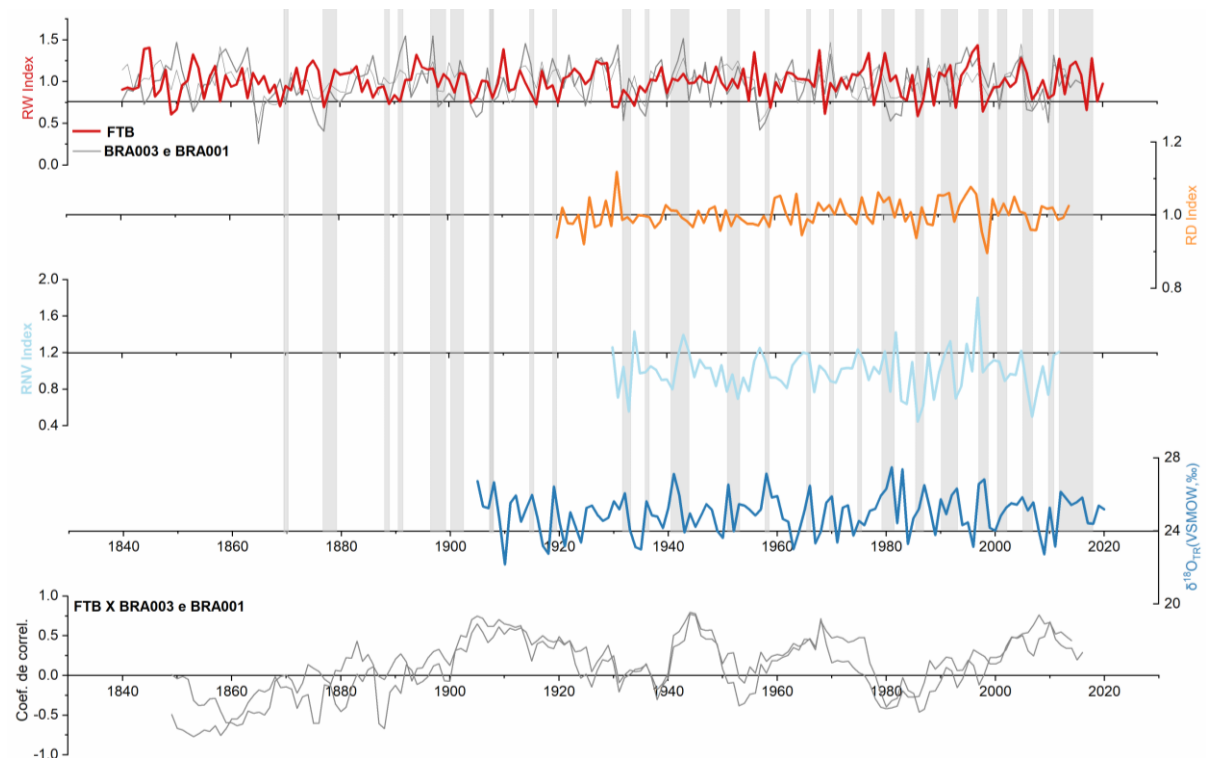


**Figure 6.** Correlação espacial entre os meses de temperatura da superfície do oceano Pacífico e oceano Atlântico (SST) com a série de RW (A) e  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  (B) de *C. odorata* (esquerda) e os meses de maior correlação com a precipitação (direita). Reconstrução do SST (grid 0.25°) por interpolação disponível no National Center of Environmental Information (Reynolds and Smith, 1994). Resultados apresentados para os meses de maior correlação com a precipitação (janeiro a maio). Correlação indicada no mapa ( $p < 0.05$ ). Mapa de precipitação acumulada ao longo das trajetórias de umidade do local de amostragem (Baker et al., 2016; Cintra et al., 2021), indicado no canto inferior direito.

### Séries cronológicas x sinal de anos extremos

A cronologia RW indicou períodos com sinais semelhantes às cronologias BRA001 e BRA003 (Figura 6). A cronologia RW indica cerca de 55 anos com variação negativa e 66 anos com variação positiva, acima de 10% comparado ao ano anterior. Dentre esses anos, a RW da FTB indica 20 anos com índices negativos e 23 com índices positivos, comparáveis a BRA001. Enquanto que com a BRA003, indica 26 anos com índices negativos e 32 anos com índices positivos semelhantes. Entre os anos com baixo índice identificado nas três cronologias destacam-se: 1865, 1898, 1904, 1908, 1911, 1916, 1918, 1940, 1944, 1957, 1971, 1981, 1998 e 2006. Comparando a RW com os anos de extrema seca na bacia Amazônica e na região do nordeste brasileiro, observa-se que a RW responde a

85,7% (24 de 28) das secas registradas na região do nordeste brasileiro, entre 1840 a 2020 (Figura 6). Entre 1900 a 2020, a RW responde a 38,4% (5 de 13) das secas na bacia amazônica. Essa resposta é reforçada pela cronologia de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$ , a qual caracteriza os anos supracitados, com picos de valores  $\delta^{18}\text{O}$ , em 90% (20 de 22) dos anos secos entre 1905 a 2020. Verifica-se, no entanto, que a cronologia de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  apresenta uma resposta ao ano de início de ocorrência da seca, enquanto que a cronologia de RW resulta em uma resposta no crescimento em largura no ano seguinte. As cronologias de RD e RVN têm uma resposta bastante variada de um ano para o outro, no entanto, observa-se que o sinal dessas duas cronologias se tornam mais fortemente correlacionadas ao sinal da cronologia de RW, a partir de 1980 (Apêndice D).



**Figure 7.** Indicação dos anos extremos identificados na cronologia RW (FTB) e seus respectivos sinais nas cronologias de RD, RVA e  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$ . Faixas em cinza indicam eventos climáticos de extrema seca ocorridos no nordeste brasileiro e na região da Amazônia. FTB x BRA003 e BRA001 indica a correlação móvel entre a cronologia de largura (FTB) da Flota Paru (BRA001 e BRA003, Granato-Souza et al. 2019, 2020). Anos de extrema seca nordeste brasileiro identificados na RW: 1844-1845, 1877-1879, 1888-1889, 1897-1899, 1900, 1902-1903, 1907, 1915, 1919, 1932-1933, 1941-1944, 1951-1953, 1958, 1970, 1979-1981, 1983-1983, 1986-1987, 1990-1993, 1997-1998, 2001-2002, 2005-2007, 2010, 2012-2018. Anos de extrema seca bacia amazônica: 1979-1981, 1983-1983, 1986-1987, 1990-1993, 1997-1998, 2001-2002, 2005-2007, 2005-2007 e 2010.

### 3.4. Discussão

#### *Qualidade das cronologias e precisão das mensurações*

Os padrões anatômicos dos anéis de crescimento da *Cedrela odorata*, da região oriental da Amazônia, apresentaram potencial para a codatação pela largura dos anéis de crescimento, assim como descrito para outras populações de *Cedrela* estudadas no bioma Amazônico (Dunisch et al 2003, 2005, Brienen et al. 2005, 2012, Espinoza

et al 2014, Inga & del Valle 2017, Layme-Huaman et al. 2018, Granato-Souza et al. 2019, 2020). O gênero *Cedrela* comumente apresenta anéis de crescimento casados, ausente ou canais traumáticos, que podem dificultar a datação (Dünisch et al., 2002; Tomazello Filho et al., 2000; Lobão, 2011). A amostragem de discos do lenho da base do tronco possibilitou a avaliação e segura identificação dos padrões anatômicos dos anéis de crescimento para datação (Fichtler, 2017), enquanto que a complementação por amostragem não destrutiva, acima de 1,3 m (Caetano-Andrade et al., 2021), possibilitou filtrar as árvores que apresentassem sinal comum entre séries, conforme sugerido por Granto-Souza et al. (2019). O sinal comum entre séries (RBAR) está dentro do esperado para o gênero no bioma (vide capítulo 1, tabela 2). Foi necessário um número amostral de 20 a 40 árvores, indicado por Cook (1985) e Fritts & Swetnam (1989), para identificar árvores com sinal climático comum e que atinjam um mínimo de 85% de representatividade da população (EPS) (Wigley et al., 1984).

Na *Cedrela*, as faixas de parênquima marginal associadas a vasos de maior diâmetro são destacadas em imagens de raios X, caracterizando visualmente o limite do anel por zonas de baixa densidade (Tomazello-filho et al. 2008, Albuquerque et al., 2016). Essa característica resulta em uma queda abrupta da densidade no início da formação do lenho, seguido de um aumento gradual da densidade até o lenho tardio (Albuquerque et al., 2016). Essa característica auxilia na identificação de anéis de crescimento casados ou ausentes, como também na mensuração assertiva da densidade intranual do anel de crescimento (Anexo, fig.4). Quando a série de largura dos anéis de crescimento é subamostrada, para a construção da cronologia de densidade, verifica-se que o sinal comum é reduzido para 53% (12 de 23 árvores da RW) das árvores que compõem a cronologia RW. Na literatura, são muitos os estudos que demonstram a aplicação da densidade máxima em coníferas e outras espécies temperadas (Conkey, 1979; Briffa et al., 2002, 2004; Allen et al., 2012; Björklund et al., 2013; Kłusek et al., 2015). Esses estudos indicam bom sinal comum entre árvores, considerando poucas amostras (ex. seis árvores, Allen et al., 2012), como também amostras vivas e fossilizadas (ex. 155 árvores, Kłusek et al., 2015). No entanto, em angiospermas, a densidade ainda foi pouco estudada, tendo em vista a complexa relação entre parênquima e vasos (Worbes, 2002). A relação entre o tecido parenquimático e o volume vazio dos vasos com a densidade tende a variar ao longo do perfil intra anual do anel de crescimento (De Mil et al., 2018). Na floresta Amazônica, o estudo mais recente com densitometria de raios X traz uma cronologia de densidade com 32 árvores (2 raios), sem a retirada da tendência, indicando valores semelhantes de EPS e RBAR para a densidade do lenho tardio (Gonçalves et al., 2021).

A área dos vasos mostrou-se bem definida nas imagens de raios X, independente da espessura da amostra. No entanto, amostras com espessuras menores aumentam o contraste e reduzem o ruído das imagens, que podem ser causadas pela dispersão de raios X, deixando a área do vaso bem definida para classificação automática (Kawamura et al., 2015). A classificação automática é um método bastante frequente para construção de cronologias de vasos (Fonti & García-González, 2004; Kames et al., 2016; Pritzkow et al., 2016; Souto-Herrero et al., 2017). Nos vasos semi-porosos da *Cedrela odorata*, a classificação por imagens de raios X da mesma forma se mostrou aplicável, identificando vasos acima de 0.01 mm<sup>2</sup>, indicados para avaliações climáticas (Fonti et al., 2007; García-González & Fonti, 2008). Em relação a qualidade estatística, os seis raios utilizados não foram suficientes para atingir um bom sinal comum e representatividade amostral para todos os parâmetros utilizados, conforme verificado em outros estudos em espécies tropicais e subtropicais (Islam et al., 2018; Locosselli et al.,

2013; Pandey et al., 2018). Isso se deve a menor variabilidade interanual que esses parâmetros têm em relação à largura do anel de árvore, mas que são aceitáveis para análises dendrocronológicas (García-González et al., 2016). Entretanto, a subamostragem foi suficiente para identificar um sinal comum entre séries para o número de vasos do anel, com valores próximos as estatísticas da cronologia de RW. Conforme García-González & Fonti (2008), a utilização de dois raios representativos da mesma árvore pode aumentar o sinal, no entanto, devido a alta coerência entre raios o mesmo sinal climático poderá ser observado.

A cronologia de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  dos anéis de crescimento de *C. odorata* apresentou uma alta correlação significativa entre séries, indicando um forte sinal comum e representatividade da população (Fritts, 1976; Wigley et al., 1984). Os valores de RBAR e EPS assemelham-se a outros estudos com isótopos de oxigênio em anéis de crescimento de *C. odorata* na floresta Amazônica (Brienen et al., 2012; Volland et al., 2016; Baker et al., 2016), como também a outras localidades do neotrópico (Pagotto et al., 2021). Assim como a largura dos anéis de crescimento, o  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  também se mostra um parâmetro adequado para a codatação da espécie na região da amazônia oriental, podendo ser um auxílio para identificação dos anéis falsos e anéis de crescimento faltantes característicos da espécie (Brienen, et al., 2012). O forte sinal entre séries indica que as árvores analisadas tem o sinal de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  controlados pelos mesmos fatores climáticos, relacionados ao *rainout* durante o transporte de umidade até a área de estudo, como também a variação interanual na circulação atmosférica (Baker et al., 2016).

#### **Associação entre os parâmetros estruturais**

É observado um aumento da densidade da madeira ao longo do incremento do anel de crescimento, associado à redução da área e número de vasos. Da mesma forma que o decréscimo na densidade é observado com o aumento do “*volume vazio*” relacionado a área útil de condutividade hidráulica dos vasos (Lachenbruch & Mcculloh, 2014; Poorter et al., 2010), quando avaliada a relação do lenho inicial e lenho tardio. A atividade cambial de espécies tropicais é bastante associada com a formação de parênquima e área de vasos, o quais influenciam, em geral, de forma negativa o perfil de densidade (De Mil et al., 2018; Poorter et al., 2010). Espécies tropicais têm o período de dormência restrito a poucos meses (Brienen et al., 2016), isso faz com que mais de 70% do anel de crescimento da *Cedrela odorata*, na Amazônia oriental, seja lenho inicial, onde se concentram bandas de parênquima e vasos de maior diâmetro (Dunisch et al. 2002). Esses elementos estão associados à ampliação da condutividade hidráulica da planta e as reservas nutricionais para ativação do câmbio, no início da formação do anel de crescimento (Ewers & Carlquist, 1990). Esses elementos contribuem para valores de densidade menores durante a atividade cambial. Dessa forma, o percentual de lenho tardio indica uma relação positiva com a densidade do lenho tardio, quando há um decréscimo no número e área dos vasos. Isso pode estar diretamente associado à resposta da espécie a precipitação, a qual promove a expansão foliar, incremento radial e menor densidade do alburno durante a fase ativa do lenho (Mendivelso et al., 2016).

A PCA evidencia que não há uma relação clara entre os parâmetros, a variação na densidade do lenho total e lenho inicial tem um peso baixo no primeiro e segundo componente. Essa característica é bastante visualizada em estudos que avaliam elementos anatômicos do lenho de espécies tropicais (Poorter et al., 2010; Pandey et al., 2018). A relação entre a largura e área e número de vasos reflete bem o método amostral utilizado para a mensuração dos parâmetros dos vasos. O número de vasos está sujeito à variabilidade da largura do anel,

ou seja, quanto maior a largura do anel, maior o número de vasos contado. O mesmo para densidade e percentual de área de vasos, o qual traz em sua medida as incertezas relacionadas a definição do lenho inicial e lenho tardio (García-González et al., 2016).

### ***Cronologias de Cedrela odorata respondem à precipitação regional***

O incremento em largura da *Cedrela odorata* correlaciona-se com a precipitação do período úmido, principalmente no período de maior concentração de chuvas (JFMAM) e excedente de água do balanço hídrico do solo. Da mesma forma, apresenta resposta negativa ao período de menor precipitação (ASO), correspondente ao período de deficiência e retirada de água do solo. Essa resposta a precipitação também foi observada em outros estudos dendrocronológicos com *Cedrela* na região da Amazônia (Dünisch et al., 2003; Brienen & Zuidema, 2005; Layme-Huaman et al. 2009; Granato-Souza et al., 2019, 2020; Paredes-Villanueva et al., 2016). O número de vasos, por apresentar uma próxima relação ortogonal com largura do anéis de crescimento (Figura 4), apresenta respostas semelhantes ao incremento em largura, respondendo com mais intensidade ao período seco (ASO), como também ao período de transição entre o período úmido para o seco (Junho). Além de indicar correlações positivas com o mês de janeiro, quando começa o período de excedente de água no solo. A densidade não teve correlações positivas com a precipitação, somente indicou correlações negativas concentradas principalmente nos meses de OND do ano presente e correlações negativas com dezembro do ano anterior.

Na região de Belterra, Santarém, a *Cedrela odorata* apresenta intensa atividade celular entre os meses de janeiro a abril, reduzindo-se a divisão celular até o período de dormência cambial. A inatividade cambial é restrita a poucos meses, entre setembro a outubro, podendo se estender até janeiro do ano subsequente em anos de baixa reposição de água no solo do ano anterior ao início do crescimento (ex. 1997-1998, prec. < 1.000 mm/ano, Dünisch et al., 2002, 2003). Esses períodos, relacionam-se com a fenologia da *Cedrela* na região do Pará, a qual indica a floração nos meses de maior precipitação (março a abril) a frutificação entre os meses de transição do período úmido para seco (maio a novembro), e a dispersão nos meses de baixa precipitação (setembro a novembro) (Carvalho, 1980, Mekdece et al. 2013). Ao final do período de dormência, estudos relatam que a *Cedrela*, em florestas tropicais e subtropicais, reduz a área do lúme dos vasos e produz uma aumento na concentração de fibras (Dünisch et al., 2002; Marcati et al., 2006). Isso reforça a relação entre lenho inicial e lenho tardio observada na figura 4. A formação dos vasos no lenho inicial depende das reservas de carbono armazenadas durante o verão anterior (Pandey et al., 2018), dessa forma, a produção dos vasos ocorrentes nos primeiros meses de chuva seria induzido pela reativação da divisão celular (Dünisch et al., 2002, 2003), a fim de proporcionar condições para condutividade hidráulica, nos meses subsequentes (Zimmermann 1983). A formação do parênquima marginal da *Cedrela* pode ser terminal, ocorrendo no final do período de dormência, e/ou inicial, formando-se no início do lenho inicial. Conforme mencionado anteriormente, o tecido parenquimático e a área de lúme tem influência negativa na densidade, explicando a resposta da cronologia de RD ao período entre OND.

A resposta à precipitação regional é reforçada pela cronologia de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$ , a qual reflete o efeito *rainout upstream* que vem da região norte do nordeste brasileiro. A forte relação inversa entre a quantidade de precipitação com os dados de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  reforçam o efeito da precipitação no sinal isotópico de oxigênio nos anéis de crescimento da *C. odorata* da Amazônia oriental. Assim como destaca o potencial das árvores dessa espécie em

registrar a variabilidade  $\delta^{18}\text{O}$  da chuva, pelo *amount effect* (Dansgaard, 1964; Sleen et al., 2017). O mesmo foi observado para outros estudos de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  em *Cedrela odorata* nas florestas úmidas da América do sul, (Brienen et al., 2012; Baker et al., 2016; Volland et al., 2016; Cintra et al., 2019). A zona de convergência intertropical é o principal sistema produtor de chuvas na Amazônia oriental durante a estação chuvosa (Ferreira et al. 2015). As correlações mais fortes foram observadas com as chuvas de março a maio (Figura 5), que correspondem ao pico de precipitação sobre o Nordeste do Brasil, quando a zona de convergência intertropical (ZCIT) atinge suas posições mais ao sul, durante o outono austral (Marengo et al., 2018, Ferreira et al. 2015).

### ***Efeito das variáveis oceânicas e anos extremos nos anéis de crescimento***

Em relação às anomalias do SST no Oceano Atlântico, observam-se diferentes resultados para as séries cronológicas. As séries de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  indicam um dipolo entre as anomalias do TNA e TSA, nos meses úmidos. Temperaturas mais altas da superfície do mar no Atlântico tropical sul e esfriamento das águas do Atlântico Tropical norte estão associados ao deslocamento sazonal da ZCIT para o sul, durante o outono austral (Foltz et al., 2012; Utida et al., 2019). A Cronologia de vasos apresentou correlações negativas com o TSA em meados do inverno astral (JASO). Esse período é caracterizado pelo resfriamento significativo do TSA e ventos alísios (sudeste) mais fortes, os quais cruzam o Equador e causam o deslocamento a ZCIT para regiões mais ao norte do Equador (Schneider et al., 2014). Outros estudos na região neotropical da Amazônia e no nordeste brasileiro também demonstram o efeito em parâmetros dos anéis de crescimento (Aragão et al., 2022; Gonçalves et al., 2021; Volland et al., 2016). A cronologia de largura e, em específico a cronologia de densidade, não se mostraram sensíveis às variáveis de grande escala, podendo indicar que esses parâmetros não são sensíveis ao deslocamento sazonal da ITCZ, como também pode indicar a necessidade de outros tratamentos da cronologia para ressaltar esse sinal.

As cronologias de RW indicaram correlações negativas com as anomalias do Pacífico, enquanto que as séries de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  indicaram correlações positivas, expressas nas correlações espaciais (Figura 6). Destaca-se o impacto negativo do El Niño Oscilação Sul (El Niño 3.4) no incremento em largura, ocorrendo nos meses de maior precipitação. Efeito semelhante foi observado em outras populações de *Cedrela* na região neotropical (Dünisch, 2005; Granato-Souza et al., 2019; Stahle et al., 2020; Menezes et al., 2022). Os eventos de El Niño podem atuar diretamente no gradiente norte-sul da ZCIT, apresentando anomalias positivas-negativas SST no Atlântico norte/sul, induzindo a seca no leste da Bacia Amazônica e na região nordeste do Brasil (Yoon & Zeng, 2010). O efeito do ENSO no incremento em largura de *Cedrela* é comumente identificado (Granato-Souza et al., 2020, 2019; Layme-Huaman et al., 2018; Volland et al., 2016). Entre os anos extremos identificados na cronologia de RW e  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$ , onze estão relacionados aos anos de ocorrência de El Niño e às temperaturas do Tropical Atlântico Norte (TNA) (Espinoza et al., 2019; Marengo et al., 2020). Dentre esses anos, oito anos também são identificados nas principais cronologias de referência para a Amazônia oriental (Granato-Souza et al., 2020, 2019). Conforme demonstrado por Stahle et al (2020), a coerência entre séries reflete a covariabilidade da precipitação da América do Norte e Sul, a qual é movida pelo El Niño Oscilação Sul como também às outras dinâmicas atmosféricas associadas à circulação de Hadley. Segundo o autor, essa variabilidade pode ser observada nos registros de anéis de crescimento de árvores tropicais equatoriais e extratropicais. Ou seja, a cronologia apresentada neste estudo também dispõe do potencial para identificar interações pan-tropicais.



Destaca-se que as cronologias de densidade e número de vasos, em relação à cronologia de RW, têm respostas variadas nos anos de extrema seca. No entanto, verifica-se que após 1980 os sinais climáticos das cronologias de parâmetros estruturais se assemelham-se, indicando índices negativos (ex. a exemplo do ano de 1997-1998, Figura 7). Diversos estudos retratam a intensificação de eventos extremos nas últimas décadas, relacionados a frequência de El Niño, anomalias no Atlântico tropical norte, como também pela intensificação da circulação da células de Walker (Gloor et al., 2013; Alves et al., 2013; Barichivich et al., 2018; Espinoza et al., 2019; Marengo et al., 2020). A susceptibilidade a anos extremos de seca está relacionada à densidade do lenho e dimensões da árvore (Gatti et al., 2014; Phillips, 2009; Poorter et al., 2010). A *Cedrela odorata* na Amazônia apresenta densidade básica baixa-moderada ( $0.4 \text{ g/cm}^3$ ) e raízes superficiais (Citron, 1990), o qual sugere para essa espécie menor resistência a cavitação e baixo armazenamento de carbono em anos de extrema seca, podendo resultar na mortalidade em períodos de estresse hídrico (Zuleta et al., 2017). Isso pode indicar uma possível justificativa para os sinais das cronologias de largura, densidade do lenho e número de vasos indicarem sinais semelhantes as secas registradas a partir de 1980.

### 3.5. Conclusão

Foram apresentadas as cronologias de parâmetros estruturais (largura, densidade do lenho e número de vasos) e ecofisiológica ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$ ) dos anéis de crescimento. Os parâmetros estruturais apresentam variação entre o lenho inicial e lenho tardio possibilitando a divisão estratégica desses parâmetros para avaliar sinais distintos durante a atividade e dormência cambial. O incremento radial e a variação de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  se mostram parâmetros com sinal comum mais evidente entre séries e possível de realizar a codatação. A densidade e os vasos são parâmetros com baixa frequência (García-González et al., 2016; Schweingruber et al., 1978), o que torna impossível a codatação a partir desses parâmetros. Nesse sentido, esses parâmetros devem ser vistos como análises complementares a partir da construção das cronologias de largura ou  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$ . A precipitação é a principal variável climática que rege a variabilidade desses parâmetros nos anéis de crescimento de *Cedrela odorata*, na região oriental da Amazônia, a qual reflete principalmente a variação hidroclimática do norte do nordeste brasileiro. A largura dos anéis de crescimento e  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  são parâmetros interessantes que ressaltam o sinal climático do período de maior precipitação, enquanto que o número de vasos do lenho total destaca a relação negativa durante o período de baixa precipitação e retirada de água no solo. A densidade média do lenho total, por sua vez, traz informações do período de transição da dormência para reativação do câmbio. Ou seja, cada parâmetro traz informações referentes aos diferentes períodos de vida da planta, podendo auxiliar na compreensão da ecologia da *Cedrela odorata* frente às alterações climáticas. Em relação ao sinal das anomalias do SST, o  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  se mostra o mais promissor para avaliar e inferir sobre a teleconexões oceânicas, no entanto, foi possível identificar o efeito dessas anomalias no incremento em largura e número de vasos, de forma significativa. Esses efeitos podem ser melhor observados nos anos extremos em todas as séries cronológicas, em especial a partir de 1980, quando ocorre a intensificação desses eventos na região da Amazônia e do nordeste brasileiro (Barichivich et al., 2018; Espinoza et al., 2019; Marengo et al., 2020).

## REFERÊNCIAS

- Albiero-Júnior, A., Venegas-González, A., Botosso, P. C., Roig, F. A., Camargo, J. L. C., & Tomazello-Filho, M. (2019). What is the temporal extension of edge effects on tree growth dynamics? A dendrochronological approach model using *Scleronema micranthum* (Ducke) Ducke trees of a fragmented forest in the Central Amazon. *Ecological Indicators*, 101(November 2018), 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.040>
- Albuquerque, A. R., Castro, V. R. De, Lobão, M. S., Sarto, C., Filho, M. T., & Guedes, F. T. P. (2016). Comparative analysis of anatomy and micro-densitometry of the growth rings of hardwoods and conifers, with emphasis on dendrochronology. *Análise comparativa da anatomia e microdensitometria dos anéis de crescimento de folhosas e de coníferas, com ênfase.* *Scientia Forestalis*, 44(111), 595–610.
- Albuquerque, R. P., Brandes, A. F. N., Lisi, C. S., Moraes, L. F. D. De, & Barros, C. F. (2019). Tree-ring formation, radial increment and climate–growth relationship: assessing two potential tree species used in Brazilian Atlantic forest restoration projects. *Trees - Structure and Function*, 33(3), 877–892. <https://doi.org/10.1007/s00468-019-01825-6>
- Allen, K. J., Downes, G. M., Allen, K., Drew, D. M., Downes, G. M., Evans, R., Baker, P., & Grose, M. (2012). Ring width, climate and wood density relationships in two long-lived Tasmanian tree species. *Dendrochronologia*, 30(2), 167–177. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2010.12.006>
- Alves, L. ., Marengo, J. ., & Cavalcanti, I. F. . (2013). Histórico de secas na Amazônia. In *Secas na Amazônia: causas e consequências* (Vol. 53, Issue 9).
- Aragão, J. R. V., Zuidema, P. A., & Groenendijk, P. (2022). Climate-growth relations of congeneric tree species vary across a tropical vegetation gradient in Brazil. *Dendrochronologia*, 71(November 2021). <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125913>
- Baker, J. C.A., Gloor, M., Spracklen, D. V., Arnold, S. R., Tindall, J. C., Clerici, S. J., Leng, M. J., & Brienen, R. J. W. (2016). What drives interannual variation in tree ring oxygen isotopes in the Amazon? *Geophysical Research Letters*, 43(22), 11,831–11,840. <https://doi.org/10.1002/2016GL071507>
- Baker, J. C.A., Hunt, S. F. P., Clerici, S. J., Newton, R. J., Bottrell, S. H., Leng, M. J., Heaton, T. H. E., Helle, G., Argollo, J., Gloor, M., & Brienen, R. J. W. (2015). Oxygen isotopes in tree rings show good coherence between species and sites in Bolivia. *Global and Planetary Change*, 133, 298–308. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.09.008>
- Barichivich, J., Gloor, E., Peylin, P., Brienen, R. J. W., Schöngart, J., Espinoza, J. C., & Pattnayak, K. C. (2018). Recent intensification of Amazon flooding extremes driven by strengthened Walker circulation. *Science Advances*, 4(9). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat8785>
- Bhattacharyya, A., Eckstein, D., Shah, S. K., & Chaudhary, V. (2007). Analyses of climatic changes around Perambikulam, South India, based on early wood mean vessel area of teak. *Current Science*, 93(8), 1159–1164.
- Björklund, J. A., Gunnarson, B. E., Seftigen, K., Esper, J., & Linderholm, H. W. (2014). Blue intensity and density from northern Fennoscandian tree rings, exploring the potential to improve summer temperature reconstructions with earlywood information. *Clim. Past*, 10(2), 877–885. <https://doi.org/10.5194/cp-10-877-2014>
- Botosso, P. C., & Tomazello-Filho, M. (2001). Aplicação de faixas dendrométricas na dendrocronologia avaliação da taxa do ritmo de crescimento do tronco de árvores tropicais e subtropicais. In N. B. Maia, H. L. Martos, & W. Barrella (Eds.), *Indicadores ambientais conceitos e aplicações* (pp. 145–172).
- Bretfeld, M., Ewers, B. E., & Hall, J. S. (2018). Plant water use responses along secondary forest succession during the 2015–2016 El Niño drought in Panama. *New Phytologist*, 219(3), 885–899. <https://doi.org/10.1111/nph.15071>
- Brienen, R. J. W., & Zuidema, P. A. (2005). Relating tree growth to rainfall in Bolivian rain forests: A test for six species using tree ring analysis. *Oecologia*, 146(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0160-y>
- Brienen, R. J. W., & Zuidema, P. A. (2005). Relating tree growth to rainfall in Bolivian rain forests: A test for six species using tree ring analysis. *Oecologia*, 146(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0160-y>
- Brienen, R. J. W., Helle, G., Pons, T. L., Guyot, J. L., & Gloor, M. (2012). Oxygen isotopes in tree rings are a good parâmetro for Amazon precipitation and El Niño–Southern Oscillation variability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(42), 16957–16962. <https://doi.org/10.1073/pnas.1205977109>
- Brienen, R. J. W., Schöngart, J., & Zuidema, P. A. (2016). Tree Rings in the Tropics: Insights into the Ecology and Climate Sensitivity of Tropical Trees. 439–461. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-27422-5\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-319-27422-5_20)
- Briffa, K. R., Osborn, T. J., & Schweingruber, F. H. (2004). Large-scale temperature inferences from tree rings: A review. *Global and Planetary Change*, 40(1–2), 11–26. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(03\)00095-X](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00095-X)
- Briffa, Keith R., Osborn, T. J., Schweingruber, F. H., Jones, P. D., Shiyatov, S. G., & Vaganov, E. A. (2002). Tree-ring width and density data around the Northern Hemisphere: Part 2, spatio-temporal variability and associated climate patterns. *Holocene*, 12(6), 759–789. <https://doi.org/10.1191/0959683602hl588rp>
- Brum, M., Teodoro, G. S., Abrahão, A., & Oliveira, R. S. (2017). Coordination of rooting depth and leaf hydraulic traits defines drought-related strategies in the campos rupestres, a tropical montane biodiversity hotspot. *Plant and Soil*, 420(1–2), 467–480. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3330-x>
- Bunn, A., & Korpela, M. (2019). An introduction to dplR. *Industrial and Commercial Training*, 10(1), 11–18. <http://www.r-project.org/>

- Caetano-Andrade, V. L., Clement, C. R., Weigel, D., Trumbore, S., Boivin, N., Schöngart, J., & Roberts, P. (2020). Tropical Trees as Time Capsules of Anthropogenic Activity. *Trends in Plant Science*, 25(4), 369–380. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.12.010>
- Caetano-Andrade, V. L., Schöngart, J., Ayala, W. E., Melinski, R. D., Silva, F., Dobrindt, R., & Roberts, P. (2021). Advances in increment coring system for large tropical trees with high wood densities. *Dendrochronologia*, 68(August 2020). <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125860>
- Camarero, J. J., Rozas, V., & Olano, J. M. (2014). Minimum wood density of *Juniperus thurifera* is a robust proxy of spring water availability in a continental Mediterranean climate. *Journal of Biogeography*, 41(6), 1105–1114. <https://doi.org/10.1111/jbi.12271>
- Carrer, M., Von Arx, G., Castagneri, D., & Petit, G. (2014). Distilling allometric and environmental information from time series of conduit size: The standardization issue and its relationship to tree hydraulic architecture. *Tree Physiology*, 35(1), 27–33. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpu108>
- Carvalho, J.O.P (1997). Dinâmica de florestas naturais e sua implicação para o manejo florestal. IN Curso de Manejo florestal sustentável – Tópicos em manejo florestal sustentável. Colombo: EMBRAPA-CNPQ, Documentos 34, p. 43-55.
- Cintra, B. B. L., Gloor, M., Boom, A., Schöngart, J., Locosselli, G. M., & Brienen, R. (2019). Contrasting controls on tree ring isotope variation for Amazon floodplain and terra firme trees. *Tree Physiology*, 39(5), 845–860. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpz009>
- Cintra, Bruno B.L., Gloor, M., Boom, A., Schöngart, J., Baker, J. C. A., Cruz, F. W., Clerici, S., & Brienen, R. J. W. (2021). Tree-ring oxygen isotopes record a decrease in Amazon dry season rainfall over the past 40 years. *Climate Dynamics*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-06046-7>
- Conkey, L. E. (1979). Response of Tree-Ring Density to Climate in Maine, U. S. A.
- Cook, E. R. (1985). A Time Series Analysis Approach to Tree Ring Standardization. In *School of Renewable Natural Resources: Vol. PhD Thesis* (p. 171).
- Cook, E. R., & Peters, K. (1997). Calculating unbiased tree-ring indices for the study of climatic and environmental change. *Holocene*, 7(3), 361–370. <https://doi.org/10.1177/095968369700700314>
- Cook, E. R., Shiyatov, S. G., Mazepa, V. S., Ecology, A., & Branch, U. (1990). Methods of Dendrochronology: Tree-ring standardization and growth-trend estimation. In *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences* (Issue April 2016).
- Costa, W., Silva, Da Cunha, M., José F. Pena Rodrigues, P., de Andrade Iguatemy, M., Valladares, F., & Franca Barros, C. (2020). Intraspecific variation in functional wood anatomy of tropical trees caused by effects of forest edge. *Forest Ecology and Management*, 473(March), 118305. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118305>
- Da Silva, P. E., Santos e Silva, C. M., Spyrides, M. H. C., & Andrade, L. de M. B. (2019). Precipitation and air temperature extremes in the Amazon and northeast Brazil. *International Journal of Climatology*, 39(2), 579–595. <https://doi.org/10.1002/joc.5829>
- Dansgaard, W. (1964). Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16(4), 436–468. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v16i4.8993>
- De Mil, T., Tarelkin, Y., Hahn, S., Hubau, W., Deklerck, V., Debeir, O., Van Acker, J., de Cannière, C., Beeckman, H., & Van den Bulcke, J. (2018). Wood density profiles and their corresponding tissue fractions in tropical angiosperm trees. *Forests*, 9(12). <https://doi.org/10.3390/f9120763>
- Draxler, R. R. (1992). Hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectories (HY-SPLIT): version 3.0 - user's guide and model description. *Japanese Society of Biofeedback Research*, 19(June), 709–715. [https://doi.org/10.20595/jjbf.19.0\\_3](https://doi.org/10.20595/jjbf.19.0_3)
- 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(1), 5–11.
- Dünisch, Oliver, Bauch, J., & Gasparotto, L. (2002). Formation of increment zones and intraannual growth dynamics in the xylem of *Swietenia macrophylla*, *Carapa guianensis*, and *Cedrela odorata* (Meliaceae). *IAWA Journal*, 23(2), 101–119. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000292>
- Dünisch, Oliver, Montóia, V. R., & Bauch, J. (2003). Dendroecological investigations on *Swietenia macrophylla* King and *Cedrela odorata* L. (Meliaceae) in the central Amazon. *Trees - Structure and Function*, 17(3), 244–250. <https://doi.org/10.1007/s00468-002-0230-2>
- Dünisch, Oliver, Montóia, V. R., & Bauch, J. (2003). Dendroecological investigations on *Swietenia macrophylla* King and *Cedrela odorata* L. (Meliaceae) in the central Amazon. *Trees - Structure and Function*, 17(3), 244–250. <https://doi.org/10.1007/s00468-002-0230-2>
- Espinoza, J. C., Ronchail, J., Marengo, J. A., & Segura, H. (2019). Contrasting North–South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981–2017). *Climate Dynamics*, 52(9–10), 5413–5430. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4462-2>
- Espinoza, M. J. P., Guillen, G. J. I., Morales, M. S., & Ariméndiz, R. R. (2014). dendrocronológicos en la selva central del Perú. 62(June), 783–793.
- Ewers, F. W., & Carlquist, S. (1990). Comparative Wood Anatomy: Systematic, Ecological, and Evolutionary Aspects of Dicotyledon Wood. *Taxon*, 39(1), 67. <https://doi.org/10.2307/1223183>
- Fávero, L. P. L., & Belfiore, P. P. (2017). Manual de análise de dados: estatística e modelagem multivariada com excel, SPSS e stata. Elsevier.
- Fearnside, P. M. (2008). Amazon forest maintenance as a source of environmental services. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 80(1), 101–114. <https://doi.org/10.1590/s0001-37652008000100006>

- Ferreira, D. B. D. S., Souza, E. B. De, Moraes, B. C. De, & Meira Filho, L. G. (2015). Spatial and temporal variability of rainfall in eastern Amazon during the rainy season. *Scientific World Journal*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/209783>
- Fichtler, E. (2017). Dendroclimatology using tropical broad-leaved tree species – A review. *Erdkunde*, 71(1). <https://doi.org/10.3112/erdkunde.2017.01.01>
- Foltz, G. R., McPhaden, M. J., & Lumpkin, R. (2012). A strong atlantic meridional mode event in 2009: The role of mixed: Layer dynamics. *Journal of Climate*, 25(1), 363–380. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00150.1>
- Fonti, P., & García-González, I. (2004). Suitability of chestnut earlywood vessel chronologies for ecological studies. *New Phytologist*, 163(1), 77–86. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01089.x>
- Fonti, P., Solomonoff, N., & García-González, I. (2007). Earlywood vessels of *Castanea sativa* record temperature before their formation. *New Phytologist*, 173(3), 562–570. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01945.x>
- Frank, D., & Esper, J. (2005). Characterization and climate response patterns of a high-elevation, multi-species tree-ring network in the European Alps. *Dendrochronologia*, 22(2), 107–121. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2005.02.004>
- FRITTS, H. C. (1976). Dendrochronology and Dendroclimatology. In H. C. FRITTS (Ed.), *Tree Rings and Climate* (pp. 1–54). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-268450-0.50006-9>
- García-González, I., & Fonti, P. (2008). Ensuring a representative sample of earlywood vessels for dendroecological studies: An example from two ring-porous species. *Trees - Structure and Function*, 22(2), 237–244. <https://doi.org/10.1007/s00468-007-0180-9>
- García-González, I., Souto-Herrero, M., & Campelo, F. (2016). RING-POROSITY and EARLYWOOD VESSELS: A REVIEW on EXTRACTING ENVIRONMENTAL INFORMATION THROUGH TIME. *IAWA Journal*, 37(2), 295–314. <https://doi.org/10.1163/22941932-20160135>
- Gärtner, H., & Schweingruber, F. (2013). Microscopic preparation techniques for plant stem analysis. Verlag Dr. Kessel, Remagen-Oberwinter (Issue June).
- Gatti, L. V., Gloor, M., Miller, J. B., Doughty, C. E., Malhi, Y., Domingues, L. G., Basso, L. S., Martinewski, A., Correia, C. S. C., Borges, V. F., Freitas, S., Braz, R., Anderson, L. O., Rocha, H., Grace, J., Phillips, O. L., & Lloyd, J. (2014). Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements. *Nature*, 506(7486), 76–80. <https://doi.org/10.1038/nature12957>
- Gholami, V., Torkaman, J., & Dalir, P. (2019). Simulation of precipitation time series using tree-rings , earlywood vessel features , and artificial neural network. 1939–1948.
- Gloor, M., Brienen, R. J. W., Galbraith, D., Feldpausch, T. R., Schöngart, J., Guyot, J. L., Espinoza, J. C., Lloyd, J., & Phillips, O. L. (2013). Intensification of the Amazon hydrological cycle over the last two decades. *Geophysical Research Letters*, 40(9), 1729–1733. <https://doi.org/10.1002/grl.50377>
- Gonçalves, J. Q., Durgante, F. M., Wittmann, F., Piedade, M. T. F., Ortega Rodriguez, D. R., Tomazello-Filho, M., Parolin, P., & Schöngart, J. (2021). Minimum temperature and evapotranspiration in Central Amazonian floodplains limit tree growth of *Nectandra amazonum* (Lauraceae). *Trees - Structure and Function*, 35(4), 1367–1384. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02126-7>
- Gonçalves, J. Q., Durgante, F. M., Wittmann, F., Piedade, M. T. F., Ortega Rodriguez, D. R., Tomazello-Filho, M., Parolin, P., & Schöngart, J. (2021). Minimum temperature and evapotranspiration in Central Amazonian floodplains limit tree growth of *Nectandra amazonum* (Lauraceae). *Trees - Structure and Function*, 35(4), 1367–1384. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02126-7>
- Granato-Souza, D., Stahle, D. W., Barbosa, A. C., Feng, S., Torbenson, M. C. A., de Assis Pereira, G., Schöngart, J., Barbosa, J. P., & Griffin, D. (2019). Tree rings and rainfall in the equatorial Amazon. *Climate Dynamics*, 52(3–4), 1857–1869. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4227-y>
- Granato-Souza, D., Stahle, D. W., Torbenson, M. C. A., Howard, I. M., Barbosa, A. C., Feng, S., Fernandes, K., & Schöngart, J. (2020). Multidecadal Changes in Wet Season Precipitation Totals Over the Eastern Amazon. *Geophysical Research Letters*, 47(8), 1–9. <https://doi.org/10.1029/2020GL087478>
- Grissino-Mayer, H. (2001). Evaluating Crossdating Accuracy: A Manual and Tutorial for the Computer Program COFECHA. *Tree-Ring Research*.
- Holmes, R. (1983). Computer-Assisted Quality Control in Tree-Ring Dating and Measurement. *Tree-Ring Bulletin*.
- Hughes, M. K. (2002). Hughes et al 2002 Dendrochronology in climatology.pdf. 2, 95–116.
- Humanes-Fuente, V., Ferrero, M. E., Muñoz, A. A., González-Reyes, Requena-Rojas, E. J., Barichivich, J., Inga, J. G., & Layme-Huaman, E. T. (2020). Two Centuries of Hydroclimatic Variability Reconstructed From Tree-Ring Records Over the Amazonian Andes of Peru. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(18), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2020JD032565>
- Inga, J. G., & del Valle, J. I. (2017). Log-relative growth: A new dendrochronological approach to study diameter growth in *Cedrela odorata* and *Juglans neotropica*, Central Forest, Peru. *Dendrochronologia*, 44, 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.03.009>
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA DO BRASIL – INMET. Normais Climatológicas (1961/1990). Brasília - DF, 1992.
- Islam, M., Rahman, M., & Bräuning, A. (2018). Xylem anatomical responses of diffuse porous *Chukrasia tabularis* to climate in a South Asian moist tropical forest. *Forest Ecology and Management*, 412(February), 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.01.035>
- Kames, S., Tardif, J. C., & Bergeron, Y. (2016). Continuous earlywood vessels chronologies in floodplain ring-porous species can improve dendrohydrological reconstructions of spring high flows and flood levels. *Journal of Hydrology*, 534, 377–389. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.002>

- Kawamura, T., Naito, S., Okano, K., & Yamada, M. (2015). Improvement in Image Quality and Workflow of X-Ray Examinations using a New Image Processing Method , “ Virtual Grid Technology .” 60, 21–27.
- Kłusek, M., Melvin, T. M., & Grabner, M. (2015). Multi-century long density chronology of living and sub-fossil trees from Lake Schwarzensee, Austria. *Dendrochronologia*, 33, 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2014.11.004>
- Lachenbruch, B., & Mcculloh, K. A. (2014). Traits, properties, and performance: How woody plants combine hydraulic and mechanical functions in a cell, tissue, or whole plant. *New Phytologist*, 204(4), 747–764. <https://doi.org/10.1111/nph.13035>
- Layme-Huaman, E. T., Ferrero, M. E., Palacios-Lazaro, K. S., & Requena-Rojas, E. J. (2018). *Cedrela nebulosa*: A novel species for dendroclimatological studies in the montane tropics of South America. *Dendrochronologia*, 50(June), 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.06.004>
- Li, W., Fu, R., & Dickinson, R. E. (2006). Rainfall and its seasonality over the Amazon in the 21st century as assessed by the coupled models for the IPCC AR4. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 111(2), 1–14. <https://doi.org/10.1029/2005JD006355>
- Lisi, C. S., Pagotto, M. A., Anholetto, C. R., Nogueira, F. C., Santos, H. L., Costa, C. M., Menezes, Í. R. N., Roig Juñet, F. A., & Tommasiello Filho, M. (2020). Dendroecological Studies with *Cedrela odorata* L., Northeastern Brazil. In M. Pompa-García & J. J. Camarero (Eds.), *Latin American Dendroecology: Combining Tree-Ring Sciences and Ecology in a Megadiverse Territory* (pp. 37–59). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-36930-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-36930-9_3)
- Lobão, M. S. (2011). Dendrocronologia , fenologia , atividade cambial e qualidade do lenho de árvores de *Cedrela odorata* L ., *Cedrela fissilis* Vell . e *Schizolobium parahyba* var . *amazonicum* Hub . ex Ducke, no estado do Acre, Brasil.
- Locosselli, G. M., Brien, R. J. W., de Souza Leite, M., Gloor, M., Krottenthaler, S., de Oliveira, A. A., Barichivich, J., Anhof, D., Ceccantini, G., Schöngart, J., & Buckeridge, M. (2021). Global tree-ring analysis reveals rapid decrease in tropical tree longevity with temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(52), 33358–33364. <https://doi.org/10.1073/PNAS.2003873117>
- Locosselli, G. M., Buckeridge, M. S., Moreira, M. Z., & Ceccantini, G. (2013). A multi-proxy dendroecological analysis of two tropical species (*Hymenaea* spp., *Leguminosae*) growing in a vegetation mosaic. *Trees - Structure and Function*, 27(1), 25–36. <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0764-x>
- Loriaux, M. (1971). R.R. Sokal and F.J. Rohlf *Biometry. The Principles and Practice of Statistics in Biological Research*. San Francisco, W.H. Freeman and Company, 1969, XXI p. 776 p., 126/- . - F.J. Rohlf and R.R. Sokal *Statistical Tables*. San Francisco, W.H. Freeman and Comp. *Louvain Economic Review*, 37(4), 461–462. <https://doi.org/10.1017/S0770451800026853>
- Malhi, Y., Roberts, J. T., Betts, R. A., Killeen, T. J., Li, W., & Nobre, C. A. (2008). Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. *In Science* (Vol. 319, Issue 5860, pp. 169–172). <https://doi.org/10.1126/science.1146961>
- Marcati, C. R., Angyalossy, V., & Evert, R. F. (2006). Seasonal variation in wood formation of *Cedrela fissilis* (Meliaceae). *IAWA Journal*, 27(2), 199–211. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000149>
- Marengo, J. A., & Espinoza, J. C. (2016). Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: Causes, trends and impacts. *International Journal of Climatology*, 36(3), 1033–1050. <https://doi.org/10.1002/joc.4420>
- Marengo, J. A., Souza, C. M., Thonicke, K., Burton, C., Halladay, K., Betts, R. A., Alves, L. M., & Soares, W. R. (2018). Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends. *Frontiers in Earth Science*, 6(December), 1–21. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00228>
- Marengo, J., Nobre, C. a, Betts, R. a, Cox, P. M., Sampaio, G., & Salazar, L. (2009). Aquecimento Global e Mudança Climática na Amazônia : Retroalimentação Clima-Vegetação e Impactos nos Recursos Hídricos. 20. <https://doi.org/10.1029/2008GM000743>
- Marengo, Jose A, Tomasella, J., Alves, L. M., Soares, W. R., & Rodriguez, D. A. (2011). The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. 38, 1–5. <https://doi.org/10.1029/2011GL047436>
- Marengo, Jose A., Cunha, A. P. M. A., Nobre, C. A., Ribeiro Neto, G. G., Magalhaes, A. R., Torres, R. R., Sampaio, G., Alexandre, F., Alves, L. M., Cuartas, L. A., Deusdará, K. R. L., & Álvala, R. C. S. (2020). Assessing drought in the drylands of northeast Brazil under regional warming exceeding 4 °C. *Natural Hazards*, 103(2), 2589–2611. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04097-3>
- McCarroll, D., & Loader, N. J. (2006). Isotopes in tree rings. In M. J. Leng (Ed.), *Isotopes in Palaeoenvironmental Research* (pp. 67–116). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/1-4020-2504-1\\_02](https://doi.org/10.1007/1-4020-2504-1_02)
- Mekdece, F.S.; Almeida, E.C.; Rayol, B.P. (2013). *Manual de sementes florestais do oeste do Pará: coleta, beneficiamento e análise*. Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de Biodiversidade e Florestas, Laboratório de Sementes Florestais, Santarém-PA, 2013.
- Mendivelso, H. A., Camarero, J. J., Gutiérrez, E., & Castaño-Naranjo, A. (2016). Climatic influences on leaf phenology, xylogenesis and radial stem changes at hourly to monthly scales in two tropical dry forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 216, 20–36. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.09.014>
- Menezes, I. R. N., Aragão, J. R. V., Pagotto, M. A., & Lisi, C. S. (2022). Teleconnections and edaphoclimatic effects on tree growth of *Cedrela odorata* L. in a seasonally dry tropical forest in Brazil. *Dendrochronologia*, 72(January). <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.125923>
- Mitchell, T. D., & Jones, P. D. (2005). An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology*, 25(6), 693–712. <https://doi.org/10.1002/joc.1181>

- Pacheco, A., Camarero, J. J., Pompa-García, M., Battipaglia, G., Voltas, J., & Carrer, M. (2020). Growth, wood anatomy and stable isotopes show species-specific couplings in three Mexican conifers inhabiting drought-prone areas. *Science of the Total Environment*, 698, 134055. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134055>
- Pagotto, M. A., DeSoto, L., Carvalho, A., Nabais, C., Tomazello Filho, M., Ribeiro, A., & Lisi, C. S. (2017). Evaluation of X-ray densitometry to identify tree-ring boundaries of two deciduous species from semi-arid forests in Brazil. *Dendrochronologia*, 42, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.01.007>
- Pagotto, M. A., Menezes, I. R. N., Costa, C. M., Lisi, C. S., & Bräuning, A. (2021). Oxygen isotopes in tree rings of *Cedrela odorata* L. as an indicator of hydroclimate variations in a seasonally dry tropical forest in northeastern Brazil. *Trees - Structure and Function*, 2(0123456789). <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02158-z>
- Pandey, S. (2021). Climatic influence on tree wood anatomy: a review. *Journal of Wood Science*, 67(1). <https://doi.org/10.1186/s10086-021-01956-w>
- Pandey, S., Carrer, M., Castagneri, D., & Petit, G. (2018). Xylem anatomical responses to climate variability in Himalayan birch trees at one of the world's highest forest limit. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 33(July 2017), 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2018.05.004>
- Paredes-Villanueva, K., López, L., & Navarro Cerrillo, R. M. (2016a). Regional chronologies of *Cedrela fissilis* and *Cedrela angustifolia* in three forest types and their relation to climate. *Trees - Structure and Function*, 30(5), 1581–1593. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1391-8>
- Phillips, O. L. (2009). Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest. <https://doi.org/10.1126/science.1164033>
- Poorter, L., McDonald, I., Alarcón, A., Fichtler, E., Licona, J. C., Peña-Claros, M., Sterck, F., Villegas, Z., & Sass-Klaassen, U. (2010). The importance of wood traits and hydraulic conductance for the performance and life history strategies of 42 rainforest tree species. *New Phytologist*, 185(2), 481–492. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03092.x>
- Pritzkow, C., Wazny, T., Heußner, K. U., Słowiński, M., Bieber, A., Liñán, I. D., Helle, G., & Heinrich, I. (2016). Minimum winter temperature reconstruction from average earlywood vessel area of European oak (*Quercus robur*) in N-Poland. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 449, 520–530. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.02.046>
- Quintilhan, M. T., Santini, L., Ortega Rodriguez, D. R., Guillemot, J., Cesilio, G. H. M., Chambi-Legoas, R., Nouvellon, Y., & Tomazello-Filho, M. (2021). Growth-ring boundaries of tropical tree species: Aiding delimitation by long histological sections and wood density profiles. *Dendrochronologia*, 69(September). <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125878>
- Rodrigues, C. F. A., Pinto, M. V. P., Soares, M. H. M., & Ruschel, A. (2015). Caracterização da estrutura florística da área experimental de manejo florestal km 114, flona do tapajós: área explorada e não explorada. 19o Seminário de Iniciação Científica e 3o Seminário de Pós-Graduação Da Embrapa Amazônia Oriental, 13(3), 1576–1580.
- Rozanski, K., Araguás-Araguás, L., & Gonfiantini, R. (2013). Isotopic Patterns in Modern Global Precipitation. 1–36. <https://doi.org/10.1029/gm078p0001>
- Schindelin, J.; Arganda-Carreras, I. & Frise, E. et al. (2012), "Fiji: an open-source platform for biological-image analysis", *Nature methods* 9(7): 676-682, PMID 22743772
- Schneider, T., Bischoff, T., & Haug, G. H. (2014). Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone. *Nature*, 513(7516), 45–53. <https://doi.org/10.1038/nature13636>
- Schweingruber, F., Fritts, H., Braker, O., Drew, L., & Schar, E. (1978). The Xray technique as applied to dendroclimatology. *Tree-Ring Bulletin*, 38, 61–91.
- Schweingruber, Fritz Hans. (1989). *Tree rings Basics and Applications of Dendrochronology*. In Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-1273-1>
- Schweingruber, Fritz Hans. (1989). *Tree rings Basics and Applications of Dendrochronology*. In Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-1273-1>
- Sleen, P., Zuidema, P. A., & Pons, T. L. (2017). Stable isotopes in tropical tree rings: theory, methods and applications. *Functional Ecology*, 31(9), 1674–1689. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12889>
- Sohel, M. S. I., Grau, A. V., McDonnell, J. J., & Herbohn, J. (2021). Tropical forest water source patterns revealed by stable isotopes: A preliminary analysis of 46 neighboring species. *Forest Ecology and Management*, 494(July 2020), 119355. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119355>
- Sousa, L. K. V. dos S. (2019). *Dendrocronologia aplicada no manejo de árvores de cedro ( Cedrela odorata ) L . e jatobá ( Hymenaea courbaril ) L . ocorrentes na FLONA Tapajós , PA*. Universidade de São Paulo.
- Souto-Herrero, M., Rozas, V., & García-González, I. (2017). A 481-year chronology of oak earlywood vessels as an age-independent climatic proxy in NW Iberia. *Global and Planetary Change*, 155(October 2016), 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.06.003>
- Speer, J. H. (2009). *Fundamentals of tree-ring research*. In University of Arizona press (3rd ed., Vol. 26, Issue 3). <https://doi.org/10.1002/gea.20357>
- Stahle, D. W., Torbenson, M. C. A., Howard, I. M., Granato-Souza, D., Barbosa, A. C., Feng, S., Schöngart, J., Lopez, L., Villalba, R., Villanueva, J., & Fernandes, K. (2020). Pan American interactions of Amazon precipitation, streamflow, and tree growth extremes. *Environmental Research Letters*, 15(10). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ababc6>
- Stepka, T. F., Mattos, P. P. de, Figueiredo Filho, A., Braz, E. M., & Machado, S. do A. (2021). Growth of *Araucaria angustifolia*, *Cedrela fissilis* and *Ocotea porosa* in different locations within the *Araucaria* forest in the southern Brazil. *Forest Ecology and Management*, 486(August 2020). <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118941>
- Stokes, M. A., & Smiley, T. L. (1968). *An introduction to tree-ring dating*. Chicago: University of Chicago Press.

- Tomazello Filho, M., Botosso, P. C., Lisi, C. S., & Roig, F. A. (2000). Potencialidade da família Meliaceae para dendrocronologia em regiões tropicais e subtropicais. *Dendrocronología En América Latina*. Editorial de La Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, August 2015, 381–431.
- Tomazello, M., Brazolin, S., Chagas, M. P., Oliveira, J. T. S., Ballarin, A. W., & Benjamin, C. A. (2008). Application of x-ray technique in nondestructive evaluation of eucalypt wood. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 10(2), 139–149. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2008000200006>
- Utida, G., Cruz, F. W., Et, J., Bouloubass, I., Schefuß, E., Vuille, M., Novello, V. F., Prado, L. F., Sifeddine, A., Klein, V., Zular, A., Viana, J. C. C., & Turcq, B. (2019). Tropical South Atlantic influence on Northeastern Brazil precipitation and ITCZ displacement during the past 2300 years. December 2018, 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38003-6>
- Veloso, H. P., Rangel Filho, A. L., & Lima, J. C. A. (1991). Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal. *Vollard, F., Pucha, D., & Bräuning, A. (2016). Hydro-climatic variability in southern ecuador reflected by tree-ring oxygen isotopes. Erdkunde*, 70(1), 69–82. <https://doi.org/10.3112/erdkunde.2016.01.05>
- Wieloch, T., Helle, G., Heinrich, I., Voigt, M., & Schyma, P. (2011). A novel device for batch-wise isolation of  $\alpha$ -cellulose from small-amount wholewood samples. *Dendrochronologia*, 29(2), 115–117. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2010.08.008>
- Wigley, T. M. ., Briffa, K. R., & Jones, P. D. (1984). On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and syndrometeorology. *American Meteorological Society*.
- Wimmer, R. (2002). Wood anatomical features in tree-rings as indicators of environmental change. *Dendrochronologia*, 20(1–2), 21–36.
- Worbes, M. (1999). Annual growth rings, rainfall-dependent growth and long-term growth patterns of tropical trees from the Caparo Forest Reserve in Venezuela. *Journal of Ecology*, 87(3), 391–403. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.1999.00361.x>
- Worbes, M. (2002). One hundred years of tree-ring research in the tropics - A brief history and an outlook to future challenges. *Dendrochronologia*, 20(1–2), 217–231. <https://doi.org/10.1078/1125-7865-00018>
- Yoon, J. H., & Zeng, N. (2010). An Atlantic influence on Amazon rainfall. *Climate Dynamics*, 34(2), 249–264. <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0551-6>
- Zimmermann, M.H. (1983). *Xylem structure and the ascent of sap*. Berlin:Springer Verlag. 143 p.
- Zuleta, D., Duque, A., Cardenas, D., Muller-Landau, H. C., & Davies, S. J. (2017). Drought-induced mortality patterns and rapid biomass recovery in a terra firme forest in the Colombian Amazon. *Ecology*, 98(10), 2538–2546. <https://doi.org/10.1002/ecy.1950>

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação apresenta importantes contribuições sobre a aplicação do gênero *Cedrela* nas pesquisas climatológicas e ecológicas, na floresta tropical da Amazônia. Destaca-se, em síntese, a relevância dos anéis de crescimento da *Cedrela odorata* e outras espécies do gênero como importante bioindicador da floresta tropical da Amazônia. Registrando o clima regional e em larga escala, ao longo da vida da espécie, uma nova cronologia de *Cedrela odorata*, com 181 anos, é apresentada. Essa reforça em seus índices a resposta da espécie à precipitação e traz anos de semelhança com as cronologias mais longevas da Amazônia (Granato-Souza et al. 2019,2020), sugerindo potencial de estudos climáticos de larga escala.

Ressalta-se que a espécie *Cedrela* apresenta anéis de crescimento bem definidos e com potencial de datação comprovado pela dendrocronologia, atividade cambial e radiocarbono. No entanto, a dificuldade na datação recai sobre o método de amostragem e a frequência de anéis de crescimento falsos, confluentes e ausentes. Ainda destaca-se que amostras da base são possíveis de datar, porém apresentam muitos ruídos ecológicos, reduzindo o sinal comum entre árvores. O método de amostragem indicado por Granato-Souza et al. (2019), complementado pelo método de Caetano-Andrade et al., (2021) se mostrou bastante promissor para a espécie na floresta tropical da Amazônia.

A radiografia do lenho da *Cedrela odorata* também é bastante promissora para análise de caracterização da variabilidade intra-anual do anel de crescimento. Assim como o uso da metalográficas se mostrou bastante exata no corte e limpeza das amostras, para utilização em classificação automática de tecidos da anatomia do lenho. Entretanto, é indicado estudos técnicos, a fim de verificar formas de tratamento do material pré/pós corte e avaliar percentual de perda da área do vaso, a partir da classificação automática. Sugere-se um estudo técnico comparando cronologias desenvolvidas por cortes histológicos, seção transversal do lenho escaneada e imagens de raios X. A definição do melhor método pouparia esforços e tempo de trabalho.

As cronologias de densidade do lenho e número de vasos mostram-se análises complementares para a avaliação do efeito da precipitação sobre a espécie *Cedrela odorata*, ressaltando o sinal nos períodos de menor precipitação e déficit hídrico. Outros parâmetros de vasos apresentados não indicaram correlações com a precipitação, podendo ser efeito do número amostral ou das sensibilidades desses parâmetros para a espécie. Vale ressaltar que a cronologia de número de vasos têm grande similaridade com a cronologia de largura, devido ao método de mensuração deste parâmetro. Tendo em vista o tempo e trabalho para construção da cronologia de vasos, é importante avaliar a contribuição deste parâmetro para atingir os objetivos do trabalho. No entanto, sugere-se o testar uma variável alternativa, que inclui o número e a área dos vasos em um único parâmetro (Ex. condutividade hidráulica) (García-González et al., 2016).

A cronologia de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$ , da mesma, traz informações importantes sobre a variabilidade de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{precipitação}}$  e o transporte de umidade na região da Amazônia oriental. Diferente de outros estudos na Amazônia, o  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$  da *Cedrela odorata* na Amazônia oriental relaciona-se com a variabilidade hidroclimática da região norte do nordeste brasileiro. Registra principalmente secas do nordeste brasileiro, e secas da bacia amazônica que tiveram impacto no nordeste também.





## APÊNDICES

APÊNDICE A. Esquema preparo e corte de amostras em serra de alta precisão IsoMet® 5000.

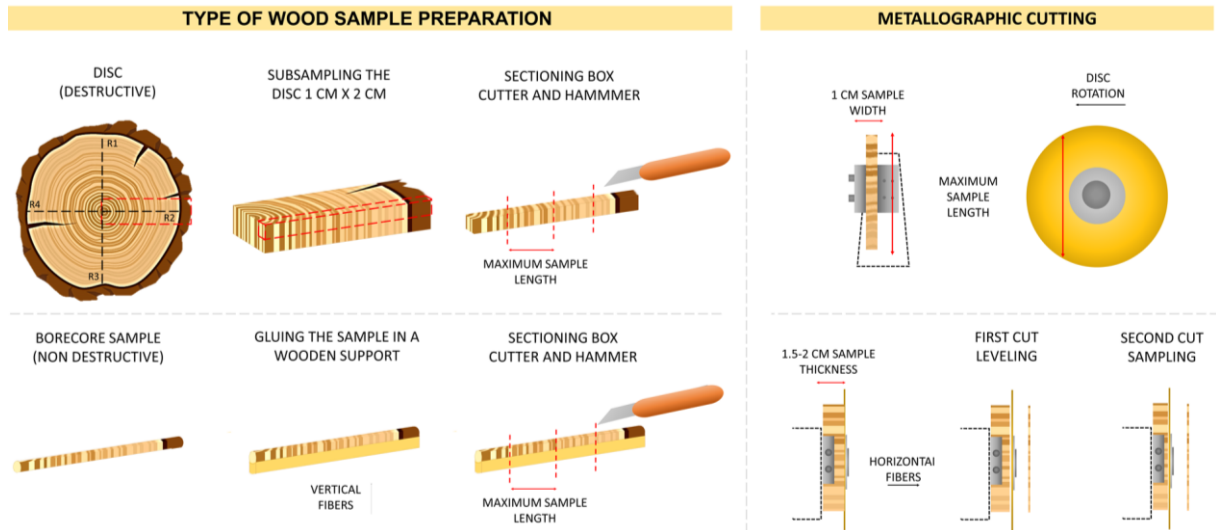
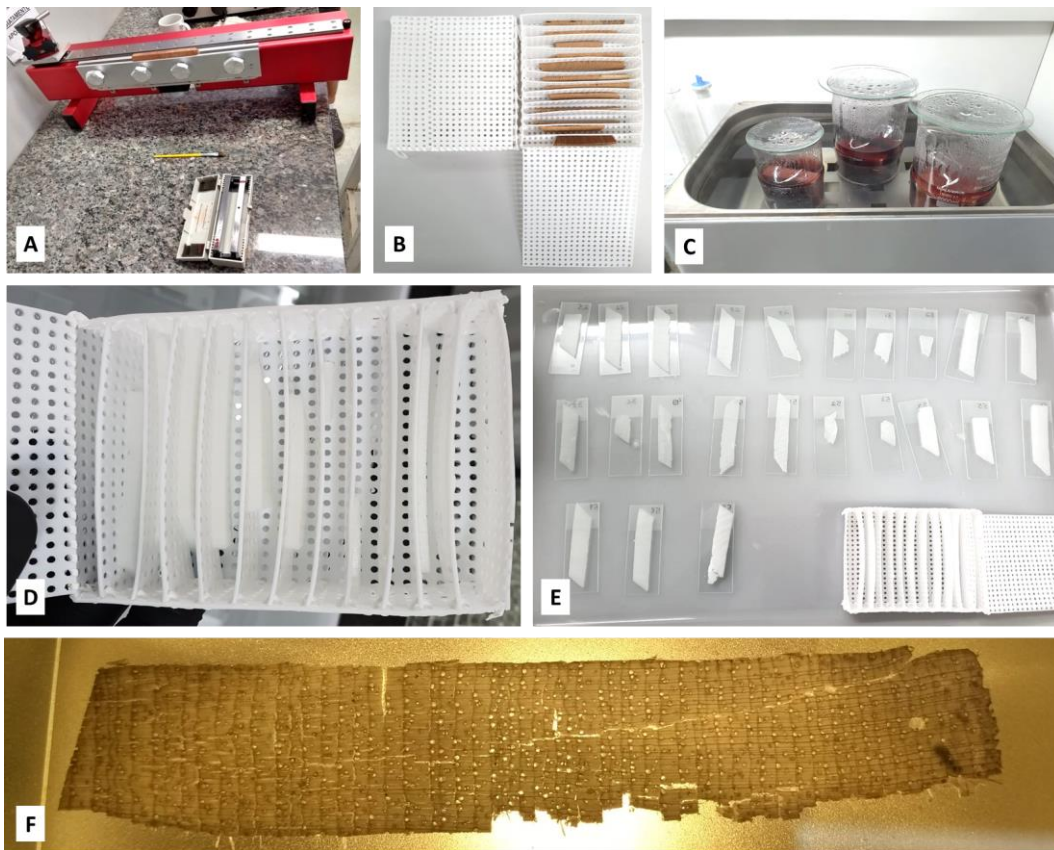


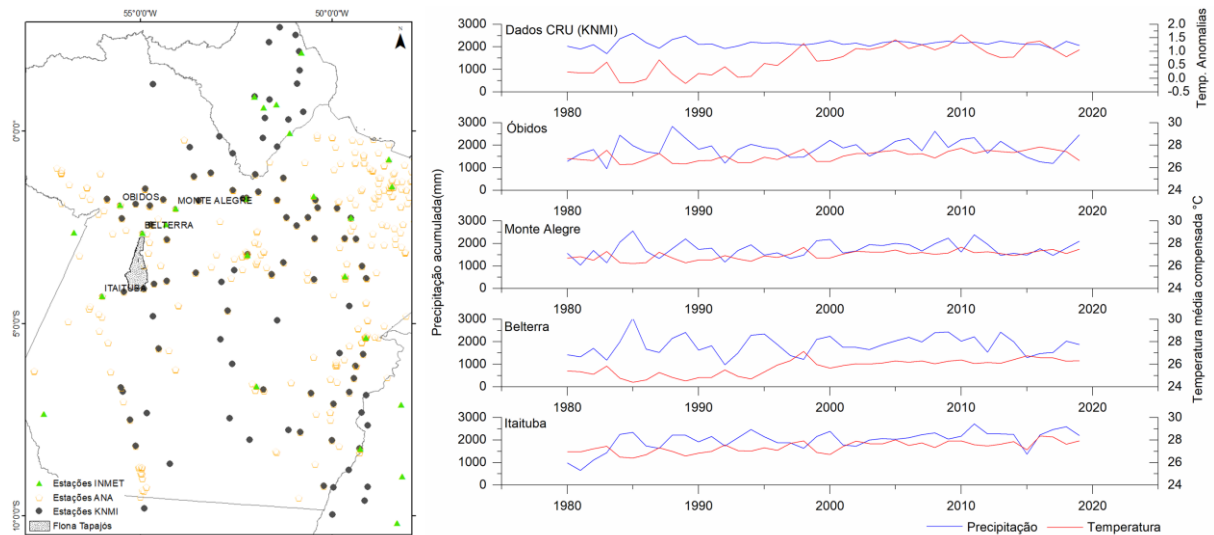
Figure 1. Preparo e corte de amostras em serra de alta precisão IsoMet® 5000, com 1 cm (largura) x 0,5 mm (espessura). Preparo de amostra conforme o tipo de amostragem (esquerda) e metodo de corte (direita).

APÊNDICE B. Preparo de amostras para análise de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{TR}}$ .

**Figure 2.** A) Polimento da seção transversal do lenho em micrótomo WSL. B/C/D) Caixa de PTFE para séries de ácido e base para extração da holocelulose. E) Amostra de holocelulose em lâminas histológicas, para secagem e remoção total da umidade em liofilizador. F) Amostra de holocelulose pronta para pesagem, evidenciando as bandas de parênquima marginal.

### APÊNDICE C. Análise da qualidade dos dados do CRU, para a área de estudo

O banco de dados meteorológico de anomalias de temperatura média do CRU, entre as coordenadas (2°--10°N, -56°--49°E), abrange 95 estações meteorológicas, as quais se encontram dentro do Brasil (Figura 7). Todas as estações encontram-se na base de dados do INMET e no Portal Hidroweb. Analisando a coerência das estações meteorológicas mais próximas (município de Belterra, Óbidos, Monte Alegre e Itaituba), entre os anos de 1980 e 2020, com a base de dados do KNMI, verifica-se que há boa coerência ( $r > 0.80$ ,  $p\text{-value} = 0.05$ ) com os dados de temperatura média compensada e as anomalias da temperatura média da região. Em relação a precipitação, a estação com maior correlação com os dados do KNMI é a de Belterra ( $r > 0.80$ ,  $p\text{-value} = 0.05$ ), as outras apresentam correlações variando de 0.5 a 0.73, sendo a mais baixa com a estação de Itaituba, a qual fica a mais de 160 km de distância das áreas de coleta. Dessa forma, considerando que a estação mais próxima da área de coleta é a de Belterra, entende-se que os dados do KNMI representam bem a variação climática da área de estudo. Desta forma, as correlações com o clima foram realizadas utilizando-se a base de dados do KNMI.



**Figure 3.** Mapa de estações meteorológicas usadas na base do CRU do KNMI sobreposta as estações meteorológicas do INMET e do HIDROWEB (esquerda). Dados de precipitação acumulada e temperatura média compensada das estações próximas da área de estudo e que apresentam ao menos 40 anos de dados mensurados (INMET, 2021).





