

Dendrocronologia e densitometria de raios X aplicados na avaliação das propriedades do lenho de árvores de *Tachigali vulgaris*, na Amazônia

Larissa Gonçalves Moraes
Gabriel de Assis-Pereira
Thiago de Paula Protásio
Lina Bufalino
Delman de Almeida Gonçalves
Mario Tomazello-Filho

Introdução

A dendrocronologia, palavra oriunda do grego (*dendro*: árvore, *crono*: tempo e *logia*: estudo), pode ser definida como a ciência que propicia a construção de cronologias a partir dos anéis de crescimento das árvores (Fritts, 1976; Cook; Kiriukstis, 1989). As árvores funcionam como sensores ambientais, com os seus processos fisiológicos relacionados diretamente com as variáveis ambientais, registrados como anéis de crescimento de resolução anual e datáveis conforme os anos do calendário (Fritts, 1976; Tomazello Filho et al., 2001).

No último século, a construção de longas cronologias a partir de anéis de crescimento das árvores e, sua replicação no espaço, possibilitou importantes avanços das análises climáticas, antropológicas e ecológicas em biomas florestais de clima temperado. Destacam-se as reconstruções de períodos de seca (Cook et al., 1999; Herweijer et al., 2006; Stahle et al., 2016; Morales et al., 2020), regime e frequência dos pulsos de inundações fluviais (Ballesteros-Canovas et al., 2015; Ferrero et al., 2015) e da dinâmica ecológica (Brienen et al., 2010; Zhang, 2015). Os anéis de crescimento e a construção de séries cronológicas podem ser aplicados em inventários florestais, como a proposta inserida no Inventário Florestal Nacional Norte-americano (Evans et al., 2022).

Nos biomas tropicais, o primeiro relato de formação de anéis de crescimento anuais em árvores de *Tectona grandis* na Ásia ocorreu na segunda metade do século XIX (Brandis, 1860; 1879) embora, somente, a partir de 1960, foram apresentados os primeiros estudos sistemáticos em dendrocronologia tropical em El Salvador e na Costa Rica (Hastenrath, 1963; Tschinkel, 1966). O menor desenvolvimento da dendrocronologia nos trópicos se deve, em parte, pelo entendimento de que as árvores apresentavam crescimento contínuo e com ausência de anéis de crescimento anuais, em comparação com a dendrocronologia das espécies de clima temperado (Schöngart et al., 2017).

Na Amazônia central, os primeiros estudos dendrocronológicos foram realizados a partir de 1980, relacionando a periodicidade das chuvas e os pulsos de inundações dos rios como indutores da dormência cambial nos troncos das árvores e induzindo a formação dos anéis de crescimento anuais (Worbes, 2002; Schöngart et al., 2017). A dendrocronologia tropical evoluiu com novas pesquisas no âmbito da reconstrução climática dos biomas florestais da bacia Amazônica (Brienen et al., 2012; Granato-Souza et al., 2019, 2020) e com a aplicação de parâmetros de manejo florestal sustentado de árvores de espécies ocorrentes nas várzeas pelo método *Growth-Oriented Logging* (Gol) (Schöngart, 2008), definindo o ciclo de corte e o diâmetro do tronco mínimo das árvores. A

dendrocronologia se constitui, atualmente, em importante ferramenta na datação e na avaliação do crescimento anual do tronco das árvores das espécies longevas da Amazônia tropical, contribuindo para a complementação do monitoramento das árvores em parcelas permanentes, instaladas nas últimas décadas.

Além da aplicação da dendrocronologia em árvores de florestas tropicais naturais, existe uma ampla perspectiva na análise dos anéis de crescimento de árvores de plantações florestais na Amazônia brasileira, com o objetivo de avaliar o crescimento do tronco e a qualidade do lenho. Dentre as inúmeras espécies utilizadas em plantações florestais, destaca-se *Tachigali vulgaris*, tachi-branco, cuja madeira pode suprir a demanda de carvão vegetal no polo siderúrgico de Carajás, o segundo do Brasil, além da madeira para suprimento de lenha para uso doméstico e para o abastecimento de usinas de cogeração de energia da região Norte do Brasil (Ramos et al., 2021; Silva et al., 2021a; Barros et al., 2022).

Para a produção de carvão vegetal são importantes os parâmetros produtividade volumétrica do lenho do tronco das árvores das plantações florestais e, da mesma forma, as suas propriedades anatômicas, físicas e químicas (Silva et al., 2021b; Barros et al., 2022). Na avaliação da produtividade do lenho das árvores de *T. vulgaris* se utilizam os métodos de dendrocronologia, enquanto que, para a análise da qualidade do lenho, principalmente a densidade, aplica-se a densitometria de raios X. No presente trabalho são apresentados os resultados da aplicação da dendrocronologia e da densitometria de raios X em árvores de *T. vulgaris* de plantações florestais, obtendo-se as séries temporais dos anéis de crescimento e, na sequência, a determinação do incremento anual em diâmetro do tronco, da densidade do lenho dos anéis de crescimento anuais, permitindo obter os valores anuais de biomassa e carbono do lenho. As séries cronológicas dos anéis de crescimento foram relacionadas com as variáveis climáticas, possibilitando verificar o efeito dos eventos *El Niño* no crescimento e na biomassa do lenho do tronco das árvores de tachi-branco.

Dendrocronologia aplicada no manejo de árvores de *Tachigali vulgaris* na Amazônia

As árvores de *Tachigali vulgaris* e a dendrocronologia

As árvores de *T. vulgaris* têm ampla ocorrência natural, além das plantações, nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Sul do Brasil e na floresta da Amazônia oriental peruana (Sousa et al., 2016), possibilitando a aplicação da dendrocronologia na avaliação das variáveis edafo-climáticas e o efeito no crescimento e desenvolvimento das árvores, nas propriedades do lenho, etc., incluindo a compreensão da vulnerabilidade dos domínios florestais tropicais frente às mudanças climáticas (Barbosa et al., 2012; Brien et al., 2016).

As árvores de tachi-branco são recomendadas para a recuperação de áreas degradadas, de acordo com Farias et al. (2016) que relataram o melhor desempenho das árvores no quarto ano, em sobrevivência (52%) e de produtividade do lenho (241,7 Mg ha⁻¹ de biomassa) em comparação com o híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*. Como biomassa para a geração de energia, as árvores de tachi-branco apresentam incremento médio anual acima de 40 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ (Souza et al., 2008), madeira com 0,490-0,633 g cm⁻³ e 4.390-4.567 kcal kg⁻¹ de densidade básica e de poder

calorífico superior, respectivamente (Tomaselli et al., 1983; Farias et al., 2016; Orellana et al., 2018; Silva et al., 2021a). Vale salientar que o incremento médio anual acima de 40 m³ foi identificado em áreas experimentais no estado do Amazonas. Entretanto, a depender do material genético, do manejo e das condições edafoclimáticas, essa produtividade em biomassa pode sofrer variações significativas.

A dendrocronologia pode prover informações precisas do incremento anual em diâmetro do tronco, volume, biomassa e densidade do lenho, considerados parâmetros importantes e necessários para a aplicação dos protocolos silviculturais para a análise do desenvolvimento e da produtividade das árvores em plantações florestais. Na floresta tropical da Amazônia, a exemplo dos demais biomas tropicais do mundo, são escassos os resultados da análise dos anéis de crescimento em relação às espécies de clima temperado, havendo necessidade da intensificação da aplicação da anatomia e da xilogênese (formação do lenho), do conhecimento dos fatores ecológico-ambientais que afetam a sazonalidade da atividade cambial e, desta forma, da aplicação de métodos de dendrocronologia (Schöngart et al., 2017; Ortega-Rodriguez et al., 2022).

Agrega-se, também, a necessidade da ampliação dos estudos de espécies potenciais para a dendrocronologia na Amazônia em relação às pesquisas atuais aplicadas a um número restrito de espécies. Essa ampliação de espécies e da área de ocorrência natural na floresta da Amazônia propiciará metodologias para a melhor compreensão das modificações do uso e cobertura da terra, do desmatamento, das mudanças climáticas etc., com a perspectiva de prever os impactos futuros e aplicar políticas públicas mitigadoras (Fontana et al., 2018; Albiero-Júnior et al., 2019). Em plantações florestais tropicais, a dendrocronologia possibilita a elaboração de protocolos de manejo sustentável das árvores relacionados com o ciclo de corte, de desbastes, avaliação contínua do ritmo de crescimento, da produção de biomassa e do carbono, da qualidade do lenho etc., contribuindo para o desenvolvimento socioambiental da região.

Caracterização dos anéis de crescimento do lenho de árvores de *Tachigali vulgaris*

Árvores de *T. vulgaris*, com idade de 8 anos, procedentes de área de plantação experimental de diferentes espaçamentos de plantio, instalada no distrito de Monte Dourado, no município de Almeirim, mesorregião do Baixo Amazonas, PA, foram selecionadas, cortadas e, em seguida, seccionadas (amostras do lenho, 3 cm de espessura) em diferentes alturas do seu tronco. Em condições de laboratório, as seções transversais do lenho foram polidas com lixas de diferentes granulometrias para destacar a sua estrutura anatômica macroscópica e os anéis de crescimento (Figura 1). As observações a olho nu e sob microscópio estereoscópico evidenciaram as regiões do alburno-cerne e os distintos anéis de crescimento demarcados por zona fibrosa escura e redução da frequência dos vasos (Figura 1B).

A demarcação do limite dos anéis de crescimento permitiu a contagem, comprovando a sua anuidade pela idade das árvores da plantação florestal e a avaliação da largura, pela imagem escaneada da seção transversal e aplicação de *software*, dos anéis de crescimento (Figura 1C). Observa-se uma diminuição da largura do anel de crescimento anual em função da idade cambial, independente do espaçamento de plantio, com o maior valor médio ocorrido no primeiro ano (2012: 18,02 mm; maior contribuição em relação ao raio do tronco) e menor valor nos anos seguintes (2016: 5,02; 2017: 4,22 e 2018: 3,89 mm).

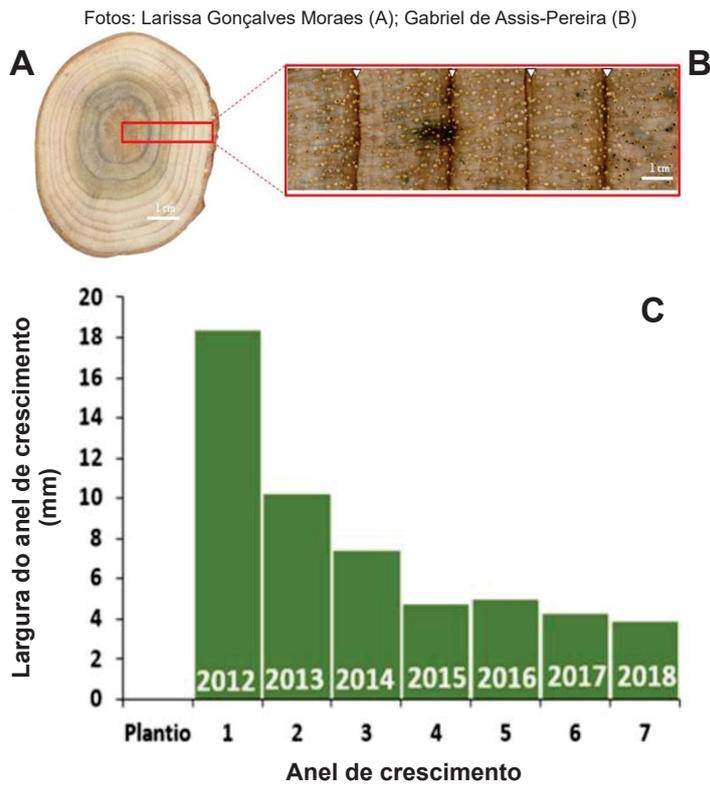


Figura 1. *Árvore de Tachigali vulgaris*: seção transversal do lenho do tronco (A); caracterização macroscópica (B) e largura dos anéis de crescimento anuais (C).

O resultado da análise da variância indicou efeito não significativo entre a interação da idade cambial *versus* espaçamento de plantio para a largura dos anéis de crescimento anuais, com significância apenas para a idade cambial, indicando que o crescimento do tronco foi influenciado pela idade das árvores de tachi-branco (Tabela 1). Essa redução da largura dos anéis de crescimento anuais em função da idade cambial reflete o comportamento biológico do crescimento do tronco das árvores dessa espécie, com a formação de anéis de crescimento largos pela atividade cambial nos primeiros anos; com a competição pelos fatores de crescimento e envelhecimento das células meristemáticas cambiais, os anéis de crescimento tornam-se gradativamente menores.

Tabela 1. Análise da variância de espaçamento *versus* anéis de crescimento de árvores de *Tachigali vulgaris*.

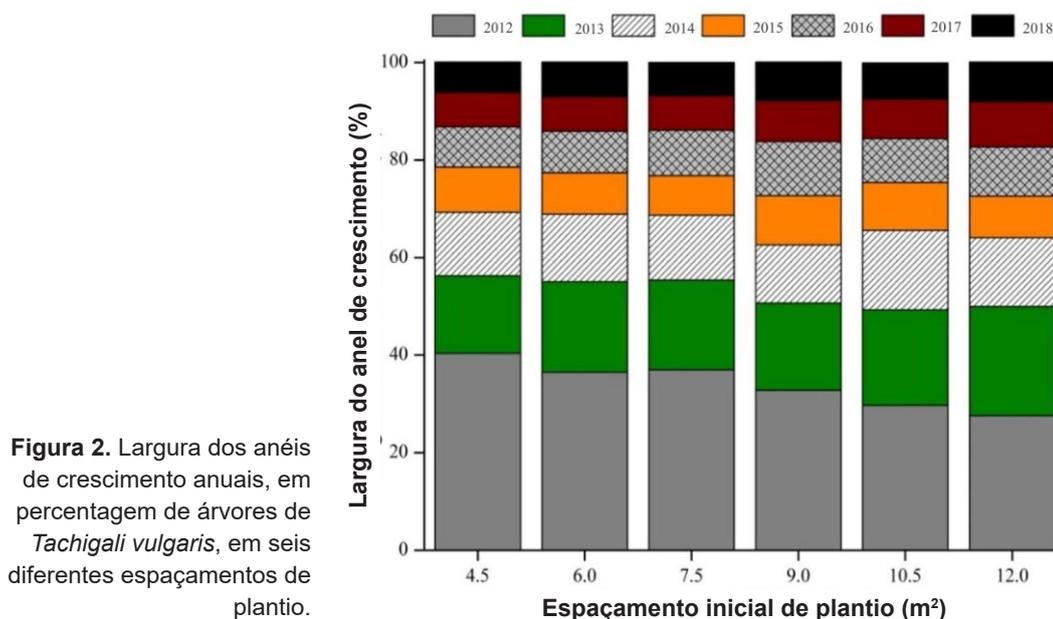
Fonte de Variação	GL	Largura do anel	
		QM	Fc
Espaçamento	5	9,46	3,30 ^{ns}
Bloco	2	4,81	1,68 ^{ns}
Erro a (parcela)	10	2,87	
Anel	6	463,41	117,41*
Espaçamento x Anel	30	3,60	0,911 ^{ns}
Erro b (subparcela)	72	3,95	
Total	120		
Cve ¹		22,18	
Cve ²		26,00	

Legenda: GL = graus de liberdade; QM = quadrado médio; Fc = Fcalculado; Cve¹ = coeficiente de variação experimental para parcela (%); Cve² = coeficiente de variação experimental para subparcela (%); * = significativo a 5% de significância; ^{ns} = não significativo a 5% de significância. *Análises realizadas a partir de discos retirados na altura do DAP.

A largura do anel de crescimento está, geralmente, associada ao crescimento do tronco das árvores e se constitui em parâmetro de qualidade da madeira para fins estruturais, indicando valores de 4-6 mm para árvores de *Pinus taeda* (Ortega-Rodriguez; Tomazello-Filho, 2019). Apesar da largura dos anéis de crescimento não ser o único parâmetro de qualidade para classificação de madeiras para fins energéticos, os valores registrados para a madeira de *T. vulgaris* podem ser considerados adequados, comparativamente a outras espécies utilizadas no Brasil.

Anéis de crescimento: largura versus espaçamento de plantio de árvores de *Tachigali vulgaris*

A representatividade da largura dos anéis de crescimento anuais (em porcentagem) em relação ao raio do lenho do tronco das árvores variou em relação ao espaçamento de plantio das árvores de tachi-branco, sendo que no (i) menor espaçamento ($4,5 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$) o primeiro anel de crescimento corresponde a 40%, seguindo-se (ii) os espaçamentos conferindo as áreas de 6,0; 7,5; 9,0; 10,5 e $12,0 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$ representando 36,5%, 37,0%, 32,8%, 29,7% e 27,6%, respectivamente. A variação radial da largura (mm) dos anéis de crescimento e a sua porcentagem em relação ao raio do lenho estão vinculados com o grau de disponibilidade dos fatores de crescimento (luz, água, nutrientes, etc.) ao longo da rotação da plantação das árvores de tachi-branco. Enquanto, no espaçamento mais restrito ($4,5 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$), a competição que se estabelece nos anos iniciais (primeiro anel de crescimento mais representativo em porcentagem), nos espaçamentos mais amplos ($9,0\text{-}12,0 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$) é gradual (anéis de crescimento correspondendo a 29,7-27,6%) entre as árvores de tachi-branco (Figura 2).



Importante destacar a correlação dos valores radiais (medula-casca) entre a (i) largura e porcentagem com a (ii) densidade aparente do lenho dos anéis de crescimento anuais formados no tronco das árvores de tachi-branco, obtida pela metodologia de densitometria de raios X. Essa metodologia caracteriza os anéis de crescimento anuais do (i) início do crescimento, maior largura/pequena densidade aparente (madeira juvenil, maior porcentagem de lenho inicial em relação ao tardio do anel de crescimento anual) em relação aos do (ii) final do crescimento, média largura/pequena densidade

(madeira adulta, porcentagem de lenho inicial em relação ao lenho tardio do anel de crescimento anual) das árvores de tachi-branco, no momento do corte (oitavo ano) (Figura 3). Portanto, apesar da não significância do espaçamento de plantio no raio (ou diâmetro) do tronco das árvores de tachi-branco, há importantes variações dos parâmetros de qualidade do lenho dos anéis de crescimento na direção radial (medula-casca) expressas pelos valores de densidade aparente do lenho e detectadas pela microdensitometria de raios X. Esses fatores silviculturais (espaçamentos) e da xilogênese (formação e características anatômicas e física dos anéis de crescimento) influenciam as propriedades e características tecnológicas da madeira e, conseqüentemente, seus usos e aplicações.

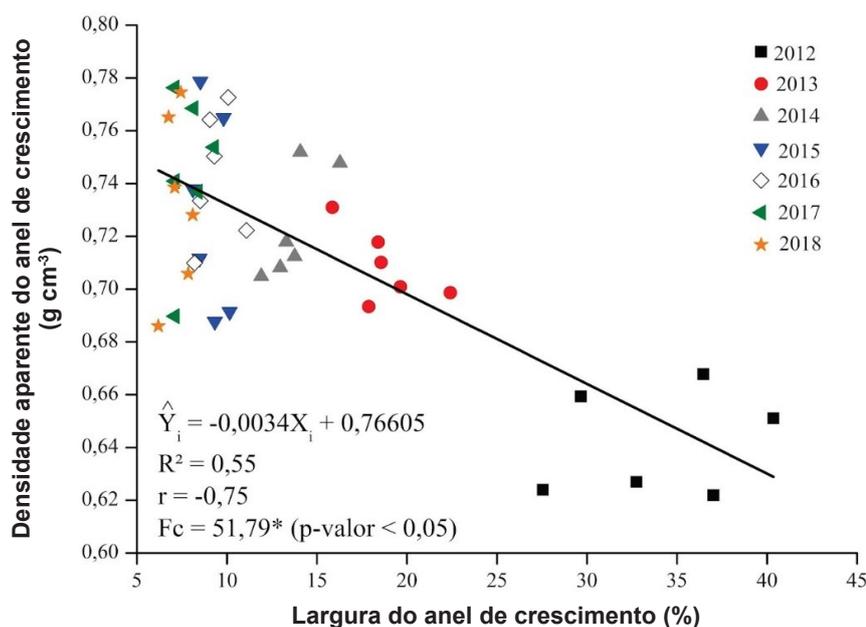


Figura 3. Correlação entre largura e densidade aparente dos anéis de crescimento anuais do lenho de árvores de *Tachigali vulgaris*, aos oito anos de idade.

Anéis de crescimento: volume, biomassa e carbono de árvores de *Tachigali vulgaris*

Os resultados dos inventários florestais associados à avaliação da largura dos anéis de crescimento anuais possibilitaram estimar o volume do lenho por ano (m^3) do tronco das árvores de tachi-branco, com a utilização de relações hipsométricas e equações de volume. Observa-se que, nos anos iniciais (1^o-4^o anos) do crescimento em altura-diâmetro do tronco das árvores, compreendendo o período de 2012-2015, os valores de volume do lenho do tronco foram variáveis, com tendência à estabilização (5^o-7^o anos), no período 2016-2018 (Figura 4A). Os resultados indicam que o manejo silvicultural das árvores de tachi-branco da plantação experimental, nos espaçamentos avaliados (4,5-12 m^2 árvore⁻¹) devem ser aplicados entre o 5^o-6^o ano, nestas condições de sítio.

A densidade aparente do lenho dos anéis de crescimento anuais, determinada pela densitometria de raios X, possibilita obter os correspondentes valores de biomassa e do teor de C por anel de crescimento anual do tronco das árvores de tachi-branco (Figura 4B e 4C). Os resultados indicam que a variação anual da biomassa e do carbono no lenho dos anéis de crescimento, a exemplo do volume, apresentou variações até o 4^o ano e, com tendência à estabilização do 5^o ao 7^o anel de crescimento.

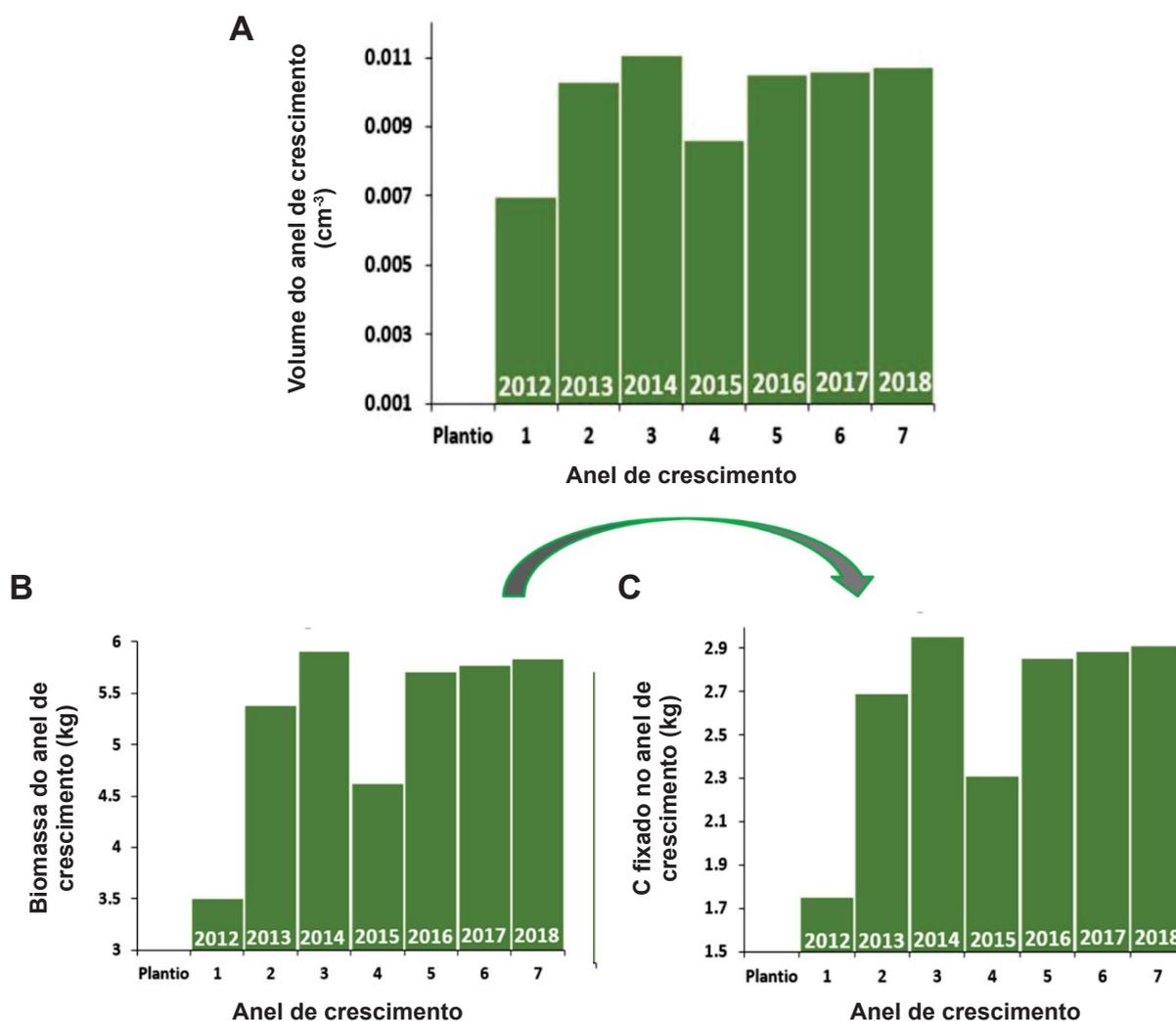


Figura 4. Volume, biomassa e carbono dos anéis de crescimento anuais de árvores de *Tachigali vulgaris*.

Os valores de incrementos em biomassa e C nos anéis de crescimento anuais do lenho, obtidos pela aplicação da dendrocronologia e da densitometria de raios X nas árvores de tachi-branco, são fundamentais e imprescindíveis na avaliação contínua da produtividade florestal sustentável das plantações florestais (Bouriaud et al., 2015).

Anéis de crescimento: mapa da densidade do lenho de árvores de *Tachigali vulgaris*

A análise da seção transversal do lenho do tronco das árvores de tachi-branco permite observar uma distinta demarcação do cerne (xilema não funcional, com extrativos) e do alborno (xilema funcional, com carboidratos não estruturais) (Figura 5A e 5B) importante para a caracterização tecnológica da madeira e avaliação da resistência natural aos agentes xilófagos. A mesma seção transversal do lenho, avaliada pelas imagens digitais obtidas no equipamento de raios X (Figura 5C) e multiespectral (Figura 5D), permite verificar as regiões de maior densidade do lenho, caracterizadas pelo lenho tardio dos anéis de crescimento anuais e pelo lenho de tração, expressos pela coloração mais clara (pela maior atenuação à passagem dos raios X). Pelos mesmos parâmetros, observam-se regiões de menor densidade (regiões centrais do lenho, no entorno da medula, madeira juvenil) e de maior

densidade (regiões periféricas do lenho, próximas à casca, madeira adulta) e do lado contrário da inclinação do tronco (lenho de tração, com fibras com a camada G layer).

Os perfis radiais de microdensidade dos anéis de crescimento das amostras do lenho, coletadas ao longo da altura do tronco das árvores, possibilitaram, a exemplo dos resultados apresentados por Jacquin et al. (2017) e Schimleck et al. (2020), a construção dos mapas de variação da densidade do tronco das árvores de tachi-branco (Figura 5D), associando-se com o *software* QGIS. A análise do mapa de variação da densidade do tronco permite inferir sobre importantes aspectos da xilogênese, da biomecânica e das propriedades, usos e aplicações da madeira, incluindo a avaliação do efeito dos tratamentos silviculturais. Desta forma, o mapa do tronco da árvore de tachi-branco (tratamento $4,5 \text{ m}^2 \text{ árvore}^{-1}$) expressa regiões internas do lenho de menor densidade, e, externas, de maior densidade. O valor máximo da densidade aparente do lenho ocorre na base do tronco da árvore, sendo caracterizada pelo lenho de tração (Figura 5C e 5D). A variação da densidade aparente do lenho na direção base-topo e medula-casca do tronco da árvore de tachi-branco é importante para a definição dos tratamentos silviculturais e preconização dos parâmetros de qualidade e de utilização da madeira.

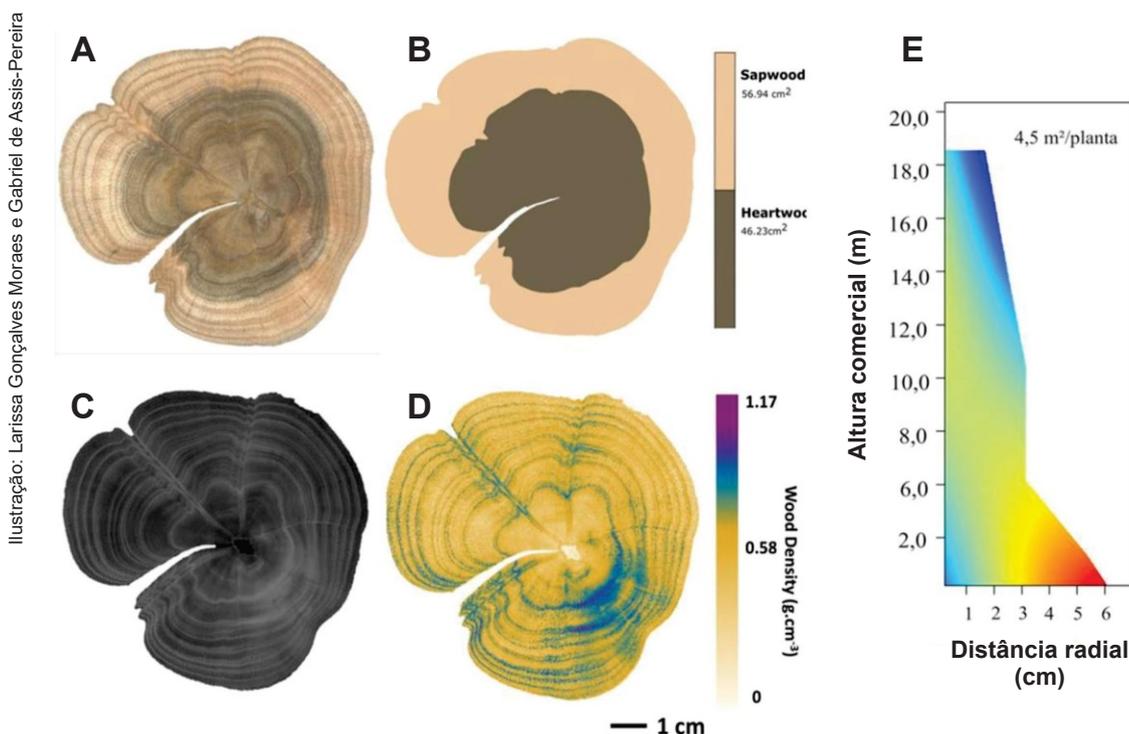


Figura 5. Seção transversal do lenho do tronco de árvore de *Tachigali vulgaris*: anéis de crescimento e cerne-alburno (A e B); imagem radiográfica e multiespectral do lenho, com a variação da densidade aparente (C e D) e mapa do tronco com a variação da densidade aparente do lenho (E).

Anéis de crescimento: avaliação do efeito de eventos *El Niño* em árvores de *T. vulgaris*

Eventos climáticos extremos na Floresta Amazônica resultam em impactos socioeconômicos severos, tais como a diminuição da produção agrícola e o transporte de bens e pessoas (Aragão et al., 2018; Ribeiro et al., 2022). Em anos de seca, os processos fisiológicos das árvores nos biomas são alterados, como é o caso da absorção do carbono, pela diminuição da fotossíntese e da produtivi-

dade primária líquida, o que pode acarretar impactos globais no clima e no ciclo do carbono (Brando et al., 2014).

A variabilidade climática na Amazônia é ligada aos eventos *El Niño* Oscilação Sul (ENOS), associado aos anos de ocorrência de seca (Aragão et al., 2018; Ribeiro et al., 2022), destacando-se o período de seca dos anos de 2015/2016 sendo uma dos maiores já registrados na Floresta Amazônica e intensificado devido às ações antrópicas (Ribeiro et al., 2022).

Na análise da taxa de crescimento do tronco, no ano de 2015, foi observada uma redução expressiva do volume, biomassa e fixação de carbono pelas árvores de *T. vulgaris* (Figura 4). As variáveis climáticas regionais podem ser expressas pelo Índice de Precipitação-Evapotranspiração Padronizado (Índice de Seca SPEI) (SPEI Global Drought Monitor, 2022) e indicados na Figura 6 por dois anos climaticamente distintos, 2015 e 2011, pela intensidade de seca e de precipitação pluvial, respectivamente. Na região, as chuvas estão concentradas nos meses de janeiro a junho, com aproximadamente 78% do total anual (Zepner et al., 2020). Assim na Figura 4 é apresentado o Índice de Seca SPEI semestre mais chuvoso.

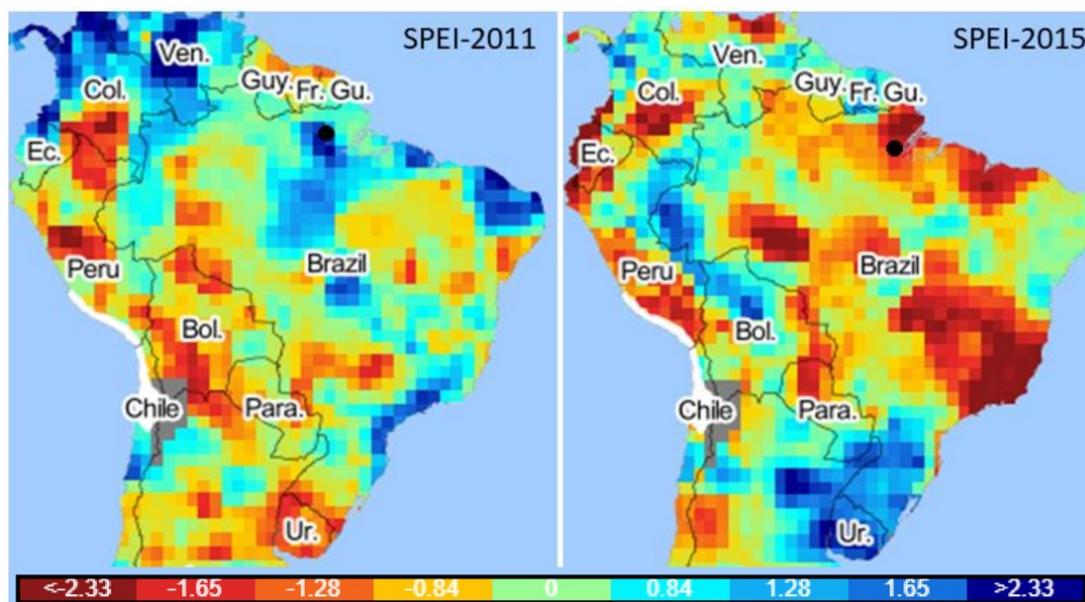


Figura 6. Mapas de SPEI (janeiro-junho) com padrões de variação de seca: ano chuvoso (2011) e seco (2015).

Legenda: Cor azul representa anos mais chuvosos e cor vermelha representam anos mais secos. O mapa e a série temporal mostram dados de seis meses, com índice SPEI calculado a partir de janeiro.

Fonte: SPEI (2022).

O período de seca dos anos de 2015/2016 é resultante do evento *El Niño*, com início no final de 2014, que perdurou até meados de 2016, caracterizado pela uma longa estiagem na região Norte do Brasil (Jiménez-Muñoz et al., 2016) e incluindo as áreas próximas do povoamento experimental de *T. vulgaris*. As árvores de tachi-branco evidenciaram esse período na formação e nas características dos seus anéis de crescimento, comprovando a sua resposta fisiológica-anatômica às variáveis ambientais e indicando o seu potencial para estudos de dendrocronologia e dendroclimatologia.

A reação das árvores de tachi-branco ao período de seca é coincidente com a reação das árvores de *Cedrela fissilis* ocorrentes na Floresta Estadual do Paru, próxima à do Rio Jari, indicando um efeito regional e amplo da região afetada pelo estresse hídrico. Desta forma, as árvores de

C. fissilis, comprovadamente potenciais para a dendrocronologia, a exemplo das de tachi-branco, apresentam uma significativa resposta na formação e nas características dos anéis de crescimento à variabilidade das precipitações pluviais regionais, possibilitando a reconstrução hidroclimática retroativa aos períodos pré-instrumentais (Granato-Souza et al., 2019; 2020). Ainda, a retomada dos índices de produtividade das árvores de tachi-branco, no ano de 2016, evidencia a sua resiliência aos fatores ambientais adversos.

Considerações finais

Os resultados do presente trabalho permitem concluir que os parâmetros de crescimento e de qualidade do lenho, incluindo a formação e características dos anéis de crescimento anuais, das árvores de tachi-branco são efetivamente analisados pela aplicação das metodologias de dendrocronologia e de densitometria de raios X. As análises permitem reconstruir o histórico do crescimento do tronco das árvores, a variação da largura, densidade, massa e C no lenho dos anéis de crescimento anuais. Da mesma forma, o uso destas metodologias também permite a construção dos mapas do tronco expressando a variação da densidade do lenho das árvores de tachi-branco. Verifica-se ainda a correlação entre os parâmetros dos anéis de crescimento das árvores e o efeito das variáveis ambientais e, especificamente do evento *El Niño* de 2015-2016. Esses resultados, associados ao crescimento das árvores de tachi-branco em diferentes espaçamentos de plantio, permitem associar as práticas de manejo silvicultural, visando à uma maior produtividade e qualidade do lenho para os inúmeros usos e aplicações. As metodologias aplicadas se mostraram efetivas e potenciais para ampliar com precisão os estudos de quantificação de biomassa e de carbono e biomassa das árvores de tachi-branco e de outras espécies do bioma Amazônia.

Agradecimentos e fonte de financiamento

Os autores agradecem ao Laboratório de Anatomia e Identificação da Madeira da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo (Esalq/USP), ao Laboratório de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais da Universidade Federal Rural da Amazônia (Ufra), à Embrapa Amazônia Oriental, aos Programas de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Ufra e Recursos Florestais da Esalq-USP, à Empresa Jari Celulose S.A., ao Programa de Cooperação Acadêmica - Procad Amazônia (Edital 21/2018, Proc. 23038.005350/2018-78), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes - Código financiamento: 001); à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp-NSF), ao *Partnership for International Research and Education da National Science Foundation* (PIRE/NSF - Proc. 2017/50085-3) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, Processo 306793/2019-9).

Referências

- ALBIERO-JÚNIOR, A.; CAMARGO, J. L. C.; ROIG, F. A.; SCHÖNGART, J.; PINTO, R. M.; VENEGAS-GONZÁLEZ, A.; TOMAZELLO-FILHO, M. Amazonian trees show increased edge effects due to Atlantic Ocean warming and northward displacement of the Intertropical Convergence Zone since 1980, **Science of The Total Environment**, v. 693, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.321>.
- ARAGÃO, L. E. O. C.; ANDERSON, L. O.; FONSECA, M. G.; ROSAN, T. M.; VEDOVATO, L. B.; WAGNER, F. H.; SILVA, C. V. J.; SILVA JUNIOR, C. H. L.; ARAI, E.; AGUIAR, A. P.; BARLOW, J.; BERENQUER, E.; DEETER, M. N.; DOMINGUES, L. G.; GATTI, L.; GLOOR, M.; MALHI, Y.; MARENGO, J. A.; MILLER, J. B.; SAATCHI, S. 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, 536, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02771-y>.
- BALLESTEROS-CANOVAS, J. A.; STOFFEL, M.; ST GEORGE, S.; HIRSCHBOECK, K. A review of flood records from tree rings. **Progress in Physical Geography**, v. 39, n. 6, p. 794-816, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1177/0309133315608758>.
- BARBOSA, J. P. R. A. D.; RAMBAL, S.; SOARES, A. M.; MOUILLOT, F.; NOGUEIRA, J. M. P.; MARTINS, G. A. Plant physiological ecology and the global changes. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 36, p. 253-269, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542012000300001>.
- BARROS, U. O.; ROSÁRIO, W. A. S.; LIMA, M. D. R.; SILVA, M. O. S.; PATRÍCIO, E. P. S.; GONÇALVES, D. A.; BUFALINO, L.; PROTÁSIO, T. P. Effects of tree spacing and forking on the modification of wood density in a trial plantation of *Tachigali vulgaris* for energy in Amazônia. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 34, n. 1, p. 11-23, 2022. DOI: <https://doi.org/10.26525/jtfs2022.34.1.11>.
- BRANDIS, D. **Report on the teak forests of Pegu**: A memorandum on the teak in the Tharawaddy forests. HM Stationery Office, 1860.
- BRANDIS, D. Memorandum on the rate of growth of teak. **Indian Forester**, v. 4, n. 3, p. 215-225, 1879.
- BOURIAUD, O.; TEODOSIU, M.; KIRDYANOV, A. V.; WIRTH, C. Influence of wood density in tree ring-based annual productivity assessments and its errors in Norway spruce. **Biogeosciences**, v. 12, p. 6205-6217, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-12-6205-2015>.
- BRANDO, P. M.; BALCH, J. K.; NEPSTAD, D. C.; MORTON, D. C.; PUTZ, F. E.; COE, M. T.; SILVÉRIO, D.; MACEDO, M. N.; DAVIDSON, E. A.; NÓBREGA, C. C.; ALENCAR, A.; SOARES-FILHO, B. S. Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 111, n. 17, p. 6347-6352, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1305499111>.
- BRIENEN, R. J. W.; HELLE, G.; PONS, T. L.; GUYOT, J. L.; GLOOR, M. Oxygen isotopes in tree rings are a good proxy for Amazon precipitation and El Niño-Southern Oscillation variability. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 109, n. 42, p. 16957-16962, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1205977109>.
- BRIENEN, R. J. W.; ZUIDEMA, P. A.; MARTÍNEZ-RAMOS, M. Attaining the canopy in dry and moist tropical forests: Strong differences in tree growth trajectories reflect variation in growing conditions. **Oecologia**, v. 163, n. 2, p. 485-496, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00442-009-1540-5>.
- BRIENEN, R. J. W.; SCHÖNGART, J.; ZUIDEMA, P. A. Tree rings in the Tropics: Insights into the ecology and climate sensitivity of tropical trees. In: GOLDSTEIN, G.; SANTIAGO, L. (ed.). **Tropical tree physiology**. Switzerland: Springer, 2016. p. 439 - 461. (Tree Physiology book series, v. 6). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-27422-5_20.
- COOK, E. R.; KAIRIUKSTIS, L. A. **Methods of dendrochronology**: Applications in the environmental sciences. Netherlands: Academic Publishers, 1989. 394 p.
- COOK, E. R.; MEKO, D. M.; STAHL, D. W.; CLEAVELAND, M. K. Drought reconstructions for the continental United States. **Journal of Climate**, v. 12, p. 1145-1162, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1145:DRFTCU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1145:DRFTCU>2.0.CO;2).
- EVANS, M. E. K.; DEROSE, R. J.; KLESSE, S.; GIRARDIN, M. P.; HEILMAN, K. A.; ALEXANDER, M. R.; ARSENAULT, A.; BABST, F.; BOUCHARD, M.; CAHOON, S. M. P.; CAMPBELL, E. M.; DIETZE, M.; DUCHESNE, L.; FRANK, D. C.; GIEBINK, C. L.; GÓMEZ-GUERRERO, A.; GARCÍA, G. G.; HOGG, E. H.; METSARANTA, J.; GAYTÁN, S. A. V. Adding tree rings to North America's National Forest Inventories: An essential tool to guide drawdown of atmospheric CO₂. **BioScience**, v. 72, n. 3, p. 233-246, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1093/biosci/biab119>.

- FARIAS, J.; MARIMON, B.; SILVA, L.; PETTER, F. A.; ANDRADE, F. R.; MORANDI, P.; MARIMON JUNIOR, B. H. Survival, and growth of native *Tachigali vulgaris* and exotic *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* trees in degraded soils with biochar amendment in southern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 368, p. 173-182, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.03.022>.
- FERRERO, M. E.; VILLALBA, R.; MEMBIELA, M. de; FERRI HIDALGO, L.; LUCKMAN, B. H. Tree-ring based reconstruction of Río Bermejo streamflow in subtropical South America. **Journal of Hydrology**, v. 525, p. 572-584, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.004>.
- FONTANA, C.; REIS-AVILA, G.; NABAIS, C.; BOTOSSO, P. C.; OLIVEIRA, J. M. Dendrochronology, and climate in the Brazilian Atlantic Forest: Which species, where and how. **Neotropical Biology and Conservation**, v. 13, n. 4, p. 321-333, 2018. DOI: <https://doi.org/10.4013/nbc.2018.134.06>.
- FRITTS, H. C. **Tree rings and climate**. Caldwell: Blackburn Press, 1976. 567 p.
- GRANATO-SOUZA, D.; STAHL, D. W.; BARBOSA, A. C.; FENG, S.; TORBENSON, M. C. A.; ASSIS-PEREIRA, G. de; SCHÖNGART, J.; BARBOSA, J. P.; GRIFFIN, D. Tree rings and rainfall in the equatorial Amazon. **Climate Dynamics**, v. 52, n. 3/4, p. 1857-1869, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4227-y>.
- GRANATO-SOUZA, D.; STAHL, D. W.; TORBENSON, M. C. A.; HOWARD, I. M.; BARBOSA, A. C.; FENG, S.; FERNANDES, K.; SCHÖNGART, J. Multidecadal changes in wet season precipitation totals over the eastern Amazon. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n. 8, p. 1-9, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020GL087478>.
- HASTENRATH, S. Dendrochronologie in El Salvador. **Meteorol Rundsch**, v. 4, p.110-113, 1963.
- HERWEIJER, C.; SEAGER, R.; COOK, E. R. North American droughts of the mid to late nineteenth century: A history, simulation, and implication for Mediaeval drought. **Holocene**, v. 16, n. 2, p. 159-171, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1191/0959683606h917rp>.
- JACQUIN, P.; LONGUETAUD, F.; LEBAN, J. M.; MOTHE, F. X-ray microdensitometry of wood: A review of existing principles and devices. **Dendrochronologia**, v. 42, p. 42-50, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.01.004>.
- JIMÉNEZ-MUÑOZ, J.; MATTAR, C.; BARICHIVICH, J.; SANTAMARÍA-ARTIGAS, A.; TAKAHASHI, K.; MALHI, Y.; SOBRINO, J. A.; SCHRIER, G. V. D. Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015-2016. **Scientific Reports**, v. 6, 33130, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep33130>.
- MORALES, M. S.; COOK, E. R.; BARICHIVICH, J.; CHRISTIE, D. A.; VILLALBA, R.; LEQUESNE, C.; SRUR, A. M.; EUGENIA FERRERO, M.; GONZÁLEZ-REYES, A.; COUVREUX, F.; MATSKOVSKY, V.; ARAVENA, J. C.; LARA, A.; MUNDO, I. A.; ROJAS, F.; PRIETO, M. R.; SMERDON, J. E.; BIANCHI, L. O.; MASIOKAS, M. H.; BONINSEGNA, J. A. Six hundred years of South American tree rings reveal an increase in severe hydroclimatic events since mid-20th century. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 117, n. 29, p. 16.816-16.823, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2002411117>.
- ORELLANA, B. B. M.; VALE, A. T. do; GONÇALEZ, J.; GUEDES, M. C.; ORELLANA, J. B. P.; LIMA, C. M. Produtividade energética da madeira de *Tachigali vulgaris* por classe diamétrica em plantios experimentais na Amazônia. **Nativa**, v. 6, p. 773-781, 2018. DOI: <https://doi.org/10.31413/nativa.v6i0.5130>.
- ORTEGA-RODRIGUEZ, D. R.; TOMAZELLO-FILHO, M. Clues to wood quality and production from analyzing ring width and density variabilities of fertilized *Pinus taeda* trees. **New Forests**, v. 50, n. 5, p. 821-843, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-018-09702-9>.
- RAMOS, L. de O.; MIRANDA, R. O. V. de; SOARES, A. A. V.; PAULA PROTÁSIO, T. de; GONÇALVES, D. de A. Wood volumetry of *Tachigali vulgaris* pure plantations in different planting spacings. **Floresta**, v. 51, n. 4, p. 990-999, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5380/rev.v51i4.75138>.
- RIBEIRO, G. G.; ANDERSON, L. O.; BARRETOS, N. J. C.; ABREU, R.; ALVES, L.; DONG, B.; LOTT, F. C.; TETT, S. F. B. Attributing the 2015/2016 Amazon basin drought to anthropogenic influence. **Climate Resilience and Sustainability**, v. 1, e25, 2022. 10 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/cli.25>.
- SCHIMLECK, L. R.; ANTONY, F.; MORA, C.; DAHLEN, J. Whole-tree tracheid property maps for loblolly pine at different ages. **Wood Science and Technology**, v. 54, n. 3, p. 683-701, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01180-7>.
- SCHÖNGART, J. Growth-Oriented Logging (GOL): A new concept towards sustainable forest management in Central Amazonian várzea floodplains. **Forest Ecology and Management**, v. 256, n. 1/2, p. 46-58, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.03.037>.

SCHÖNGART, J.; BRÄUNING, A.; BARBOSA, A. C. M. C.; LISI, C. S.; OLIVEIRA, J. M. de. Dendroecological studies in the neotropics: History, status and future challenges. In: AMOROSO, M.; DANIELS, L.; BAKER, P.; CAMARERO, J. (ed.). **Dendroecology: Tree-Ring Analyses Applied to Ecological Studies**. Switzerland: Springer, 2017. p. 35-73. (Ecological Studies, v. 231). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-61669-8_3.

SILVA, M. O. dos S.; SILVA, M. G. da; BUFALINO, L.; ASSIS, M. R. de; GONÇALVES, D. de A.; TRUGILHO, P. F.; PROTÁSIO, T. de P. Características termogravimétricas e combustão da madeira de *Tachigali vulgaris* proveniente de plantios com diferentes espaçamentos. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 129, p. 1-15, 2021a. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n129.01>.

SILVA, M. O. dos S.; SILVA, M. G. da; BUFALINO, L.; ASSIS, M. R. de; GONÇALVES, D. A.; TRUGILHO, P. F.; PROTÁSIO, T. de P. Variations in productivity and wood properties of Amazonian tachi-branco trees planted at different spacing for bioenergy purposes. **Journal of Forestry Research**, v. 32, p. 211-224, 2021b. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01068-8>.

SOUSA, V. G.; BRIENZA JÚNIOR, S.; BARBOSA, M. G.; MARTORANO, L. G.; SILVA, V. C. **Taxi-branco (*Tachigali vulgaris* L. F. Gomes da Silva & H. C. Lima)**: botânica, ecologia e silvicultura. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2016. 37 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 426). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1062064/1/DOCUMENTOS426Ainfo.pdf>. Acesso em: 20 out. 2022.

SOUZA, C. R.; LIMA, R. M. B.; AZEVEDO, C. P.; ROSSI, M. B. Desempenho de espécies florestais para uso múltiplo na Amazônia. **Scientia Forestalis**, v. 36, n. 77, p. 7-14, 2008. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/176297/1/cap01.pdf>. Acesso em: 20 out. 2022.

SPEI. **SPEI Global Drought Monitor**, 2022. Disponível em: <https://spei.csic.es/map/maps.html#months=1#month=2#year=2022>. Acesso em: 20 out. 2022.

STAHLE, D. W.; COOK, E. R.; BURNETTE, D. J.; VILLANUEVA, J.; CERANO, J.; BURNS, J. N.; GRIFFIN, D.; COOK, B. I.; ACUÑA, R.; TORBENSON, M. C. A.; SJEZNER, P.; HOWARD, I. M. The Mexican Drought Atlas: Tree-ring reconstructions of the soil moisture balance during the late pre-Hispanic, colonial, and modern eras. **Quaternary Science Reviews**, v. 149, p. 34-60, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.06.018>.

TOMASELLI, I.; MARQUES, L. C. T.; CARPANEZZI, A. A.; PEREIRA, J. C. D. Caracterização da madeira de tachi-branco da terra firme (*Sclerolobium paniculatum* VOGEL) para energia. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 6/7, p. 33-44, 1983. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/48399/1/itomaselli.pdf>. Acesso em: 20 out. 2022.

TOMAZELLO FILHO, M.; BOTOSSO, P. C.; LISI, C. S. Análise e aplicação dos anéis de crescimento das árvores como indicadores ambientais: dendrocronologia e dendroclimatologia. In: MAIA, N. B.; MARTOS, H. L.; BARRELLA, W. (ed.). **Indicadores ambientais: conceitos e aplicações**. São Paulo: Educ, 2001. p. 117-143.

TSCHINKEL, H. M. Annual growth rings in *Cordia alliodora*. **Turrialba**, v. 16, p. 73-80, 1966.

WORBES, M. One hundred years of tree-ring research in the tropics – A brief history and an outlook to future challenges. **Dendrochronologia**, v. 20, n. 1/2, p. 217-231, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1078/1125-7865-00018>.

ZEPNER, L.; KARRASCH, P.; WIEMANN, F.; BERNARD, L. ClimateCharts.net – an interactive climate analysis web platform. **International Journal of Digital Earth**, p. 338-356, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1829112>.

ZHANG, Z. Tree-rings, a key ecological indicator of environment and climate change. **Ecological Indicators**, v. 51, p. 107-116, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.07.042>.