

Densitometria de raios X aplicada à caracterização da variação de densidade aparente da madeira de *Anadenanthera colubrina*

Gabriela Morais Olmedo^{1,2}; Jonathan Dias Marques³; Juliano Morales de Oliveira⁴; Gabriel Assis-Pereira²; Mario Tomazello-Filho²

¹ Universidade de São Paulo (USP), Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), Piracicaba/SP, Brasil; ² Universidade de São Paulo (USP), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), Piracicaba/SP, Brasil; ³ Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Belém/PA, Brasil; ⁴ Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo/RS, Brasil.

Resumo: Estudos utilizando como base os anéis de crescimento de árvores fornecem dados anuais valiosos. A aplicação de técnicas de densitometria de raios X em camadas de crescimento vem sendo utilizadas para avaliar propriedades físicas da madeira, sobretudo a densidade aparente. No entanto, essa metodologia é pouco explorada na Mata Atlântica. O objetivo deste trabalho foi caracterizar a densidade aparente da madeira de *Anadenanthera colubrina* na Mata Atlântica no sentido radial e em diferentes alturas. A densidade aparente apresentou variação conforme a altura, sendo maior na base e topo e esta variação está associada à idade e à inserção de galhos, respectivamente. A densitometria de raios X mostrou-se eficaz na caracterização da densidade longitudinal e radial, oferecendo *insights* sobre o papel ecológico da espécie na Mata Atlântica.

Palavras-chave: Mata Atlântica, anéis de crescimento, dendrocronologia.

X-ray densitometry applied to characterize the variation in apparent density of *Anadenanthera colubrina* wood

Abstract: Studies based on tree growth rings provide valuable annual data. The application of X-ray densitometry techniques on growth layers has been used to assess the physical properties of wood, particularly the apparent density. However, this methodology is underexplored in the Atlantic Forest. The objective of this work was to characterize the apparent density of *Anadenanthera colubrina* wood in the Atlantic Forest in the radial direction and at different heights. The apparent density varied with height, being higher at the base and top and this range associated with age and branch insertion, respectively. X-ray densitometry proved effective in characterizing longitudinal and radial density, offering insights into the ecological role of the species in the Atlantic Forest.

Keywords: Atlantic Forest, growth ring, dendrochronology.

1. INTRODUÇÃO

Estudos utilizando como base os anéis de crescimento de espécies arbóreas podem prover informações valiosas e em resolução anual (Bouriaud et al. 2015). Neste contexto, a aplicação de técnicas de densitometria de raios X em anéis de crescimento pode ser empregada para a avaliação quantitativa das propriedades físicas da madeira (Tomazello et al., 2008). Por meio desta técnica é possível determinar os perfis de densidade do lenho e, com base nestes valores, obter a biomassa e carbono assimilado de forma anual (Pompa-Garcia et al., 2008). Além disso, avaliando a variação da densidade com amostras da madeira no sentido base-topo da árvore, é possível compreender informações importantes quanto a ecologia da espécie e a tecnologia da madeira, possibilitando informações detalhadas para melhor indicações de uso (Moraes et al., 2023).

Com espécies nativas advindas da região tropical, técnicas de densitometria de raios X vêm sendo amplamente exploradas, sobretudo na Amazônia. Estudos com esta abordagem neste bioma utilizando as espécies *Tachigali vulgaris* e *Schizolobium Parahyba* var. *amazonicum*, por exemplo, vem possibilitando uma melhor compreensão destas para a produção bioenergética (Moraes et al., 2023; Ucella-Filho et al., 2023). No entanto, existe uma lacuna de conhecimento nestas abordagens no bioma Mata Atlântica, o qual apresenta biodiversidade expressiva e endêmica, com espécies em potencial para diferentes usos (Myers et al., 2000).

Anadenanthera colubrina (Vell.) Brenan, popularmente conhecida como angico, é uma espécie nativa e amplamente distribuída nos biomas Mata Atlântica, Caatinga e Cerrado. Sua madeira vem sendo utilizada para marcenaria e, na Mata Atlântica, a espécie vem sendo empregada em plantios de restauração, uma vez que é considerada pioneira a secundária inicial e apresenta crescimento moderado a rápido (Pareyn et al., 2018). Apesar desta relevância, estudos avaliando as propriedades físicas desta espécie na Mata Atlântica são escassos, prejudicando a sua prospecção para outros usos.

Diante desse cenário, o objetivo do trabalho foi realizar a caracterização completa da variação da densidade aparente da madeira de *A. colubrina* na Mata Atlântica.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização da área de estudo

A área de estudo está localizada nas fazendas experimentais Lageado e Edgárdia, pertencentes à Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA), campus da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Unesp), na cidade de Botucatu no estado de São Paulo (22°50’S e 48°24’W). Segundo a classificação climática de Köppen, Botucatu é do tipo Cfa, caracterizado por um clima temperado quente mesotérmico úmido. A precipitação média anual é de 1.500 mm e a temperatura média anual de 20,5°C. A cobertura vegetal original é de floresta tropical Estacional Semidecidual de domínio de Floresta Atlântica.

No local, há um projeto de restauração florestal na área, a qual possui histórico agrícola com produção de café e feijão até a década de 1980 e pastagens até 1990. O projeto foi instalado em 1997, caracterizando-se por um plantio de espécies comerciais para madeira e lenha.

2.2 Obtenção das amostras de madeira

Por meio de metodologia destrutiva, três indivíduos de *A. colubrina* foram abatidos de modo a englobar a distribuição das classes de diâmetro à altura do peito (DAP) da espécie. Nesse sentido, os indivíduos apresentaram DAP de 13,6cm, 32,6cm e 43,9cm e altura de 12,3m, 21,8m e 20,9m, respectivamente. Foram extraídos cinco discos de até 5cm de espessura, sendo um na base (0,10m), 25, 50, 75 e 100% da altura do tronco. As amostras foram transportadas para o Laboratório de Anatomia e Identificação da Madeira da ESALQ/USP para realização dos procedimentos dendrocronológicos.

2.3 Análises dendrocronológicas

As amostras da base foram lixadas e polidas de acordo com protocolos dendrocronológicos usuais para visualização das camadas de crescimento. Em seguida, estas foram digitalizadas em scanner EPSON V1200 (resolução 2400 dpi) e as camadas de crescimento mensuradas por meio do software Coorecorder. Por fim, foi realizada datação dos anéis de crescimento por cross-dating entre os indivíduos da espécie.

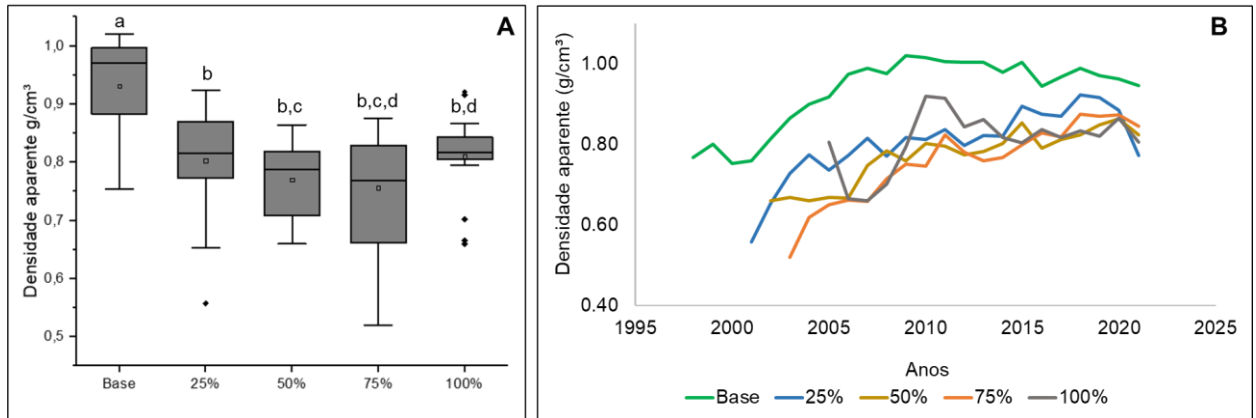
Para a determinação dos perfis de densidade aparente do lenho, estoque de biomassa e cálculo de fixação de carbono anual, as amostras do lenho de todas as

alturas foram cortadas no sentido transversal (1,5 mm de espessura) em equipamento de dupla serra circular e armazenadas em câmara de climatização (20°C; 60%; UR = 12%) (Tomazello et al., 2008). Em seguida, estas foram escaneadas com uma cunha de calibração de acetato de celulose, em equipamento de raios X digital Faxitron X-ray LX 60 para a obtenção de imagens digitais. A mensuração da densidade foi realizada por meio do software WINDENDRO Density 2017a, com o objetivo de obter o perfil de microdensidade aparente anual para a espécie em todas as alturas avaliadas. Por fim, aplicou-se o teste de Kruskal-Wallis para aferir se houve diferença significativa entre as alturas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

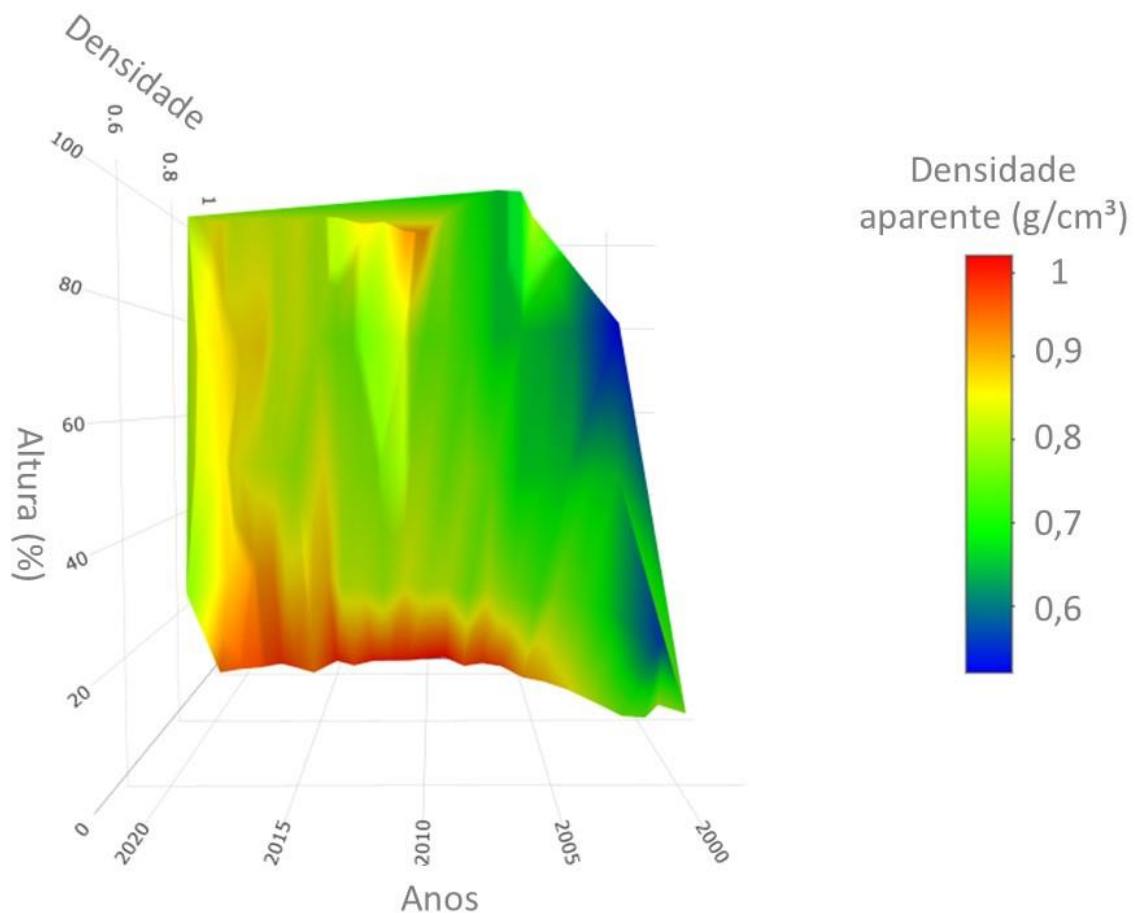
A. colubrina crescendo em um plantio de restauração na Mata Atlântica apresentou densidade aparente da madeira média de $0,82 \text{ g cm}^{-3}$ ($\pm 0,10 \text{ g cm}^{-3}$). Houve diferença significativa entre as diferentes alturas amostradas da espécie ($p = <0,05$; Figura 1A). Os maiores valores da densidade foram evidenciados nos discos da base, com média de $0,93 \text{ g cm}^{-3}$ ($\pm 0,08 \text{ g cm}^{-3}$). O disco da altura 100% apresentou aumento da densidade, sobretudo nos anos próximos a década de 2010 (Figura 1B), o qual influenciou nos valores médios da espécie para esta altura (densidade média = $0,81 \text{ g cm}^{-3} \pm 0,07 \text{ g cm}^{-3}$). O disco da altura 25% apresentou densidade média de $0,80 \text{ g cm}^{-3}$ ($\pm 0,08 \text{ g cm}^{-3}$), seguido do disco da altura 50%, com média de $0,77 \text{ g cm}^{-3}$ ($\pm 0,06 \text{ g cm}^{-3}$) e da altura 75%, com média de $0,76 \text{ g cm}^{-3}$ ($\pm 0,09 \text{ g cm}^{-3}$). O comportamento da densidade em ambos os sentidos avaliados também pode ser observado no perfil de variação longitudinal e radial da densidade (Figura 2). Em geral o incremento de densidade ao longo dos anos ocorreu para todas as alturas e podem ser observados pela transição de tonalidades (variação do azul ao laranja).

Figura 1: Variação de densidade aparente no sentido longitudinal (A) e ao longo dos anos de árvores de *A. colubrina* (B)



Fonte: (Autores)

Figura 2: Perfil de variação longitudinal e radial da densidade aparente obtida por densitometria de raios X em árvores de *A. colubrina*



Fonte: (Autores)

A influência da idade sobre a densidade está principalmente relacionada aos parâmetros de anatomia da madeira, tais como: aumento do comprimento das fibras, da espessura da parede celular, da fração parede celular, entre outros (Palermo et al. 2015; Liu et al. 2020). Nesse sentido, foi evidenciado que os valores mais altos de densidade ocorrem na base da árvore, onde também estão localizados os anéis de crescimento mais antigos (próximo a data do plantio). Cabe ressaltar que o padrão de diminuição da densidade conforme o aumento em altura já foi previamente registrado na literatura com outras espécies e em outros biomas (Oliveira et al. 2018; Moraes et al. 2023).

Ainda, o aumento de densidade evidenciado nas regiões superiores da árvore pode estar relacionado com a inserção de ramos na copa, formando lenho de reação. A formação desse tipo de madeira pode ocasionar mudanças na anatomia e consequentemente aumentar a densidade da madeira (Clair e Thibaut 2014; Ruelle 2014), o que justifica o aumento de densidade no topo encontrado no presente estudo.

Por fim, os anéis de crescimento em todas as alturas registram as variações bióticas e abióticas que ocorrem na árvore e que, consequentemente, influenciam as propriedades físicas da madeira (Mendes et al., 2022), inclusive a densidade aparente (Ziemińska et al. 2013). Assim, a partir do uso da densitometria de raios X é possível compreender a variação de densidade no sentido radial e longitudinal da espécie, sendo um importante parâmetro para compreender o seu papel ecológico da mesma em regiões neotropicais, como a Mata Atlântica (Dias Júnior et al., 2021).

4. CONCLUSÃO

- *A. colubrina* apresentou densidade aparente maior na base e no topo da árvore, relacionados com o aumento da idade e com a inserção de galhos na copa, respectivamente.
- A técnica de densitometria de raios X demonstrou potencial para caracterizar a variação de densidade nos sentidos radial e longitudinal;

5. AGRADECIMENTOS

Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP #2023/08463-1).

6. REFERÊNCIAS

BOURIAUS, 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, 2015.

CLAIR B.; THIBAUT, B. Physical and mechanical properties of reaction wood *In*: GARDINER, B.; BARNETT, J.; SARANPÄÄ, P.; GRIL, J. (org.) **The biology of reaction wood**. Heidelberg: Springer Berlin, . p. 171-200, 2014.

DIAS JÚNIOR, A. F.; PINCELLI, A. L. M. S.; SILVA, A. P. C.; *et al.* Integrating species and successional classes for wood production in a mixed forest restoration system in a neotropical region. **Journal of Forestry Research**. v. 32, p. 2313-2321, 2021.

LIU, Y.; ZHOU, L.; ZHU, Y.; LIU, S. Anatomical features and its radial variations among different *Catalpa bungei* clones. **Forests**. v. 11, n. 8, p. 824-840, 2020.

MENDES, F. M.; MASSUQUE, J.; CARNEIRO, A. C. O.; *et al.* Spatial variation of eucalyptus fibres considering the structure of annual growth rings. **Cerne**. v. 28, p. 1-10, 2022.

MORAES, L. G.; LIMA, M. D. R.; ASSIS-PEREIRA, G.; *et al.* Forking and planting spacing impacts on wood density, X-ray density, and heartwood proportion of *Tachigali vulgaris*. **Trees - Structure and Function**. n 37, p.1567–1581, 2023.

MYERS, N.; MITTERMEIE, R.A.; MITTERMEIE, C.G.; FONSECA, G.A.B.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, p. 853–858, 2000.

OLIVEIRA, I. R.; PERES CHAGAS, M.; BOUILLET, J. P.; *et al.* Effect of tree spacing on growth and wood density of 38-year-old *Cariniana legalis* trees in Brazil. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**. v. 80, n. 4, p. 311-318, 2018.

PALERMO, G. P. M.; LATORRACA, J. V. F.; CARVALHO, A. M.; *et al.* Anatomical properties of *Eucalyptus grandis* wood and transition age between the juvenile and mature woods. **European Journal of Wood and Wood Products**. v. 73, p. 775–780, 2015.

PAREYN, F. G.; ARAÚJO, E. L.; DRUMMOND, M. A. *Anadenanthera colubrina* – Angico. **Plantas para o futuro – Região Nordeste**. Capítulo 5, p. 740 – 745, 2018.

POMPA-GARCÍA, M.; VIVAR-VIVAR, E. D.; RUBIO-CAMACHO, E. A.; CAMARERO, J. J. Rates of Stemwood Carbon Accumulation Are Linked to Hydroclimate Variability in Mexican Conifers. **Forests**, v. 14, 2023.

RUELLE, J. Morphology, anatomy and ultrastructure of reaction wood. *In*: GARDINER, B.; BARNETT, J.; SARANPÄÄ, P.; GRIL, J. (org.) **The biology of reaction wood**. Heidelberg: Springer Berlin, p. 13–35, 2014.

TOMAZELLO, M.; et al. Application of x-ray technique in nondestructive evaluation of Eucalypt wood. **Maderas. Ciencia y tecnología**. v. 10(2), p. 139-149, 2008.

UCELLA-FILHO, J.G.M.; et al. Clues about wood density and trace-element variability of *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby for bioenergy use. **Environmental Science and Pollution Research**. v. 30, p. 56161-65173, 2023.

ZIEMINSKA, K.; et al. Fibre wall and lumen fractions drive wood density variation across 24 Australian angiosperms. **Annals of botany**, v. 5, 2013.