



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

LÍVIA MARTINS NUNES PEREIRA

**CARACTERES ANATÔMICOS ASSOCIADOS À VARIAÇÃO RADIAL DA
DENSIDADE DA MADEIRA EM ESPÉCIES NATIVAS DA MATA ATLÂNTICA**

Profa. Dra. Glaycianne Christine Vieira dos Santos Ataíde
Orientadora

SEROPÉDICA, RJ
JUNHO – 2026



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

LÍVIA MARTINS NUNES PEREIRA

**CARACTERES ANATÔMICOS ASSOCIADOS À VARIAÇÃO RADIAL DA
DENSIDADE DA MADEIRA EM ESPÉCIES NATIVAS DA MATA ATLÂNTICA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Florestal, Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Profa. Dra. Glaycianne Christine Vieira dos Santos Ataíde
Orientadora

SEROPÉDICA, RJ
JUNHO – 2026



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE
JANEIRO
DEPARTAMENTO DE PRODUTOS FLORESTAIS**



HOMOLOGAÇÃO Nº 5 / 2026 - DeptPF (12.28.01.00.00.00.30)

Nº do Protocolo: 23083.028823/2026-70

Seropédica-RJ, 24 de junho de 2026.

**CARACTERES ANATÔMICOS ASSOCIADOS À VARIAÇÃO RADIAL DA
DENSIDADE DA MADEIRA EM ESPÉCIES NATIVAS DA MATA ATLÂNTICA**

LÍVIA MARTINS NUNES PEREIRA

APROVADA EM: 23/06/2026

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. Glaycianne Christine Vieira dos Santos Ataíde - UFRRJ (Orientadora)
Prof. Dr. João Vicente de Figueiredo Latorraca - UFRRJ (Membro)
Ma. Mariane da Silva Moreira - UFRRJ (Membro)

(Assinado digitalmente em 24/06/2026 08:59)
**GLAYCIANNE CHRISTINE VIEIRA DOS
SANTOS ATAÍDE**
*PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptPF (12.28.01.00.00.00.00.30)
Matricula: ###143#1*

(Assinado digitalmente em 25/06/2026 12:54)
**JOAO VICENTE DE FIGUEIREDO
LATORRACA**
*PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptPF (12.28.01.00.00.00.00.30)
Matricula: ###169#3*

(Assinado digitalmente em 24/06/2026 09:00)
MARIANE DA SILVA MOREIRA
*DISCENTE
Matricula: 2026#####0*

À minha mãe, que me ensinou a sonhar e fez dos meus sonhos os seus. Sua sabedoria, força e amor me permitiram chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por toda a força, cuidado e proteção que me permitiram chegar até aqui. A Ele devo a oportunidade de viver esta trajetória, superar os desafios encontrados pelo caminho e celebrar cada conquista alcançada.

Aos integrantes da minha banca examinadora, por aceitarem o convite e contribuírem para o aprimoramento deste trabalho com suas considerações e sugestões.

À minha orientadora, Glaycianne, por toda a paciência, dedicação e confiança na realização deste trabalho. Obrigada por me incentivar a ser melhor e por acreditar em mim. Você faz a diferença por onde passa.

Ao Prof. João Latorraca, por toda a confiança depositada em mim ao longo da minha trajetória acadêmica e por todas as oportunidades concedidas, que contribuíram de forma significativa para a minha formação.

À minha parceira do NPQAM, Mary, por todo o carinho, atenção e por todos os ensinamentos ao longo da trajetória da minha iniciação científica. Obrigada por confiar em mim e por tornar a rotina mais leve durante esses anos.

Às minhas amigas Sara, Thalita, Naila e Manu por tornarem a graduação mais leve, engraçada e com mais propósito. Obrigada por todo apoio, pela compreensão em meus momentos difíceis e por fazerem os meus dias incríveis. Não encontro a palavra exata para descrever o que vocês representam na minha vida nesse importante "Contexto", mas só de estar ao lado de vocês, sei que já venci.

Às meninas da Serocasa: Juliana, por ter sido minha primeira colega de quarto e por continuar sendo uma grande amiga na minha vida. E à Duda, pelas risadas e por toda a parceria. Sou grata por ter dividido tantos momentos especiais com vocês.

À Isadora, que, mesmo estando longe, sempre me apoia e continua presente na minha vida com carinho e amizade.

À Lizandra, minha L1 e filósofa favorita, por todo o apoio, incentivo e por sempre acreditar em mim. Meu presente do ensino médio.

À Marcele, Bia e Bê, por fazerem parte desta trajetória e por tornarem meus dias mais felizes.

Ao meu padrasto, Luciano, por todo o apoio e incentivo. Obrigada por fazer parte da minha caminhada.

À Luiza, minha parceira e melhor amiga desde a infância, por ter acompanhado toda a minha trajetória e por fazer parte de tantos momentos importantes da minha vida. Sua amizade faz toda a diferença, sem ela, tudo seria menos divertido.

A Arnaldo e Zenilda (*in memoriam*), que ainda permanecem vivos em minhas lembranças. A saudade de vocês me faz perceber a falta que existe entre o A e o Z no alfabeto da minha vida.

Ao meu noivo, Tiago, por estar sempre ao meu lado em todos os momentos, me apoiando e mostrando que o caminho pode ser mais leve quando percorrido juntos. Viver ao seu lado é um privilégio. Obrigada por tanta cumplicidade, amor e cuidado. Agradeço por toda a paciência, compreensão e incentivo ao longo desta jornada.

À minha mãe, Adriana, por todo amor, apoio e carinho, e por me ensinar o verdadeiro valor da vida. Que eu possa ser, ao menos um pouco, como ela. A presença que ilumina meus dias, transforma quem sou e me ajuda a crescer e acreditar em mim mesma, sempre. Minha luz. Minha vida não teria sentido sem você.

A todos que, de alguma forma, contribuíram e que, porventura, não tenham sido mencionados, os meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

O conhecimento das propriedades anatômicas e físicas da madeira de espécies nativas é fundamental para subsidiar o uso racional e o desenvolvimento da silvicultura de espécies da Mata Atlântica. O presente estudo teve como objetivo avaliar a associação entre caracteres anatômicos e a variação radial da densidade aparente da madeira de ipê-amarelo (*Handroanthus serratifolius* (Vahl) S.Grose) e vinhático (*Plathymenia reticulata* Benth.), provenientes de plantios comerciais de reflorestamento com 11 anos em Porto Seguro, Bahia, Brasil. Foram analisadas três posições radiais: próxima à medula, intermediária e próxima ao câmbio, por meio de caracterização anatômica microscópica quantitativa, dissociação de tecidos, densitometria de raios-X e contagem de proporção de tecidos. As relações entre as variáveis anatômicas e a densidade aparente foram avaliadas por Análise de Componentes Principais (PCA). Os resultados indicaram que as associações entre variáveis anatômicas e densidade aparente tornam-se progressivamente mais estruturadas no sentido medula-câmbio. Na região próxima à medula, as relações mostraram-se menos organizadas, com maior dispersão entre as variáveis anatômicas. À medida que o lenho se desenvolve, essas associações tornaram-se progressivamente mais definidas, indicando que a contribuição das variáveis anatômicas para a densidade aparente se consolida com o amadurecimento do xilema. Concluiu-se que a densidade aparente é determinada pela interação de múltiplos caracteres anatômicos, com destaque para a espessura de parede das fibras e o diâmetro do lúmen das fibras, e que essas relações se consolidam com o gradual amadurecimento do lenho ao longo do gradiente radial.

Palavras-chave: anatomia da madeira; morfologia das fibras; qualidade da madeira; densitometria de raios-x; Análise de Componentes Principais.

ABSTRACT

Understanding the anatomical and physical properties of wood from native species is essential to support its efficient utilization and to advance the silviculture of Atlantic Forest species. This study aimed to investigate the relationships between anatomical traits and the radial variation in apparent wood density of ipê-amarelo (*Handroanthus serratifolius* (Vahl) S. Grose) and vinhático (*Plathymenia reticulata* Benth.), sourced from 11-year-old commercial reforestation plantations in Porto Seguro, Bahia, Brazil. Three radial positions were evaluated (near the pith, intermediate, and near the cambium) using quantitative microscopic anatomical characterization, tissue maceration, X-ray densitometry, and tissue proportion analysis. The relationships between anatomical variables and apparent density were examined through Principal Component Analysis (PCA). The results showed that the associations between anatomical traits and apparent density become progressively more structured from pith to cambium. In the region near the pith, these relationships were less clearly defined, with greater dispersion among anatomical variables. As wood formation progresses, these associations become increasingly consistent, indicating that the contribution of anatomical traits to apparent density strengthens with xylem maturation. Overall, apparent density is governed by the interaction of multiple anatomical traits, particularly fiber wall thickness and fiber lumen diameter, and these relationships become more pronounced as the wood matures along the radial gradient.

Keywords: wood anatomy; fiber morphology; wood quality; X-ray densitometry; Principal Component Analysis.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1. Importância da Mata Atlântica	2
2.2. <i>Handroanthus serratifolius</i> (Vahl) S. Grose - Ipê amarelo	2
2.3. <i>Plathymenia reticulata</i> Benth. - Vinhático	3
2.4. Anatomia e Densidade	4
3. MATERIAL E MÉTODOS	4
3.1. Coleta e caracterização do material	4
3.2. Caracterização anatômica microscópica quantitativa	5
3.2.1. Preparo dos cortes histológicos	5
3.2.2. Dissociação de tecidos	5
3.2.3. Proporção de elementos anatômicos axiais	5
3.3. Densitometria de raios-X	6
3.4. Análise de Dados	6
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	6
4.1. Caracterização anatômica	6
4.1.1. Vasos	6
4.1.2. Raios	8
4.1.3. Fibras	9
4.1.4. Proporção de elementos axiais	10
4.2. Variação radial da densidade aparente	11
4.3. Associações entre as variáveis anatômicas e a densidade da madeira	14
5. CONCLUSÕES	18
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	19

1. INTRODUÇÃO

A Mata Atlântica concentra uma das maiores diversidades arbóreas do planeta, abrigando espécies com ampla variação em suas propriedades ecológicas e tecnológicas. Apesar de seu reconhecido potencial, o bioma encontra-se severamente reduzido pela exploração histórica e pela fragmentação de seus remanescentes, o que torna urgente a valorização científica, ecológica e econômica de suas espécies nativas (Fundação SOS Mata Atlântica, 2026; Carvalho, 2003). A silvicultura de espécies nativas surge, nesse contexto, como uma das estratégias mais promissoras para aliar recuperação florestal, geração de renda e conservação da biodiversidade (Rolim; Piotto, 2018).

Para que essa estratégia seja efetiva, é necessário ampliar o conhecimento sobre as propriedades físicas e estruturais da madeira dessas espécies. A caracterização da madeira envolve estudos de suas propriedades anatômicas, físicas e mecânicas, permitindo compreender melhor suas particularidades e identificar os potenciais usos de cada espécie (Motta et al., 2014).

Segundo Mattos et al. (2011), a densidade da madeira constitui um parâmetro relevante para a avaliação de sua qualidade sob a perspectiva tecnológica, funcionando como um indicador representativo de suas demais propriedades. Dentre as medidas de densidade, densidade básica destaca-se como um dos parâmetros mais empregados na classificação das espécies, uma vez que representa a proporção entre a massa seca da madeira e seu volume total, considerando os espaços vazios (Moreschi, 2014).

Contudo, a densidade não é uma propriedade isolada, mas sim um resultado direto da organização anatômica da madeira, determinada pela composição, dimensões e arranjo de seus elementos celulares (Albuquerque et al., 2005; Trugilho et al., 2015). Em folhosas, as fibras constituem a maior parte do tecido lenhoso, sendo a densidade positivamente correlacionada com a fração de parede celular desses elementos (Poorter et al., 2010).

A influência de cada elemento anatômico sobre a densidade ocorre de maneira distinta. As fibras, por possuírem paredes celulares espessas, contribuem positivamente para a densidade, enquanto os vasos, por representarem espaços vazios no lenho dedicados à condução hídrica, tendem a reduzi-la (Longui et al., 2011). O parênquima axial, tecido de paredes delgadas associado ao armazenamento de reservas, também exerce influência negativa sobre essa propriedade quando presente em grandes proporções (Poorter et al., 2010). Dessa forma, a densidade da madeira pode ser compreendida como o resultado do equilíbrio entre esses elementos celulares, cujas proporções variam entre espécies e ao longo do gradiente radial medula-casca (Ziemińska et al., 2013).

Nesse cenário, o estudo da variação radial do lenho é imprescindível para compreender a qualidade tecnológica da madeira, uma vez que suas propriedades são reflexos diretos de sua organização anatômica. Diante disso, Benites et al. (2015) destacam que o reconhecimento dessas propriedades é essencial para garantir o uso adequado do material, evitando aplicações incorretas.

Apesar da reconhecida influência da anatomia da madeira sobre a densidade, ainda são escassos estudos que quantifiquem sistematicamente quais variáveis anatômicas são mais determinantes nessa relação, principalmente comparando espécies nativas de densidades contrastantes dentro de um mesmo bioma.

Diante disso, a seleção de espécies como ipê-amarelo (*Handroanthus serratifolius* (Vahl) S.Grose) e vinhático (*Plathymenia reticulata* Benth.), ambas nativas da Mata Atlântica, demonstram-se adequadas para o estudo, principalmente por apresentarem densidades distintas e relevância ecológica e econômica consolidada (Silva et al., 2021).

Portanto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a associação entre variáveis anatômicas e a densidade aparente da madeira, verificando como esse padrão de associação se altera ao longo da variação radial em duas espécies nativas da Mata Atlântica.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Importância da Mata Atlântica

A Mata Atlântica é um dos biomas mais ricos em biodiversidade e, simultaneamente, um dos mais ameaçados. Em função de séculos de exploração intensiva, o bioma encontra-se atualmente drasticamente reduzido. Restam apenas 12,4% de sua cobertura original, em geral distribuída na forma de pequenos fragmentos florestais com menos de 100 hectares, isolados em meio a paisagens antropizadas. Apenas 12% correspondem a florestas maduras e bem preservadas. Esse estado de fragmentação avançada coloca a Mata Atlântica no rol dos hotspots de biodiversidade mundialmente reconhecidos, segundo dados do Atlas da Mata Atlântica (Fundação SOS Mata Atlântica, 2026).

O histórico de ocupação e exploração desordenada resultou em uma devastação drástica. Esse cenário é agravado por uma fragmentação severa, que reflete diretamente os processos de ocupação territorial e a exploração predatória de seus recursos naturais. Nesse contexto, a preservação da biodiversidade e a sobrevivência do bioma dependerão da implementação de estratégias de manejo voltadas às espécies florestais nativas (Pinto et al., 2006).

As espécies arbóreas nativas desempenham papel central na estruturação e funcionamento desses ecossistemas. A perda e a fragmentação de habitats são os dois principais fatores que levam à extinção de espécies em florestas tropicais (Carvalho, 2003).

Diante desse cenário, a silvicultura de espécies nativas surge como uma estratégia central para a conservação e o uso sustentável. De acordo com Rolim e Piotto (2018), a produção de madeira com espécies nativas pode conciliar geração de renda, recuperação florestal e manutenção da biodiversidade, desde que baseada em conhecimento científico sobre ecologia, silvicultura e propriedades tecnológicas das espécies. Nesse contexto, o conhecimento das características da madeira constitui uma ferramenta indispensável para a valorização econômica e a conservação das espécies florestais nativas da Mata Atlântica (Carvalho, 2003; Rolim; Piotto, 2018).

2.2. *Handroanthus serratifolius* (Vahl) S.Grose – Ipê-amarelo

Cientificamente classificado como *Handroanthus serratifolius* (Vahl) S.Grose, o ipê-amarelo recebe diversos nomes populares conhecidos regionalmente no Brasil, como pau-d'arco-amarelo, piúva-amarela, ipê-ovo-de-macuco e ipê-da-mata. Sua ocorrência estende-se por quase todo o território nacional, presente em biomas como Mata Atlântica, Amazônia, Pantanal e Cerrado. Apresenta tronco reto ou levemente tortuoso, o fuste que pode atingir até 25 metros de altura e 90 cm de DAP (diâmetro à altura do peito, medido a 1,30 m do solo), na idade adulta apresenta casca fissurada e flores amarelo-douradas (Carvalho, 2014).

A madeira do ipê-amarelo destaca-se por sua coloração, que varia do pardo-claro ou pardo-oliváceo ao pardo-acastanhado-escuro, apresentando reflexo amarelo-esverdeado resultante do conteúdo depositado em seus poros. Com uma textura média e grã irregular, essa madeira é dura ao corte, mas possui uma superfície moderadamente lisa ao tato. Além disso, a presença de lapachol em sua composição a torna resistente às intempéries da natureza,

garantindo uma alta durabilidade que a qualifica como excelente para o uso em construções externas, civis e navais (Carvalho, 2014).

Segundo o estudo de Silva et al. (2021), sua madeira é tecnologicamente classificada como pesada, com densidade básica de $0,80 \text{ g/cm}^3$ e densidade aparente (a 12% de umidade) de $1,03 \text{ g/cm}^3$. Essa alta densidade reflete-se em uma elevada resistência mecânica, caracterizada por altos índices de resistência à compressão paralela às fibras e à flexão estática entre diversas espécies nativas avaliadas. Em relação à estabilidade dimensional, a madeira possui um coeficiente de anisotropia de 1,35, valor considerado excelente para uso, entretanto, apresenta altos índices de inchamento e contração volumétrica, que sugerem cautela em aplicações expostas a condições climáticas severas.

Quanto à trabalhabilidade, Silva et al. (2021) observaram resultados satisfatórios em processos de aplainamento, lixamento e furação, mas registraram uma rejeição total ao fendilhamento por pregos.

Rolim e Piotto (2018) e Silva et al. (2021) apontam que a madeira de ipê-amarelo apresenta um grande potencial para o setor de construção civil, com base em suas propriedades físicas e mecânicas.

2.3. *Plathymenia reticulata* Benth. – Vinhático

O vinhático, cientificamente classificado como *Plathymenia reticulata* Benth., é conhecido por diferentes nomes populares no Brasil, variando conforme a região: amarelinho e vinhático-do-campo na Bahia, pau-amarelo e acende-candeia no Ceará, binhático e vinhático em Minas Gerais, e oiteira e paricazinho no Pará, entre outros. Sua ocorrência estende-se por grande parte do território nacional, com registros em biomas como Mata Atlântica, Cerrado, Caatinga e Pantanal. Apresenta tronco cilíndrico, geralmente torcido e de base angulosa, com fuste de até 14 m de comprimento, podendo atingir 30 m de altura e 150 cm de DAP (diâmetro à altura do peito, medido a 1,30 m do solo) na idade adulta em condições favoráveis, embora no Cerrado seu porte seja consideravelmente menor, com cerca de 5 m de altura e 30 cm de DAP (Carvalho, 2009).

Sua madeira apresenta cerne de coloração castanho-amarelado, frequentemente com reflexos dourados, enquanto o alburno é bem definido e branco-amarelado. De textura média, superfície lustrosa e fácil de trabalhar, demonstra alta resistência ao ataque de organismos xilófagos. É amplamente utilizada na fabricação de móveis, painéis, portas nobres, construções navais e civis, além de mourões de cerca e esteios pela sua reconhecida resistência ao cupim (Carvalho, 2009).

O estudo de Marchesan et al. (2021) demonstrou que a espécie possui densidade básica média de $0,64 \text{ g/cm}^3$, o que a qualifica para diversos usos estruturais. De acordo com os critérios da NBR 7190, a madeira foi classificada na categoria de resistência C40, apresentando um desempenho sólido. Embora seja considerada uma madeira estável sob o aspecto volumétrico, o seu fator anisotrópico exige atenção técnica durante a secagem para evitar o surgimento de defeitos como rachaduras e empenamentos. a fabricação de esquadrias

Em conjunto, as características físicas e mecânicas da madeira de *Plathymenia reticulata* Benth. indicam seu potencial para uso tanto na construção leve quanto na construção pesada (Marchesan et al., 2021).

Longui et al. (2012) discutem que a madeira do vinhático apresenta variações anatômicas significativas entre a medula e a casca: o diâmetro dos vasos aumenta radialmente, o que potencializa a eficiência hidráulica da árvore adulta. Enquanto a maior frequência de vasos na região da medula, correlaciona-se a uma maior flexibilidade, permitindo que árvores jovens resistam à ação dos ventos sem romper-se.

2.4. Anatomia e Densidade

A densidade da madeira é considerada uma das propriedades físicas mais relevantes e a que melhor se relaciona com as demais propriedades, por isso é amplamente utilizada para a caracterização tecnológica do lenho e pesquisas relacionadas à qualidade da madeira (Latorraca; Albuquerque, 2000; Cruz et al., 2003).

Sua determinação é baseada na organização dos elementos celulares e dimensões de seus espaços vazios, que influenciam diretamente na porosidade e permeabilidade do material (Albuquerque et al., 2005; Motta et al., 2014).

Segundo Lobão et al. (2004), a densidade da madeira exerce influência direta sobre sua resistência mecânica. Na prática, essa propriedade é utilizada como parâmetro para a classificação das madeiras (Gonçalves et al., 2009).

A madeira é um material naturalmente heterogêneo, que apresenta variações significativas em suas propriedades físicas e morfológicas. Os tecidos celulares da madeira desempenham papéis particulares na composição da massa específica (Trugilho et al., 2015).

A caracterização anatômica da madeira é fundamental para auxiliar no reconhecimento e identificação de madeiras em geral, com um bom grau de segurança e confiabilidade (Botosso, 2011).

Ruy (1998) observou que a espessura da parede das fibras tem forte correlação com a densidade básica do lenho e, desta forma, influencia nas propriedades e usos da madeira. De acordo com Sarkani et al. (1957), apesar das fibras apresentarem uma relação direta com a qualidade da madeira, outros componentes estruturais presentes no lenho podem influenciar nessa qualidade, como as proporções, dimensões e distribuição dos vasos e parênquima axial e radial.

Espécies com vasos de grande diâmetro e em alta frequência tendem a apresentar menor densidade, em contrapartida, espécies com vasos pequenos e dispersos tendem a ser mais densas. Os vasos influenciam diretamente no comportamento da densidade, pois diâmetros tangenciais maiores e frequências elevadas aumentam a porosidade e os espaços vazios da madeira, tendendo a reduzir a massa específica do lenho (Longui et al., 2009; Motta et al., 2014).

As diferenças de densidade podem ser observadas entre espécies distintas, entre indivíduos pertencentes a uma mesma espécie ou até mesmo no interior de uma única árvore, tanto no sentido radial quanto no axial (Woodcock; Shier, 2002).

Além disso, a variação radial demonstra que a espessura da parede das fibras tende a aumentar progressivamente no sentido medula-casca à medida que o lenho amadurece, influenciando diretamente a resistência mecânica e a qualidade tecnológica do material (Lima et al., 2011).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Coleta e caracterização do material

Foram coletados discos na altura do DAP (1,30m acima do solo) de duas espécies nativas da Mata Atlântica: ipê-amarelo (*Handroanthus serratifolius* (Vahl) S.Grose) e vinhático (*Plathymenia reticulata* Benth.). A seleção das espécies visou abranger um gradiente estrutural mais amplo, considerando suas densidades básicas contrastantes. Para cada espécie, foram selecionadas três árvores provenientes de plantios homogêneos com 11 anos de idade,

localizados no município de Porto Seguro, Bahia. Os discos foram devidamente identificados e encaminhados para análises anatômicas.

Em cada disco, foram selecionadas porções ao longo do raio, no sentido medula-casca, para análise da variação radial. Foram retirados corpos de prova com dimensões de 1,5 x 1,5 cm em três posições: região próxima à medula, região intermediária e região próxima ao câmbio.

3.2. Caracterização anatômica microscópica quantitativa

3.2.1. Preparo dos cortes histológicos

Os corpos de prova foram submetidos ao processo de saturação, que consiste na imersão destes em água destilada. Seguindo para o processo de cozimento em uma concentração de água destilada e glicerina, na proporção 3:1, até que alcançassem o ponto ideal para o corte.

Posteriormente ao processo de amolecimento, foi utilizado um micrótomo de deslizamento para realizar o seccionamento dos planos de corte transversal, longitudinal tangencial e longitudinal radial de cada uma das espécies, obtendo cortes com 14-18 µm de espessura.

Foram confeccionadas lâminas semipermanentes, sendo os cortes histológicos previamente submetidos à dupla coloração com safranina e azul de astra, na proporção 9,5:0,5. As lâminas dos cortes histológicos foram utilizadas para a obtenção de fotomicrografias por meio de microscópio óptico e posteriormente analisadas pelo software Image Pro-Plus.

Para a quantificação dos parâmetros dos elementos de vaso, foram mensurados, no plano de corte transversal: diâmetro tangencial (µm), diâmetro radial (µm) e frequência (vasos/mm²). Para os parâmetros do parênquima radial, as mensurações foram realizadas no plano de corte longitudinal tangencial, sendo avaliadas a altura (µm), largura (µm) e frequência (raios/mm linear) dos raios.

3.2.2. Dissociação de tecidos

Para o preparo da dissociação de tecidos (macerado), os corpos de prova foram seccionados em pequenos fragmentos no sentido longitudinal às fibras. Nesta fase, foi adotada a metodologia descrita por Franklin (1945), que consiste na mistura de ácido acético e peróxido de hidrogênio, na proporção de 1:1. Os fragmentos de madeira e a solução de Franklin foram adicionados aos vidros de penicilina, previamente identificados, fechados com tampa de borracha, lacrados e levados à estufa a uma temperatura de 60 °C por 8 horas.

Em seguida, o material dissociado foi lavado em água destilada e, posteriormente, utilizados para a montagem de lâminas semipermanentes, coradas com safranina a 1%. As lâminas foram utilizadas para a obtenção de fotomicrografias por meio de microscópio óptico *Olympus bx51 conectado ao software cellSens Standard* e posteriormente analisadas pelo *software Image Pro-Plus® 4.5.0.29*, permitindo análises mais detalhadas das características anatômicas das espécies. Esse material foi utilizado na quantificação de variáveis relacionadas às fibras da madeira, como comprimento (µm), diâmetro total (µm), diâmetro do lúmen (µm) e espessura da parede das fibras (µm), além do comprimento dos elementos de vaso (µm).

Todas as mensurações foram realizadas de acordo com os padrões estabelecidos pela International Association of Wood Anatomy Committee (IAWA, 1989).

3.2.3. Proporção de elementos anatômicos axiais

Para a determinação da proporção dos tecidos da madeira, foi empregado o método de contagem de pontos, conforme a metodologia descrita por Ziemińska et al. (2015). Foram

utilizadas 10 microfotografias do plano de corte transversal por porção, obtidas nas três regiões de estudo (próxima à medula, porção intermediária e próxima ao câmbio).

Sobre cada imagem foi aplicada uma grade sistemática de pontos, totalizando 300 pontos analisados por imagem, seguindo o critério mínimo adotado por Ziemińska et al. (2015), com o auxílio do *software ImageJ 1.54p*.

Em cada ponto da grade foi registrado o tipo de tecido subjacente, classificando os elementos anatômicos axiais em: fibras, vasos e parênquima axial. A proporção de cada tecido foi calculada pela razão entre o número de pontos incidentes sobre cada tipo de tecido e o total de pontos contabilizados, com resultados expressos em porcentagem.

3.3.Densitometria de raios-X

Para a obtenção do perfil radial de densidade aparente a 15% de umidade, seções radiais com 2,0 mm de espessura foram obtidas em serra circular dupla paralela. As seções foram retiradas em posições correspondentes às utilizadas na análise anatômica e mantidas em sala climatizada a 20 °C até atingirem umidade de equilíbrio.

O perfil de densidade aparente foi determinado por meio de densitômetro de raios-X (QTRS-01X Quintek Measurement System, EUA), no sentido medula-casca, a cada 0,05 mm.

A partir dos perfis densitométricos obtidos, foram extraídos os valores de densidade aparente correspondentes às mesmas posições radiais utilizadas para a retirada dos corpos de prova destinados às análises anatômicas. Essa correspondência permitiu determinar a densidade aparente das regiões analisadas anatomicamente e, posteriormente, avaliar as relações entre as características anatômicas quantitativas e a densidade da madeira ao longo do sentido medula-casca.

3.4. Análise de Dados

Para análise descritiva dos dados, foram elaborados mapas de calor representando os valores médios das 13 variáveis anatômicas avaliadas, com os respectivos desvios-padrão apresentados em cada célula do gráfico. A disposição dos dados nos gráficos foi estruturada conforme a posição radial da madeira, contemplando as regiões próxima à medula (M), intermediária (I) e próxima ao câmbio (C). Essa organização permitiu comparar visualmente as variações das características analisadas ao longo do sentido medula-casca.

As associações entre as variáveis anatômicas e a densidade da madeira foram avaliadas por meio de Análise de Componentes Principais (PCA), realizada separadamente para cada posição radial. Essa abordagem permitiu identificar as variáveis anatômicas com maior contribuição para a variabilidade dos dados em cada posição radial, bem como avaliar sua relação com a densidade aparente da madeira.

Todas as análises estatísticas foram realizadas no *software R* (versão 4.5.3).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1.Caracterização anatômica

4.1.1. Vasos

Em relação ao diâmetro dos vasos, o ipê-amarelo apresentou resultados com variações menos expressivas (Figuras 1A, 1B, 3A e 3B), enquanto para o vinhático, foi observado um

aumento acentuado no sentido medula-casca (Figuras 2A, 2B, 3A e 3B). Esse comportamento é uma resposta à tendência à formação de madeira adulta, padrão associado ao amadurecimento progressivo do câmbio vascular, com objetivo de aumentar a eficiência da condutividade hídrica (Latorraca; Albuquerque, 2000). Em estudo anatômico conduzido especificamente com *Plathymenia reticulata* em plantio de 19 anos, Longui et al. (2012) verificaram o mesmo comportamento.

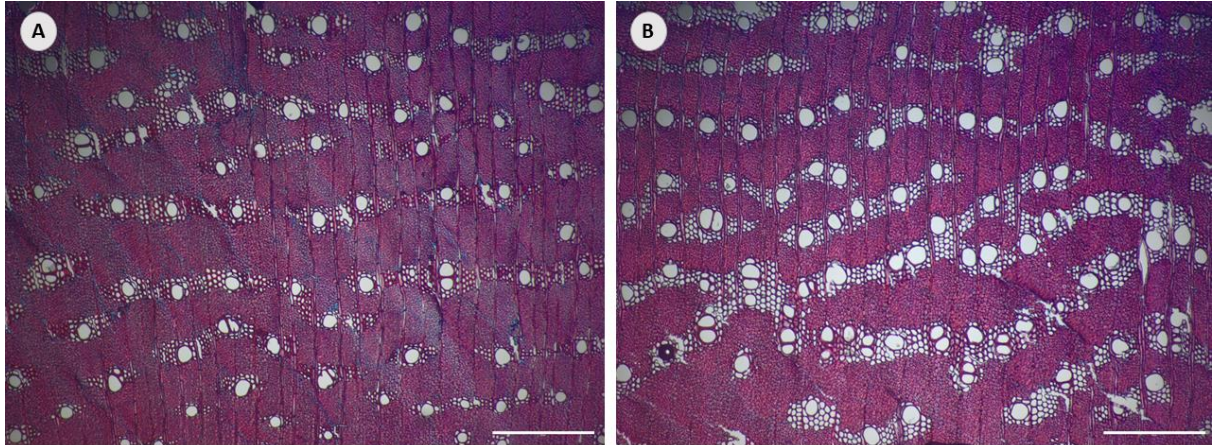


Figura 1. Fotomicrografias do lenho de *Handroanthus serratifolius* – A e B. Secções transversais da região da medula e da casca respectivamente. Barra = 500µm.

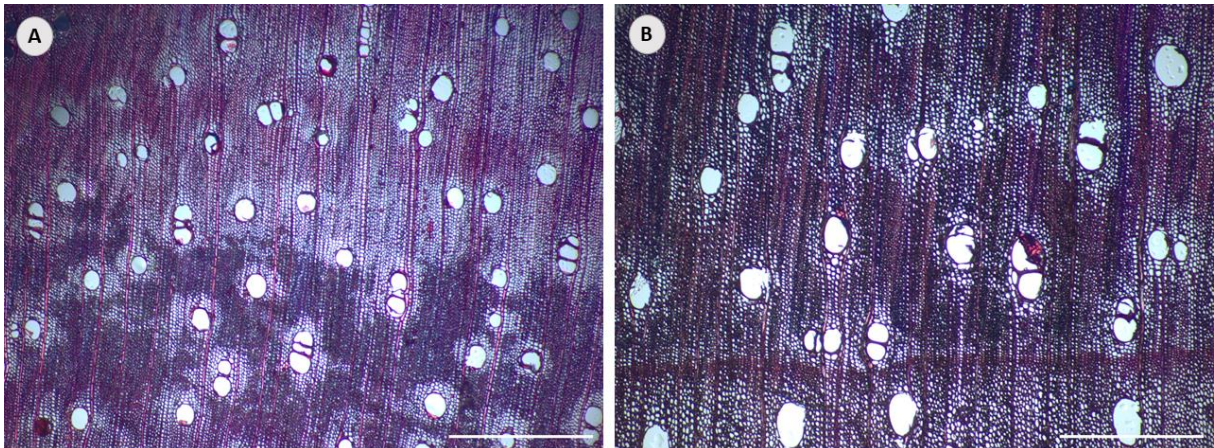


Figura 2. Fotomicrografias do lenho de *Plathymenia reticulata* – A e B. Secções transversais da região da medula e da casca respectivamente. Barra = 500µm.

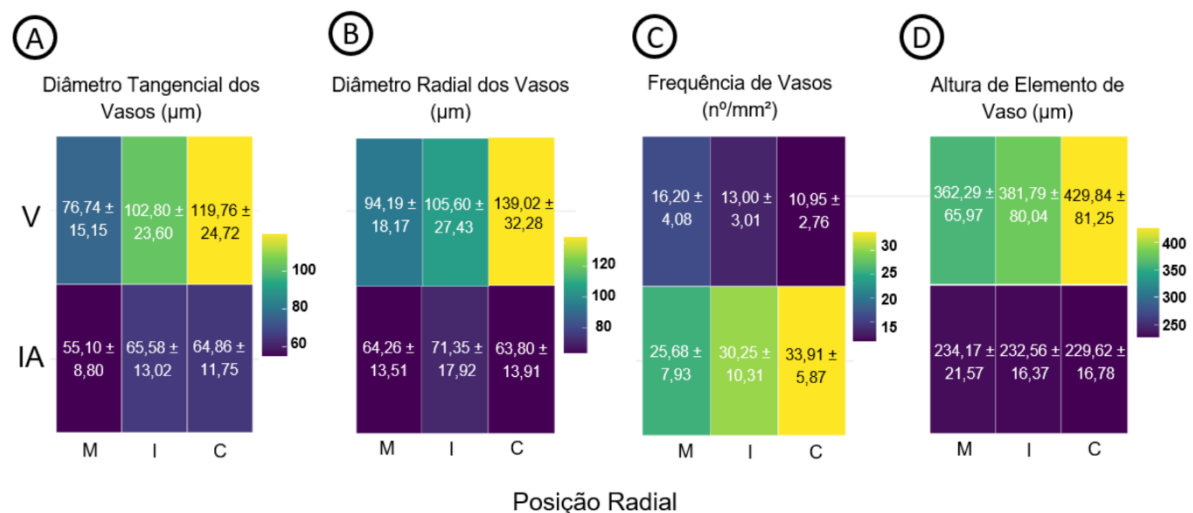


Figura 3. Mapas de calor das variáveis anatômicas relacionadas aos vasos, considerando as posições radiais próxima à medula (M), intermediária (I) e próxima ao câmbio (C). As cores representam os valores médios acompanhados dos respectivos desvios-padrão. A: Diâmetro Tangencial; B: Diâmetro Radial; C: Frequência; D: Altura.

Nota: IA = Ipê-amarelo; V = Vinhático.

Fonte: Elaborada pela autora.

O aumento considerável no diâmetro dos vasos do vinhático promoveu uma consequente redução na frequência dos vasos (Figura 3C). No entanto, para a madeira de ipê-amarelo, observou-se comportamento oposto. Padrão documentado em *Piptadenia gonoacantha*, espécie da família Fabaceae de floresta nativa, em que o aumento do diâmetro foi acompanhado por diminuição da frequência dos vasos no sentido medula–casca (Longui et al., 2010).

Para a altura de vasos, enquanto no vinhático apresentou crescimento expressivo da medula para a casca, o ipê-amarelo manteve-se com menos variações ao longo do raio (Figura 3D).

Testoni et al., (2013) encontraram resultados semelhantes com baixas variações das dimensões dos elementos vasculares ao longo do sentido radial para *Astronium lecointei*, que assim como o ipê-amarelo, é uma espécie caracterizada por alta densidade.

4.1.2. Raios

Para a altura dos raios observou-se a tendência de aumento da medula para a casca em ambas as espécies (Figura 4A). Além disso, o vinhático apresentou raios mais altos em todas as posições analisadas.

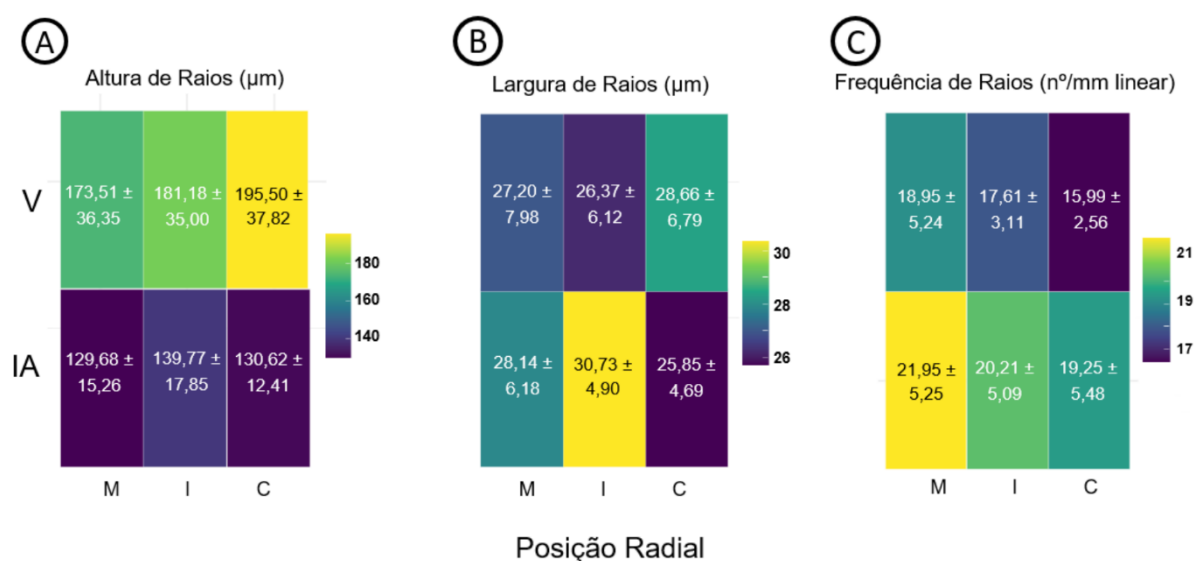


Figura 4. Mapas de calor das variáveis anatômicas relacionadas aos raios, considerando as posições radiais próxima à medula (M), intermediária (I) e próxima ao câmbio (C). As cores representam os valores médios acompanhados dos respectivos desvios-padrão. A: Altura; B: Largura; C: Frequência.

Nota: IA = Ipê-amarelo; V = Vinhático.

Fonte: Elaborada pela autora.

A largura dos raios também apresentou comportamento distinto entre as espécies. No ipê, ocorreu aumento da medula para a região intermediária, seguido de redução na casca. Já o vinhático apresentou pequenas oscilações ao longo do sentido medula-casca (Figura 4B).

A principal tendência observada para os raios foi a redução da frequência radial no sentido medula-casca em ambas as espécies, sendo essa diminuição mais pronunciada no vinhático (Figura 4C). A redução na frequência de raios no sentido medula-casca, observada em ambas as espécies, corrobora o padrão descrito por Lima et al. (2010) para *Croton floribundus* e Urbinati et al. (2003) para *Terminalia ivorensis*. Segundo esses autores, essa redução pode ser consequência da diminuição do número de células iniciais radiais no câmbio vascular, acompanhada pelo aumento proporcional de células iniciais fusiformes.

4.1.3. Fibras

O comprimento de fibras apresentou padrão distinto entre as espécies. No ipê, observou-se comportamento não linear, com queda na posição intermediária e recuperação na região próxima ao câmbio (Figura 5A). No vinhático, por sua vez, verificou-se aumento progressivo no sentido medula-casca, padrão semelhante ao estudado por Cahuana et al. (2019) para espécie pertencente à família Fabaceae, assim como o vinhático, na qual o comprimento de fibras aumentou significativamente da medula para a região próxima à casca.

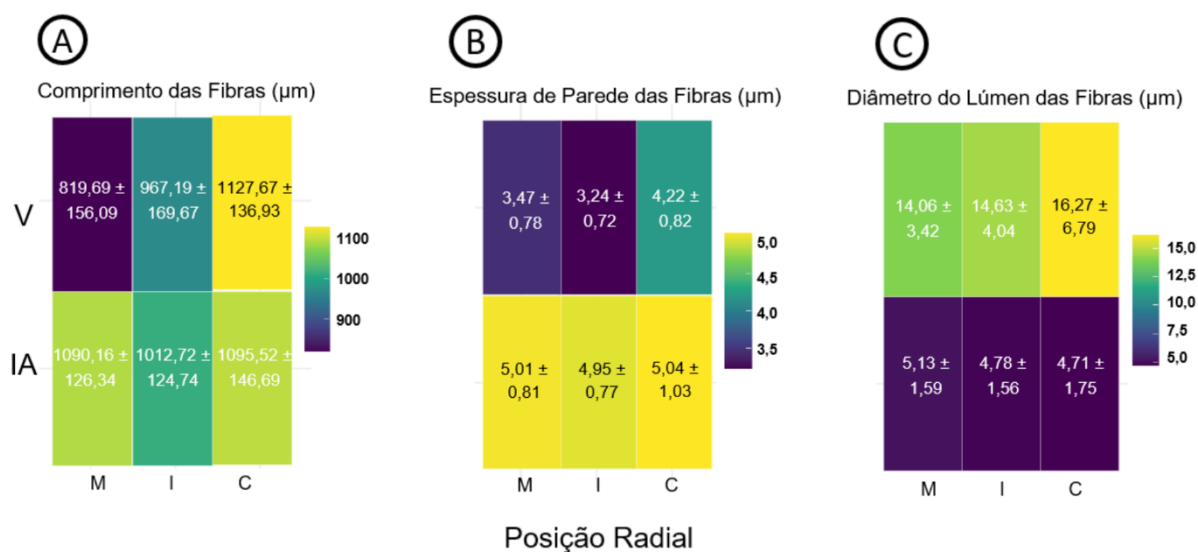


Figura 5. Mapas de calor das variáveis anatômicas relacionadas as fibras, considerando as posições radiais próxima à medula (M), intermediária (I) e próxima ao câmbio (C). As cores representam os valores médios acompanhados dos respectivos desvios-padrão. A: Comprimento; B: Espessura; C: Diâmetro do Lúmen.

Nota: IA = Ipê-amarelo; V = Vinhático.

Fonte: Elaborada pela autora.

No presente estudo, a espessura de parede das fibras permaneceu estável no ipê e apresentou leve variação no vinhático (Figura 5B), cujos valores sistematicamente inferiores indicam paredes mais delgadas em relação ao ipê, o que tem implicação direta sobre a densidade da madeira.

Já o diâmetro do lúmen manteve-se baixo e estável no ipê, enquanto no vinhático apresentou maiores valores e variações (Figura 5C). A redução do diâmetro do lúmen implica em maior proporção de parede celular e, consequentemente, maior massa no lenho, o que contribui para a elevada densidade característica do ipê. Resultado corroborado por Testoni et al. (2009), que verificaram correlação negativa significativa entre o lúmen das fibras e a densidade aparente, concluindo que o lúmen representa espaços vazios que não contribuem para a massa e, portanto, resultam em menores densidades.

4.1.4. Proporção de elementos axiais

As fibras foram o tecido predominante em ambas as espécies, seguidas pela proporção de parênquima axial e, em menor representatividade, pela proporção de vasos, em todas as posições radiais (Figura 6). Esse padrão é condizente com o observado para folhosas em geral, nas quais as fibras constituem a maior parte do tecido lenhoso, sendo a densidade positivamente correlacionada com a fração de parede celular desse elemento (Poorter et al., 2010; Ziemińska et al., 2013).

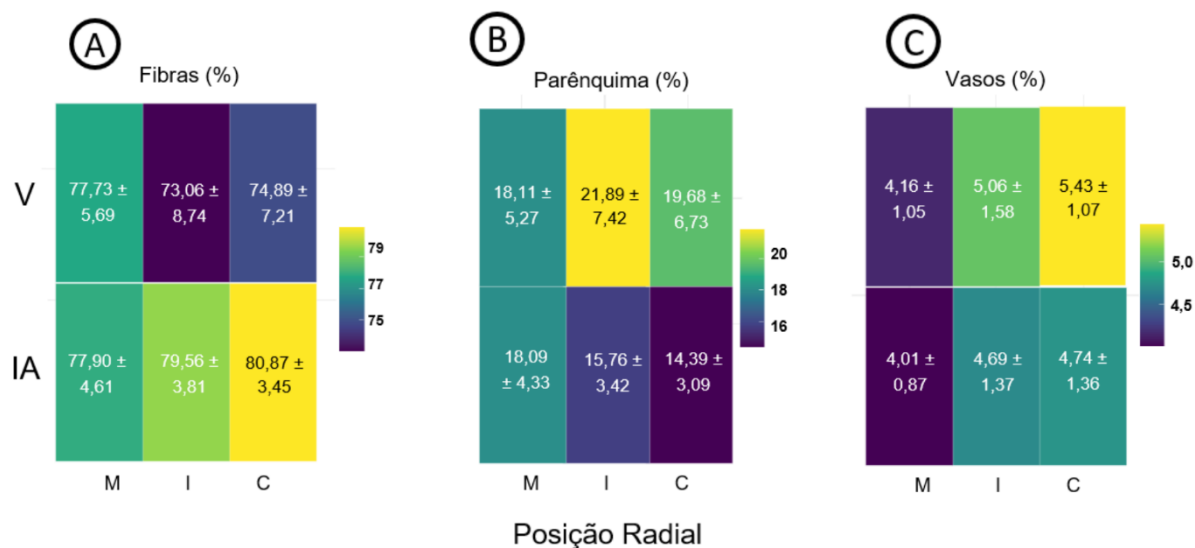


Figura 6. Mapas de calor das variáveis anatômicas relacionadas à proporção de elementos axiais, considerando as posições radiais próxima à medula (M), intermediária (I) e próxima ao câmbio (C). As cores representam os valores médios acompanhados dos respectivos desvios-padrão. A: Fibras; B: Parênquima; C: Vasos.

Nota: IA = Ipê-amarelo; V = Vinhático.

Fonte: Elaborada pela autora.

No sentido medula-casca, o ipê apresentou aumento gradual da proporção de fibras, indicando maior participação do tecido de sustentação nas regiões mais externas do lenho (Figura 6A). O vinhático, por sua vez, apresentou redução da proporção de fibras da medula para a região intermediária, seguida de pequeno aumento na casca, sugerindo estratégias distintas de desenvolvimento do lenho entre as espécies.

Para a proporção de parênquima axial, verificou-se tendência de redução no ipê ao longo do sentido medula-casca, acompanhando o aumento da proporção de fibras (Figura 6B). Essa relação inversa entre os dois tecidos é esperada para folhosas (Ziemińska et al., 2013). No vinhático, o parênquima aumentou da medula para a região intermediária e reduziu na casca, sendo sua proporção maior em todas as posições radiais quando comparado ao ipê.

A proporção de vasos aumentou da medula para a casca em ambas as espécies (Figura 6C), padrão amplamente relatado para madeiras tropicais (Longui et al., 2009). A variação foi menos expressiva no ipê em comparação com o vinhático.

4.2. Variação radial da densidade aparente

As Figuras 7 e 8 apresentam os perfis radiais de densidade aparente da madeira, obtidos por densitometria de raios-X. De modo geral, verifica-se alternância entre regiões de maior e menor densidade ao longo do raio, representadas por tonalidades mais escuras e mais claras, respectivamente. Os perfis densitométricos evidenciam variações contínuas da densidade, com a ocorrência de picos e depressões ao longo da amostra, indicando heterogeneidade estrutural do lenho.

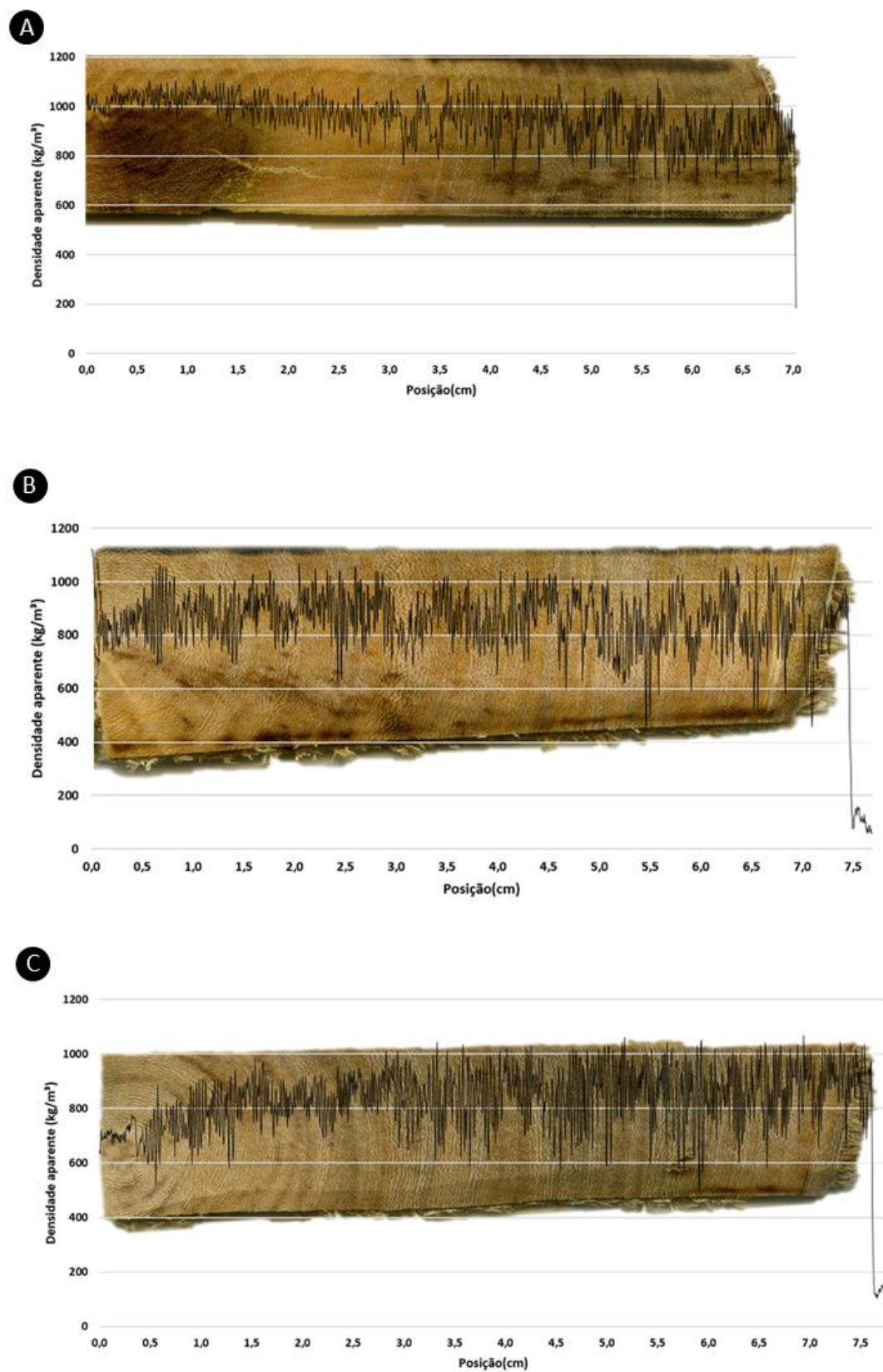


Figura 7. Perfis radiais das densidades aparentes da madeira de *Handroanthus serratifolius*.
A: Árvore 1; B: Árvore 2; C: Árvore 3.
Fonte: Elaborada pela autora.

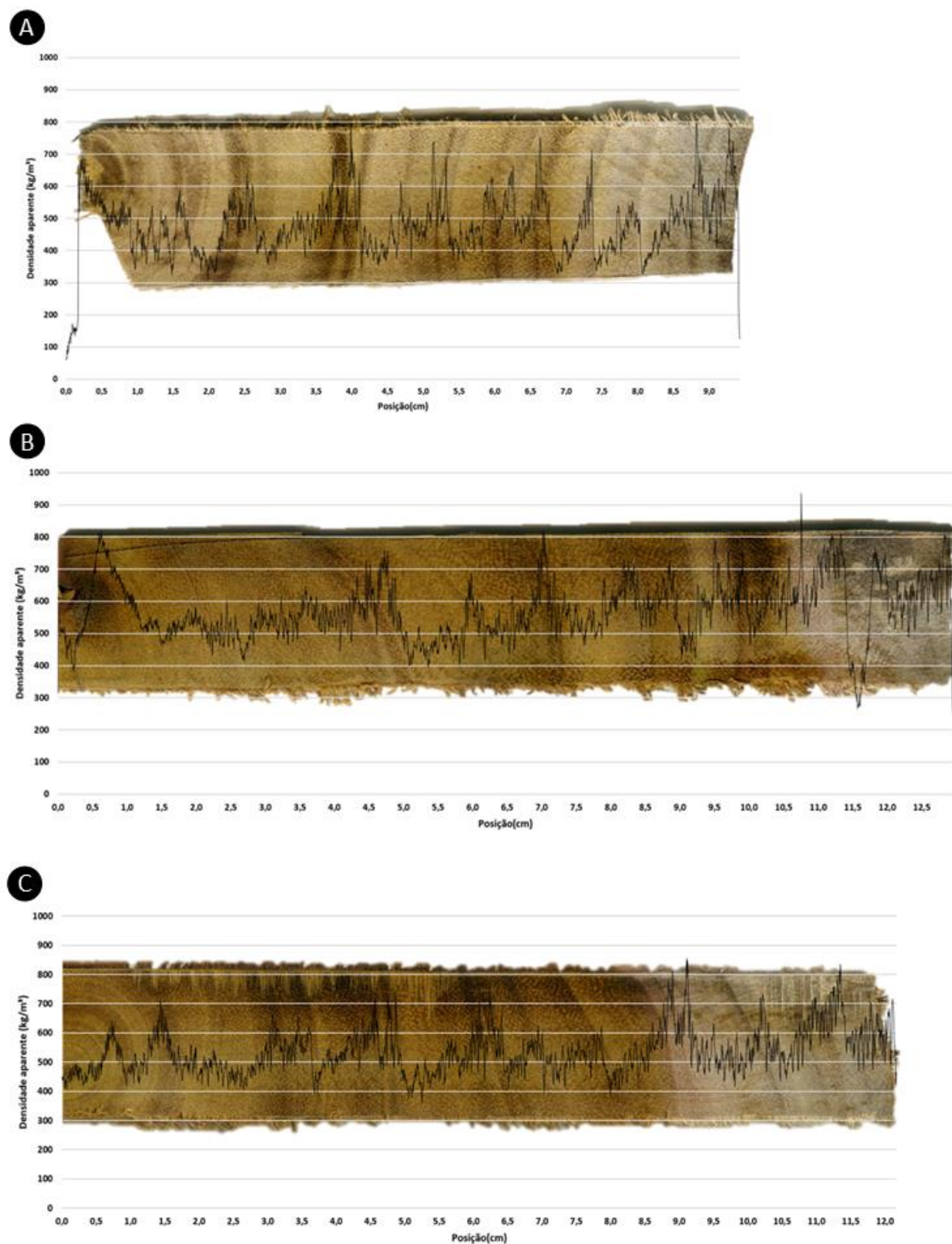


Figura 8. Perfis radiais das densidades aparentes da madeira de *Plathymenia reticulata*. A: Árvore 1; B: Árvore 2; C: Árvore 3.
Fonte: Elaborada pela autora.

4.3. Associações entre as variáveis anatómicas e a densidade da madeira

A análise de componentes principais (PCA) da posição próxima à medula explicou 81% da variância total dos dados (Figura 9). O primeiro componente principal, responsável por 57,5% dessa variância, promoveu a separação entre as espécies. As variáveis que se relacionaram mais fortemente à densidade aparente foram a espessura de parede das fibras e frequência de vasos e de raios, associando-se ao ipê-amarelo, que apresentou maiores valores para essas variáveis. Enquanto os indivíduos do vinhático associaram-se a maiores dimensões celulares, como vasos mais largos, raios mais altos e maior diâmetro do lúmen das fibras. O diâmetro do lúmen das fibras apresentou correlação negativa com a densidade, sendo a variável de maior contribuição para essa posição radial. O segundo componente principal, responsável por 23,5% da variância, capturou a variação interna entre os indivíduos do vinhático.

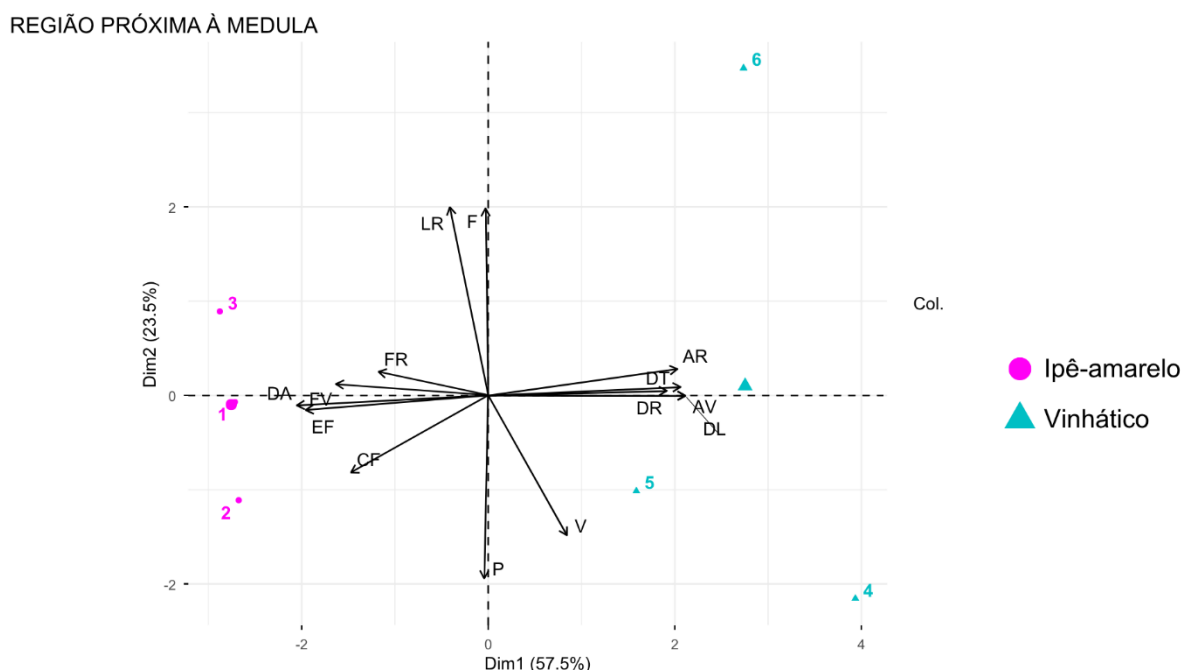


Figura 9. Análise de Componentes Principais (PCA) das variáveis analisadas nas espécies estudadas, considerando os valores médios obtidos na posição radial próxima à medula (M). Nota: DT = Diâmetro Tangencial dos Vasos (μm); DR = Diâmetro Radial dos Vasos (μm); FV = Frequência de Vasos ($\text{n}^\circ/\text{mm}^2$); AV = Altura de Elemento de Vaso (μm); AR = Altura de Raios (μm); LR = Largura de Raios (μm); FR = Frequência de Raios (n°/mm linear); CF = Comprimento das Fibras (μm); DL = Diâmetro do Lúmen das Fibras (μm); EF = Espessura de Parede das Fibras (μm); DA = Densidade Aparente (kg/m^3).

Fonte: Elaborada pela autora.

Na região próxima à medula, a densidade aparente foi determinada pela combinação das variáveis de espessura de parede das fibras, frequência de vasos e raios, correlacionando-se fortemente ao ipê-amarelo e, apresentou-se em contraposição ao diâmetro do lúmen das fibras e aos diâmetros de vasos. Este é um comportamento esperado para essa região, já que nessa

fase o indivíduo arbóreo tende a apresentar fibras menos espessas e lúmen mais amplo, resultando em maiores espaços vazios no lenho, reduzindo a densidade aparente.

Segundo Longui et al. (2009), o diâmetro dos vasos e a espessura da parede das fibras tendem a ser significativamente menores na região da medula, enquanto o lúmen das fibras é maior nessa região.

Esse padrão indica que, na região próxima à medula, as duas espécies apresentam estratégias anatômicas distintas. O ipê investiu em paredes celulares mais espessas e maior frequência de elementos condutores e de suporte, o que resultou em maior densidade aparente para a espécie. Resultado semelhante foi observado na literatura, segundo a qual espécies de alta densidade normalmente apresentam fibras de parede mais espessa em comparação àquelas de menor densidade (Monteiro et al., 2026). O vinhático, por sua vez, forma células de maiores dimensões e lúmens mais amplos, refletindo uma estratégia de crescimento com menor investimento em parede celular. Corroborando esse resultado, Testoni et al. (2009), estudando *Plathymenia reticulata*, observaram que o diâmetro do lúmen das fibras foi a variável de maior contribuição às variações de densidade, com correlação negativa significativa, uma vez que o lúmen representa espaço vazio que não contribui para a massa específica da madeira.

A variação capturada pela segunda componente principal entre os indivíduos do vinhático, associada principalmente à proporção de fibras, de parênquima e vasos, reflete a heterogeneidade anatômica natural esperada entre indivíduos de uma mesma espécie, o que pode estar relacionado à condição de plantio jovem, no qual as árvores ainda apresentam variabilidade nas proporções dos tecidos constituintes do lenho.

A distribuição dos vetores ao longo dos eixos principais evidencia a ausência de um agrupamento anatômico predominante, uma vez que variáveis relacionadas aos vasos, fibras, raios e parênquima axial encontram-se distribuídas em diferentes direções. Tal comportamento indica que a variação da densidade aparente nessa região decorre da interação entre múltiplas variáveis anatômicas, não sendo explicada por um único componente estrutural.

A maior dispersão das variáveis observada na região próxima à medula pode estar relacionada às características do lenho juvenil, formado nos estágios iniciais de crescimento da árvore. Nessa região, os elementos anatômicos apresentam maior variabilidade estrutural, resultando em associações menos definidas com a densidade aparente. Esse comportamento reflete as mudanças graduais que ocorrem durante o desenvolvimento e a maturação da madeira ao longo do crescimento radial da árvore (Plomion et al., 2001).

A PCA da posição intermediária explicou 85,0% da variância total, com o primeiro componente principal respondendo por 62,0%, valor maior do que o observado na posição próxima à medula, indicando que a diferenciação entre as espécies se consolida progressivamente no sentido radial do lenho (Figura 10). O segundo componente principal expressou principalmente a variação intraespecífica do vinhático.

REGIÃO INTERMEDIÁRIA

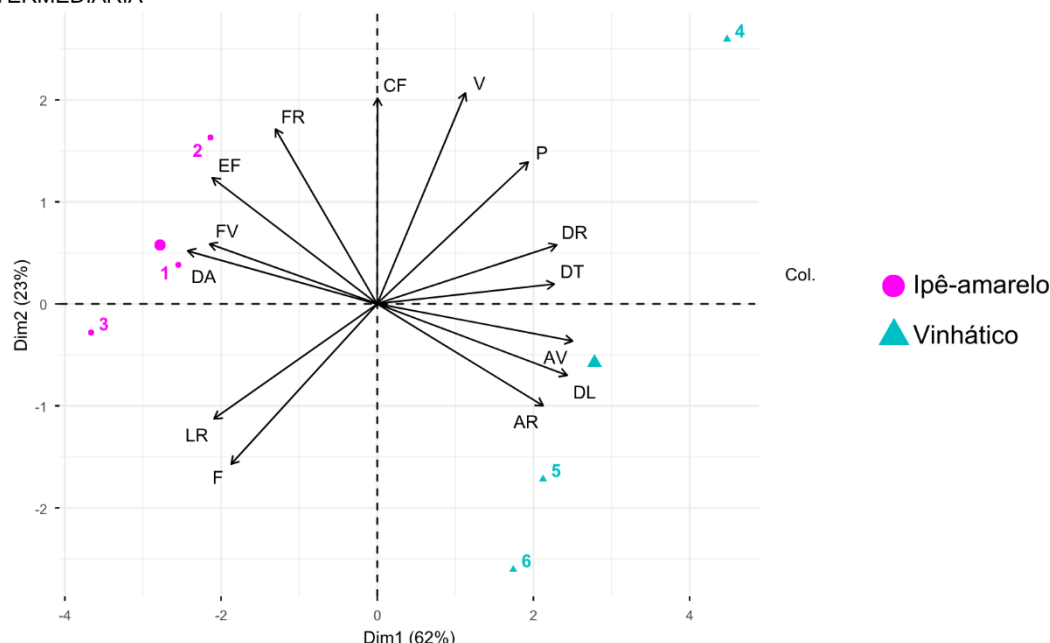


Figura 10. Análise de Componentes Principais (PCA) das variáveis analisadas nas espécies estudadas, considerando os valores médios obtidos na posição radial intermediária (I). Nota: DT = Diâmetro Tangencial dos Vasos (μm); DR = Diâmetro Radial dos Vasos (μm); FV = Frequência de Vasos ($\text{n}^\circ/\text{mm}^2$); AV = Altura de Elemento de Vaso (μm); AR = Altura de Raios (μm); LR = Largura de Raios (μm); FR = Frequência de Raios (n°/mm linear); CF = Comprimento das Fibras (μm); DL = Diâmetro do Lúmen das Fibras (μm); EF = Espessura de Parede das Fibras (μm); DA = Densidade Aparente (kg/m^3).

Fonte: Elaborada pela autora.

Na posição intermediária, a variável que mais associou-se à densidade aparente foi a frequência de vasos, além da contribuição da espessura de parede das fibras e frequência e largura dos raios, além da proporção de fibras. Contudo, permanece consistentemente oposta ao diâmetro do lúmen das fibras. Em angiospermas, o aumento da massa específica é determinado primordialmente pela fração de parede celular das fibras e sua relação com o lúmen (Martínez-Cabrera et al., 2009).

Embora a literatura aponte correlações positivas entre densidade e comprimento de fibras ao longo do gradiente radial em espécies nativas (Lima et al., 2011), na posição intermediária o comprimento das fibras não se mostrou o principal determinante da densidade aparente. Nessa posição, a densidade sofreu maiores influências da espessura da parede das fibras, além da frequência dos vasos e dos raios, que permaneceram associados à espécie de ipê-amarelo. Esse resultado encontra respaldo em Santos et al. (2011), que, ao analisarem *Astronium graveolens*, demonstraram que o aumento na proporção de paredes celulares espessas eleva a massa do tecido lenhoso e, conseqüentemente, a densidade básica, efeito intensificado pelo fato das fibras ocorrerem em maior proporção do que os demais elementos celulares na madeira de angiospermas.

O segundo componente principal expressou variação nas proporções de tecidos e no comprimento das fibras entre os indivíduos do vinhático. Um indivíduo destacou-se dos demais por apresentar células de maiores dimensões, sinalizando variabilidade intraespecífica nessa espécie na região intermediária. Tal variação pode ser esperada em espécies nativas de origem seminal, uma vez que a estrutura anatômica e as propriedades físicas do lenho variam

significativamente não apenas entre espécies, mas também entre árvores de uma mesma espécie, em função de fatores genéticos e ambientais (Trevisan et al., 2013).

Na região intermediária, observa-se que as características anatômicas passam a apresentar associações mais definidas com a densidade aparente. O início da organização entre os vetores sugere que essas variáveis passaram a contribuir de maneira mais integrada para a variação da densidade da madeira, diferentemente do padrão observado na região próxima à medula, onde as relações se mostraram menos estruturadas.

Nesse contexto, a densidade aparente passa a apresentar associação mais consistente com a espessura da parede das fibras e a frequência de vasos. Esse padrão sugere que a variação da densidade, nessa posição radial, está relacionada à contribuição conjunta de características associadas tanto ao tecido fibroso quanto à organização dos elementos vasculares. Em contrapartida, variáveis relacionadas ao tamanho dos vasos e ao lúmen tendem a apresentar orientação distinta, indicando uma relação menos direta com o incremento da densidade da madeira.

Na região próxima ao câmbio, o primeiro componente principal atingiu o maior poder explicativo comparado às regiões discutidas anteriormente, enquanto o segundo componente reduziu sua contribuição para 15,4% (Figura 11). Essa configuração indica que a separação entre as espécies torna-se ainda mais nítida do que nas outras regiões radiais do lenho, demonstra um reflexo da consolidação do padrão anatômico característico de cada espécie com o amadurecimento do lenho (Longui et al., 2011).

REGIÃO PRÓXIMA AO CÂMBIO

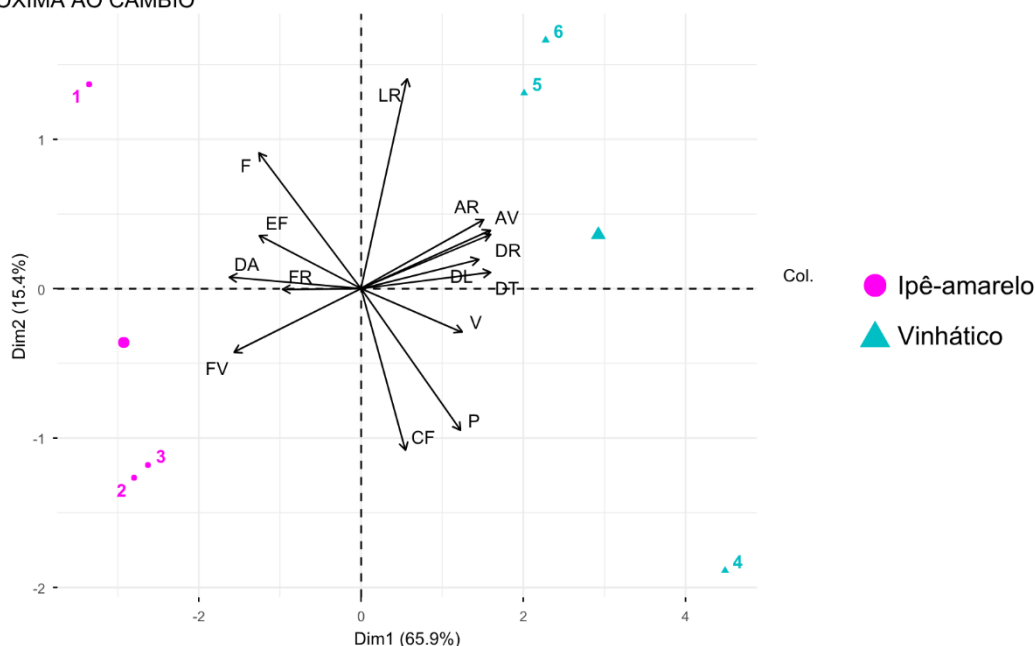


Figura 11. Análise de Componentes Principais (PCA) das variáveis analisadas nas espécies estudadas, considerando os valores médios obtidos na posição radial próxima ao câmbio (C). Nota: DT = Diâmetro Tangencial dos Vasos (μm); DR = Diâmetro Radial dos Vasos (μm); FV = Frequência de Vasos ($\text{n}^\circ/\text{mm}^2$); AV = Altura de Elemento de Vaso (μm); AR = Altura de Raios (μm); LR = Largura de Raios (μm); FR = Frequência de Raios (n°/mm linear); CF = Comprimento das Fibras (μm); DL = Diâmetro do Lúmen das Fibras (μm); EF = Espessura de Parede das Fibras (μm); DA = Densidade Aparente (kg/m^3).

Fonte: Elaborada pela autora.

No primeiro componente, a densidade aparente projetou-se em direção oposta às variáveis de dimensão dos vasos e raios, evidenciando relação inversa entre essas características. A espessura de parede das fibras, a proporção de fibras e as frequências de vasos e raios foram as variáveis com vetores mais próximos ao da densidade aparente, indicando associação com essa propriedade. Nessa região, considerando as espécies do presente estudo, o lenho formado atinge uma fase de maior maturidade comparada a região próxima à medula. As células produzidas nessa posição atingem maior diferenciação, com fibras de paredes mais espessas e lúmen proporcionalmente menor e tendendo a estabilização dos elementos anatômicos, resultando em maiores valores de densidade aparente ao longo do raio. Esse resultado é coerente com o padrão descrito para espécies nativas, onde a espessura da parede das fibras apresenta correlação positiva com a densidade, aumentando gradativamente da medula para a casca (Longui et al., 2010).

Os indivíduos de ipê concentraram-se ao lado negativo do primeiro componente, associados à maior densidade aparente, espessura de parede das fibras e maior proporção de fibras, conjunto anatômico que garante alta densidade e contribui para a resistência mecânica dessa espécie. Os indivíduos de vinhático posicionaram-se ao lado positivo, associados às maiores dimensões de diâmetros tangencial e radial, área e comprimento dos vasos, além da associação com raios de maior largura e altura, variáveis com vetores opostos ao da densidade aparente. Esse padrão é coerente com o “trade-off funcional” descrito para angiospermas tropicais, no qual vasos de maiores dimensões favorecem a eficiência hidráulica, mas reduzem o espaço disponível para fibras de parede espessa, como um mecanismo de compensação, resultando em densidades sistematicamente mais baixas (Ziemińska et al., 2013; Santos et al., 2011).

Os resultados observados no sentido medula-casca corroboram a teoria de transição entre o lenho juvenil e adulto descrita por Latorraca e Albuquerque (2000). A distribuição dispersa das variáveis na região da medula reflete a instabilidade fisiológica típica dos primeiros anos de crescimento, onde a taxa de mudança das propriedades anatômicas é mais acelerada.

Por outro lado, a estruturação mais evidente e consistente das variáveis anatômicas próxima ao câmbio pode indicar o início do processo de maturação cambial, fase em que o xilema tende a apresentar células com paredes mais espessas, lúmens proporcionalmente menores e maior deposição de material lenhoso, características que, em conjunto, favorecem o incremento da densidade aparente da madeira (Vidaurre et al., 2011).

Cabe ressaltar que, com 11 anos de idade, não é possível afirmar a presença de lenho adulto consolidado; entretanto, o padrão observado na posição próxima ao câmbio, comparada às posições intermediária e próxima à medula pode indicar o início de maturação estrutural do xilema secundário (Palermo et al., 2015). Nesta fase, a densidade passa a responder de maneira mais organizada à quantidade de material sólido por unidade de área, especialmente à espessura de parede das fibras (Suckow et al., 2009).

5. CONCLUSÕES

Os resultados evidenciam que a densidade aparente da madeira das espécies estudadas resulta da interação de múltiplos caracteres anatômicos, confirmando seu caráter multideterminado. As associações entre as variáveis anatômicas e a densidade da madeira revelam um padrão consistente ao longo da variação radial em ambas as espécies avaliadas.

A densidade aparente associa-se, principalmente, de forma positiva com a espessura da parede das fibras, e negativamente com os diâmetros dos vasos e das fibras, e com as alturas dos vasos e dos raios. Essas associações tornam-se mais evidentes na região próxima ao câmbio,

indicando maior integração na madeira mais madura. Como esperado, espécies mais densas, representadas neste estudo pelo ipê-amarelo, são caracterizadas por fibras com paredes mais espessas e elementos celulares com menores diâmetros.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAHUANA, Leif Armando Portal et al. Variabilidad radial física y anatómica del leño de árboles de Amburana cearensis (Allemão) AC Sm. **Colombia forestal**, v. 22, n. 1, p. 17-26, 2019. <https://doi.org/10.14483/2256201x.13083>

CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, 2014. v. 5, p. 419-429.

CASTRO, Vinícius Resende de e TOMAZELLO FILHO, Mário e SURDI, Paula Gabriella. **Avaliação do perfil radial do lenho de árvores de Pinus (Pinus caribaea var. hondurensis Barr. et Golf.) por densitometria de raios X**. Scientia Forestalis, v. 42, n. 103, p. 353-360, 2014. Disponível em: <http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr103/cap05.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2026.

CRUZ, Clair Rogério da; LIMA, José Tarcísio; MUNIZ, Graciela Inês Bolzon de. Variações dentro das árvores e entre clones das propriedades físicas e mecânicas da madeira de híbridos de Eucalyptus. **Scientia Forestalis** - n. 64, 2003

DE CASTRO, Fabio; WILLIAMSON, G. Bruce; DE JESUS, Renato Moraes. Radial variation in the wood specific gravity of *Joannesia princeps*: the roles of age and diameter. **Biotropica**, p. 176-182, 1993. <https://doi.org/10.2307/2389181>

DE OLIVEIRA MONTEIRO, Rebeca et al. Wood anatomy and its effects on physical properties in nineteen commercial species. **Brazilian Journal of Botany**, v. 49, n. 1, p. 13, 2026. <https://doi.org/10.1007/s40415-026-01136-4>

LATORRACA, João Vicente de F.; ALBUQUERQUE, Carlos Eduardo C. de. Efeito do rápido crescimento sobre as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 7, n. 1, p. 279-291, 2000.

LIMA, Israel Luiz de et al. Variação radial da densidade básica e dimensões celulares da madeira de *Cariniana legalis* (Mart.) O. Kuntze em função da procedência. **Cerne**, v. 17, p. 517-524, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602011000400010>

LIMA, Israel Luiz de et al. Variação radial da densidade básica e dimensões celulares de *Croton floribundus*. 2010. <https://doi.org/10.5380/rf.v40i3.18929>

LOBÃO, Moisés Silveira et al. Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. **Revista Árvore**, v. 28, n. 6, p. 889-894, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622004000600014>

LONGUI, Eduardo Luiz et al. Correlações entre algumas propriedades físicas, características químicas e anatómicas da madeira de *Luehea divaricata* Mart. Malvaceae (Tiliaceae). **Revista do Instituto Florestal**, v. 22, n. 2, p. 177-187, 2010. <https://doi.org/10.24278/2178-5031.2010222259>

LONGUI, Eduardo Luiz et al. Estrutura do lenho de *Plathymenia reticulata* e algumas implicações na eficiência hidráulica e resistência mecânica. 2012.

<https://doi.org/10.5380/rf.v42i2.19524>

LONGUI, Eduardo Luiz et al. Variação anatômica radial do lenho de açoita-cavalo (*Luehea divaricata*) e sua influência na densidade aparente. **Revista do Instituto Florestal**, v. 21, n. 2, p. 181-190, 2009. <https://doi.org/10.24278/2178-5031.2009212223>

LONGUI, Eduardo Luiz et al. Variação radial das características anatômicas, densidade aparente, teores de extrativos, lignina e holocelulose na madeira de *Piptadenia gonoacantha* (Mart.) Macbr. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 341-353, 2010.

MARCHESAN, Raquel et al. Caracterização físico-mecânica da floresta de *Plathymenia reticulata* Benth (vinhedo-do-campo), espécie nativa do Cerrado do Estado de Tocantins. **Floresta**, v. 51, n. 1, 2021. <https://doi.org/10.5380/rf.v51i1.68591>

MARTÍNEZ-CABRERA, Hugo I. e outros. Anatomia da madeira e densidade da madeira em arbustos: respostas à variação da aridez ao longo de transectos transcontinentais. **American Journal of Botany**, v. 96, n. 8, p. 1388-1398, 2009.

MATTOS, Bruno D. et al. Variação axial da densidade básica da madeira de três espécies de gimnospermas. **Agrária-Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, n. 1, p. 121-126, 2011. DOI: [10.5039/agraria.v6i1a1080](https://doi.org/10.5039/agraria.v6i1a1080)

Moreschi JC. 2014. **Propriedades da madeira**. 4 ed. Curitiba: Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR.

MOTTA, Javan Pereira et al. Caracterização da madeira de quatro espécies florestais. **Ciência Rural**, v. 44, n. 12, p. 2186-2192, 2014. DOI: 10.1590/0103-8478cr20130479

PALERMO, GP de 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, n. 6, p. 775-780, 2015. DOI: [10.1007/s00107-015-0947-4](https://doi.org/10.1007/s00107-015-0947-4)

PLOMION, Christophe; LEPROVOST, Grégoire; STOKES, Alexia. Wood formation in trees. **Plant physiology**, v. 127, n. 4, p. 1513-1523, 2001. <https://doi.org/10.1104/pp.010816>

POORTER, Lourens et al. A importância das características da madeira e da condutância hidráulica para o desempenho e estratégias de ciclo de vida de 42 espécies de árvores de floresta tropical. **Novo fitologista**, v. 185, n. 2, p. 481-492, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03092>

RUY, Osmar Francisco. **Variação da qualidade da madeira em clones de *Eucalyptus urophylla* ST Blake da Ilha de Flores, Indonésia**. 1998. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SANTOS, Camila Moura et al. A densidade básica e características anatômicas variam radialmente na madeira de *Astronium graveolens* Jacq.(Anacardiaceae). **Revista do Instituto Florestal**, v. 23, n. 2, p. 191-201, 2011. <https://doi.org/10.24278/2178-5031.2011232294>

SILVA, C. E. S. et al. **Caracterização física, mecânica e de trabalhabilidade de madeiras de seis espécies da Mata Atlântica**. Madeiras Nativas e Plantadas do Brasil qualidade, pesquisas e atualidades. DOI:10.37885/210303812

SILVA, Maria Emília CM; LOUZADA, José Luis PC. **UTILIZAÇÃO DA MICRODENSITOMETRIA POR RAIOS X NA AVALIAÇÃO QUALITATIVA DA MADEIRA DE CHOUPÓ (POPULUS X EURAMERICANA. CV I. 214).** 2001.

SOS MATA ATLÂNTICA; INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Atlas da Mata Atlântica, 2026. Disponível em: [Atlas da Mata Atlântica | SOS Mata Atlântica](#). Acesso em: 10 maio. 2026.

SUCKOW, Itiberê Moura Sckerratt et al. Anatomia da madeira e densidade básica de Angico-branco *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan. **Instituto Florestal Serie Registrais**, v. 40, p. 131-135, 2009. <https://doi.org/10.4322/rif.2014.015>

TESTONI, L. N. et al. Anatomia, densidade aparente e velocidade de propagação do som na madeira de *Plathymenia reticulata*. **Instituto Florestal, Série Registros**, v. 40, p. 125-130, 2009. DOI:[10.5380/rf.v42i2.19524](https://doi.org/10.5380/rf.v42i2.19524)

TREVISAN, Rômulo et al. Dimensões das fibras e sua relação com a idade de transição entre lenho juvenil e adulto de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex maiden. **Ciência Florestal**, v. 27, p. 1385-1393, 2017. <https://doi.org/10.5902/1980509830220>

URBINATI, C.; AZEVEDO, A. A.; SILVA, E. A. M.; LISBOA, P. L. Variação estrutural quantitativa no lenho de *Terminalia ivorensis* A. CHEV, Combretaceae. *Acta Botanica Brasilica*, São Paulo, v. 17, n. 3. 421-437, 2003.

VIDAURRE, Graziela et al. Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 18, p. 469-480, 2011. <https://doi.org/10.4322/floram.2011.066>

WOODCOCK, D.; SHIER, A. Wood specific gravity and its radial variations: the many ways to make a tree. **Trees**, v. 16, n. 6, p. 437-443, 2002. <https://doi.org/10.1007/s00468-002-0173-7>

ZIEMIŃSKA, Kasia et al. Fibre wall and lumen fractions drive wood density variation across 24 Australian angiosperms. **AoB Plants**, v. 5, p. plt046, 2013. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plt046>

ZIEMIŃSKA, Kasia; WESTOBY, Mark; WRIGHT, Ian J. Broad anatomical variation within a narrow wood density range—A study of twig wood across 69 Australian angiosperms. **PLoS One**, v. 10, n. 4, p. e0124892, 2015. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0139496>