

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS - *CAMPUS* SÃO JOÃO EVANGELISTA
BACHARELADO EM ENGENHARIA FLORESTAL

João Paulo Monteiro

**MAPEAMENTO DETALHADO DA VARIAÇÃO RADIAL DA DENSIDADE BÁSICA
DA MADEIRA DE *EUCALYPTUS CLOEZIANA* E COMPARAÇÃO DA MÉDIA
ARITMÉTICA SIMPLES E PONDERADA**

São João Evangelista

2026

JOÃO PAULO MONTEIRO

**MAPEAMENTO DETALHADO DA VARIAÇÃO RADIAL DA DENSIDADE BÁSICA
DA MADEIRA DE *EUCALYPTUS CLOEZIANA* E COMPARAÇÃO DA MÉDIA
ARITMÉTICA SIMPLES E PONDERADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São
João Evangelista, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Edgard Geraldo Bertoli
Trindade

São João Evangelista

2026

M775m Monteiro, João Paulo.

Mapeamento detalhado da variação radial da densidade básica da madeira de *eucalyptus cloeziana* e comparação da média aritmética simples e ponderada/ João Paulo Monteiro – 2026.

28f.: il.

Orientador: Dr. Edgard Geraldo Bertoli Trindade.

Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado em Engenharia Florestal) – Instituto Federal Minas Gerais. *Campus* São João Evangelista, 2026.

1. Densidade. 2. Eucaliptus. 3. Mapeamento. I. Monteiro, João Paulo. II. Instituto Federal de Minas Gerais *Campus* SJE. III. Título.

CDD 634.973

Catálogo: Esther Soares Cunha - CRB-6/4333

João Paulo Monteiro

**MAPEAMENTO DETALHADO DA VARIAÇÃO RADIAL DA DENSIDADE BÁSICA
DA MADEIRA DE *EUCALYPTUS CLOEZIANA* E COMPARAÇÃO DA MÉDIA
RITMÉTICA SIMPLES E PONDERADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus São João Evangelista*, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Edgard Geraldo Bertoli Trindade

Aprovado em: 14/07/2026 pela banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **EDGARD GERALDO BERTOLI TRINDADE**
Data: 14/07/2026 10:15:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Edgard Geraldo Bertoli Trindade – IFMG

Documento assinado digitalmente
 **LARISSA NARA NASCIMENTO DE MIRANDA**
Data: 14/07/2026 10:13:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Msc. Larissa Nara Nascimento de Miranda – UFLA

Documento assinado digitalmente
 **MARIA RITA RAMOS MAGALHAES**
Data: 14/07/2026 10:22:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Msc. Maria Rita Ramos Magalhães – IFMG

*Dedico esta conquista a Deus, aos meus avós,
à minha família e aos meus amigos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder saúde, força e perseverança para concluir mais esta etapa da minha vida.

Aos meus pais e familiares, por todo o incentivo, compreensão e apoio durante a graduação. Sem vocês, essa conquista não teria o mesmo significado.

Ao meu orientador, Prof. Edgard Geraldo Bertoli Trindade, pela disponibilidade, pelos ensinamentos e pela orientação ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também aos professores do curso de Engenharia Florestal do IFMG – Campus São João Evangelista, que contribuíram para minha formação acadêmica e profissional, compartilhando conhecimentos que levarei para toda a vida.

Aos meus amigos e colegas, obrigado pela parceria, pelas conversas, pelas trocas de experiências e pelos momentos vividos durante a graduação.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, de forma direta ou indireta, contribuíram para que eu chegasse até aqui. Esta conquista também é resultado do apoio e da presença de cada uma delas.

RESUMO

A densidade básica da madeira é uma das propriedades tecnológicas mais importantes para a caracterização da matéria-prima florestal, estando diretamente relacionada ao desempenho mecânico, rendimento industrial e qualidade dos produtos derivados da madeira. Entretanto, essa propriedade apresenta variação ao longo do tronco, especialmente no sentido radial, em função das diferenças entre lenho juvenil e lenho adulto. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo mapear detalhadamente a variação radial da densidade básica da madeira de *Eucalyptus cloeziana* e comparar estimativas obtidas por média aritmética simples e média ponderada pela área representada por cada amostra no disco. O estudo foi conduzido em um povoamento experimental com aproximadamente 15 anos de idade, localizado no IFMG – Campus São João Evangelista. Foram selecionadas três árvores representativas do diâmetro médio do povoamento, das quais foram retirados discos à altura do DAP (1,30 m). A partir desses discos, foram obtidas amostras sequenciais ao longo de todo o perfil radial, em intervalos de aproximadamente 5 mm. A densidade básica foi determinada pela relação entre massa seca e volume saturado. Os resultados evidenciaram aumento gradual da densidade básica da medula para a casca em todas as árvores avaliadas, com valores mínimos próximos de $0,34 \text{ g cm}^{-3}$ na região medular e superiores a $0,70 \text{ g cm}^{-3}$ nas regiões externas, mas em geral, mantendo-se próximo a $0,60 \text{ g cm}^{-3}$. A média geral obtida por média aritmética simples foi de $0,498 \text{ g cm}^{-3}$, enquanto a média ponderada atingiu $0,555 \text{ g cm}^{-3}$. Conclui-se que a média ponderada fornece estimativas mais representativas da densidade da madeira, evitando a subestimação observada na média aritmética simples. A diferença média entre os métodos foi de aproximadamente 57 kg m^{-3} , valor que pode representar impactos significativos em estimativas de massa e planejamento industrial quando extrapolado para grandes volumes de madeira.

Palavras-chave: Lenho juvenil. Lenho adulto. Qualidade da madeira. Medula-casca. Propriedades físicas da madeira.

ABSTRACT

Wood basic density is one of the most important technological properties for characterizing forest raw materials, being directly related to mechanical performance, industrial yield, and the quality of wood-derived products. However, this property varies throughout the stem, especially in the radial direction, due to differences between juvenile and mature wood. In this context, the present study aimed to perform a detailed mapping of the radial variation in the basic density of *Eucalyptus cloeziana* wood and to compare estimates obtained using the simple arithmetic mean and the weighted mean based on the area represented by each sample within the disc. The study was conducted in an experimental stand approximately 15 years old, located at the IFMG – São João Evangelista Campus. Three trees representative of the stand's mean diameter were selected, and discs were collected at breast height (1.30 m). Sequential samples were then obtained along the entire radial profile at approximately 5 mm intervals. Basic density was determined as the ratio between oven-dry mass and saturated volume. The results showed a gradual increase in basic density from the pith to the bark in all evaluated trees, with minimum values close to 0.34 g cm^{-3} in the pith region and values to 0.70 g cm^{-3} in the outer regions, although values generally remained close to 0.60 g cm^{-3} . The overall mean basic density obtained by the simple arithmetic mean was 0.498 g cm^{-3} , whereas the weighted mean reached 0.555 g cm^{-3} . It was concluded that the weighted mean provides more representative estimates of wood density, avoiding the underestimation observed when using the simple arithmetic mean. The average difference between the methods was approximately 57 kg m^{-3} , a value that may significantly affect mass estimates and industrial planning when extrapolated to large volumes of wood.

Keywords: Juvenile wood. Mature wood. Wood quality. Pith-to-bark variation. Physical properties of wood.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Discos obtidos à altura do DAP (1,30 m) para cada árvore amostrada.....	14
Figura 2 – Obtenção de amostras representativas de toda a seção radial do tronco para cada árvore amostrada.....	15
Figura 3 – Determinação das espessuras de cada amostra para posterior ponderação da densidade básica e análise gráfica. Onde A = Amostras representativas de toda a seção radial e B = Determinação das espessuras das amostras com paquímetro.....	16
Figura 4 – Procedimento de saturação das amostras em dessecador acoplado a bomba de vácuo. Onde A = Amostras separadas por árvore para serem levadas ao dessecador e B = Amostras em dessecador conectado à bomba de vácuo para saturação das amostras.....	17
Figura 5 – Procedimento de determinação do volume saturado das amostras. Onde A = Amostras saturadas e B = Determinação do volume saturado pelo método de imersão utilizados o mercúrio como fluido de deslocamento.....	18
Figura 6 – Secagem das amostras em estufa e pesagem para obtenção da massa seca. Onde A = Secagem das amostras em estufa a $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e B = Pesagem das amostras para determinação da massa seca.....	19
Figura 7 – Demonstração esquemática da necessidade de se ponderar a densidade básica pela área que cada amostra representa do disco.....	21
Figura 8 – Perfil de variação da densidade básica para cada árvore amostrada. O valor 0 representa a posição da medula.....	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diâmetro à Altura do Peito (DAP, 130 m) e altura comercial das árvores analisadas.....	14
Tabela 2 – Média aritmética (DB_arit) e média ponderada (DB_pond) da densidade básica da madeira nas três árvores amostradas e média geral entre as árvores. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.....	26

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	13
2.1 Caracterização da área experimental.....	13
2.2 Amostragem de árvores em campo.....	13
2.3 Amostragem na direção radial.....	14
2.4 Determinação da densidade básica da madeira.....	16
2.4.1 <i>Determinação do volume saturado.....</i>	<i>16</i>
2.4.2 <i>Determinação da massa seca.....</i>	<i>18</i>
2.4.3 <i>Análise do perfil radial da densidade básica.....</i>	<i>19</i>
2.4.4 <i>Determinação matemática da densidade básica.....</i>	<i>20</i>
2.5 Determinação da média aritmética simples para a densidade básica.....	20
2.6 Determinação da média aritmética ponderada para a densidade básica.....	20
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
3.1 Perfil de variação radial da densidade básica.....	23
3.2 Comparação da média aritmética simples e ponderada para cada árvore.....	25
4 CONCLUSÃO.....	28
REFERÊNCIAS.....	29

1 INTRODUÇÃO

Os eucaliptos são importantes espécies de madeira de folhosas, originárias da Austrália e pertencentes à família Myrtaceae. O gênero *Eucalyptus* possui mais de 700 espécies e híbridos, sendo amplamente utilizados em sistemas silviculturais. Devido ao crescimento da demanda por produtos madeireiros e à necessidade de reduzir a pressão sobre as florestas naturais, o eucalipto destaca-se como uma alternativa sustentável. Além disso, as plantações de eucalipto apresentam rápido crescimento, alta produtividade, ciclos curtos de rotação e ampla adaptação ambiental, tornando-se uma importante fonte de matéria-prima para atender à crescente demanda mundial por madeira e contribuir para a conservação das florestas naturais. (GIRIJASHANKAR, 2011).

No Brasil, as plantações de *Eucalyptus* representam 77% da área de florestas plantadas do país, com aproximadamente 8,1 milhões de hectares e uma produtividade média de 34,4 m³/ha/ano no ano de 2024. Atualmente, esses plantios são conduzidos sob rotações de aproximadamente 6,8 anos, visando atender a demanda de madeira voltada principalmente para o setor de celulose e papel e carvão vegetal (IBÁ, 2025).

A definição do uso mais adequado da madeira depende do conhecimento de suas propriedades tecnológicas. Entre elas, destaca-se a densidade básica, sendo a propriedade mais estudada por influenciar diretamente o desempenho industrial, o consumo de matéria-prima e a qualidade dos produtos produzidos a partir da madeira, além disso, esta propriedade apresenta alta correlação com as propriedades físico-mecânicas e anatômicas do lenho (BOSCHETTI *et al.*, 2020). Em razão de sua fácil determinação e elevada representatividade, essa propriedade é amplamente utilizada na classificação tecnológica da matéria-prima florestal (SCANAVACA; GARCIA, 2017).

Em madeiras do gênero *Eucalyptus*, a densidade básica pode variar significativamente em função de fatores genéticos, ambientais, silviculturais e da posição de amostragem no tronco. Essa propriedade é resultante da interação de diferentes fatores genéticos e ambientais, apresentando variações entre espécies, entre indivíduos de uma mesma espécie e ao longo da própria árvore, nos sentidos radial e longitudinal do tronco (BOSCHETTI *et al.*, 2020, JESUS; SILVA, 2020).

A variação radial e axial da densidade da madeira está associada à transição entre o lenho juvenil e adulto. O lenho juvenil apresenta células com menor espessura de parede celular, resultando em menor quantidade de material lenhoso por unidade de volume e, consequentemente, menores valores de densidade. Com o aumento da idade cambial, ocorre a

formação do lenho adulto, caracterizado por paredes celulares mais espessas, contribuindo para o aumento da densidade da madeira (VIDAURRE *et al.*, 2011).

Como resultado, na região da base do fuste há maior proporção de lenho adulto, com células de paredes mais espessas e maiores valores de densidade, enquanto nas regiões próximas à medula e no topo da árvore ocorre maior predominância de lenho juvenil, caracterizado por menores espessuras de parede celular e menor densidade da madeira. Este comportamento de variação da densidade da madeira é evidenciado em diversos trabalhos para a madeira de eucalipto, tendo sido tema central de diversas pesquisas realizadas ao longo das últimas décadas (ARAÚJO *et al.*, 2024; PIMENTA *et al.*, 2023; SALVO *et al.*, 2017; OLIVEIRA; SILVA, 2003; TOMAZELLO FILHO, 1985).

Embora o padrão de variação radial da densidade básica seja amplamente reconhecido, se baseiam em um número reduzido de amostras, normalmente obtidas em proporções de 0, 25, 50 e 100% da distância entre a medula e a casca, o que pode não representar adequadamente toda a variabilidade existente no sentido radial do tronco. Nesse contexto, o mapeamento detalhado da variação radial da densidade básica, associado à comparação entre médias aritméticas simples e médias ponderadas, permite caracterização mais representativa da madeira. Esse tipo de abordagem é capaz de captar de forma mais eficiente a heterogeneidade decorrente da presença de lenho juvenil e adulto e das variações representativas de todo o período de crescimento da árvore.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo mapear detalhadamente a variação radial da densidade básica de *Eucalyptus cloeziana* e obter, a partir desse mapeamento, a média aritmética simples e a média ponderada pela área que cada amostra representa do tronco, comparando ambas as estimativas e discutindo suas implicações para a caracterização tecnológica da madeira e sua destinação industrial.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área experimental

O estudo foi conduzido em um povoamento experimental de *Eucalyptus cloeziana* localizados no *Campus* São João Evangelista do Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG), no município de São João Evangelista, Minas Gerais. O povoamento possui idade aproximada de 15 anos e foi implantado em espaçamento de $3,0 \times 2,0$ m, sendo próximo às coordenadas geográficas 18°33'09.5"S 42°45'48.5"W.

Segundo a classificação climática de Köppen, de acordo com o mapa climático de Alvares *et al.* (2013), o clima de São João Evangelista é predominantemente *Cwa*, caracterizada como clima subtropical úmido com inverno seco e verão quente. Esse tipo climático apresenta estação chuvosa concentrada no verão e período seco no inverno, com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C. Ressalta-se que a cidade apresenta altitude média de 690 metros.

2.2 Amostragem de árvores em campo

Inicialmente, foram utilizados dados provenientes do inventário florestal realizado na área experimental para caracterização do povoamento e determinação do diâmetro médio das árvores. A partir dessas informações, foram selecionadas três árvores, sendo uma representante da menor classe de DAP observada, uma da classe intermediária e uma da maior classe, buscando contemplar a variabilidade do povoamento.

Após a seleção, as árvores foram identificadas, abatidas e submetidas à coleta de material para determinação da densidade básica da madeira ao longo do perfil radial. O Diâmetro à Altura do Peito (DAP, 130 m) e altura comercial das árvores analisadas pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 – Diâmetro à altura do peito (DAP, 130m) e altura comercial das árvores analisadas

Árvore	DAP (cm)	Altura (m)
1	12,92	17,6
2	22,95	22,68
3	17,15	22,0

Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

A partir do corte das árvores, foram retirados discos à altura do DAP, apresentando os discos aproximadamente 3 cm de espessura. O DAP foi adotado por se tratar da posição dendrométrica padrão utilizada em estudos florestais e tecnológicos da madeira. Os discos obtidos podem ser observados na Figura 1.

Figura 1 – Discos obtidos à altura do DAP (1,30 m) para cada árvore amostrada



Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

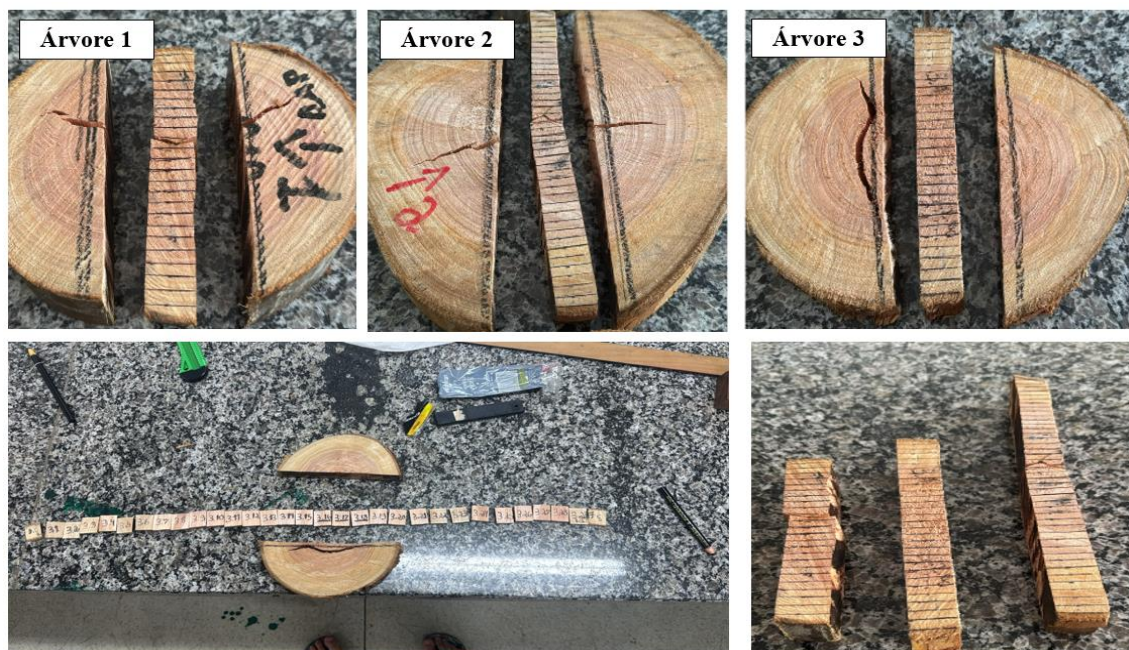
2.3 Amostragem na direção radial

A partir dos discos, foi obtida uma seção radial passando pela medula e abrangendo toda a extensão transversal da madeira (casca-medula-casca), desde uma extremidade da casca até a extremidade oposta. As seções radiais foram confeccionadas com dimensões aproximadas de 2 cm × 2 cm nas direções tangencial e longitudinal, respectivamente.

Posteriormente, cada seção foi subdividida sequencialmente ao longo da direção radial em amostras com espessura aproximada de 5 mm, permitindo a obtenção de corpos de prova representativos de diferentes posições ao longo de todo o perfil radial. Os cortes foram realizados na direção das fibras com o auxílio de uma lâmina de estilete afiada e um martelo. A obtenção das amostras pode ser observada na Figura 2.

Após a obtenção, as amostras foram identificadas de acordo com sua posição radial e numeradas sequencialmente a partir da medula em direção à casca. Esse procedimento possibilitou a obtenção de elevado número de amostras por árvore, permitindo a realização de mapeamento detalhado da variação radial da densidade básica da madeira. Além disso, foram obtidas as espessuras de cada amostra para o cálculo da média aritmética ponderada, conforme pode ser observado na Figura 3.

Figura 2 – Obtenção de amostras representativas de toda a seção radial do tronco para cada árvore amostrada



Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

Figura 3 – Determinação das espessuras de cada amostra para posterior ponderação da densidade básica e análise gráfica. Onde A = Amostras representativas de toda a seção radial e B = Determinação das espessuras das amostras com paquímetro



Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

Posteriormente, os valores de densidade básica e espessura obtidas para cada amostra foram utilizados para a construção dos perfis radiais de densidade básica por meio de análise gráfica e também para o cálculo das densidades básicas por média aritmética simples e ponderada para cada árvore analisada.

2.4 Determinação da densidade básica da madeira

2.4.1 Determinação do volume saturado

A densidade básica da madeira foi determinada pela relação entre a massa seca e o volume saturado das amostras. Inicialmente, as amostras obtidas ao longo do perfil radial foram submetidas ao processo de saturação em água. Para isso, os corpos de prova foram acondicionados em um dessecador contendo água destilada e conectados a uma bomba de vácuo.

Foram realizados sucessivos ciclos de aplicação e alívio de vácuo, com o objetivo de promover a remoção do ar presente nos lúmens celulares e facilitar a completa penetração da água na estrutura da madeira. O procedimento foi repetido até que as amostras atingissem a condição de saturação máxima, caracterizada pela ausência de liberação de bolhas de ar e pelo

afundamento completo dos corpos de prova no recipiente, indicando o preenchimento dos espaços vazios pela água. O procedimento de saturação das amostras pode ser observado na Figura 4.

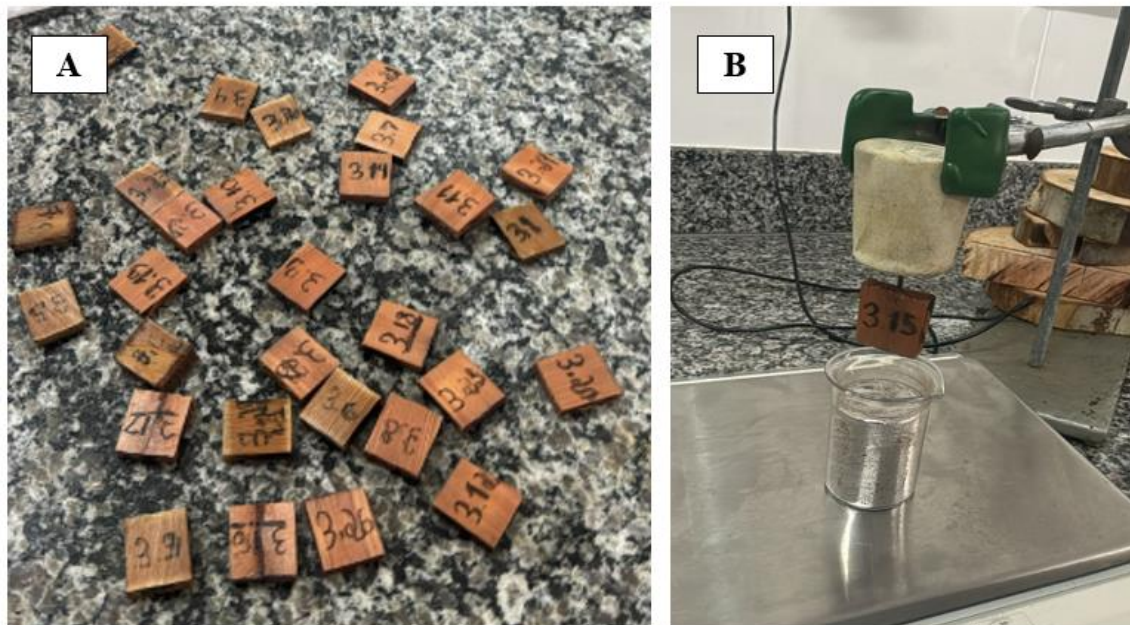
Figura 4 – Procedimento de saturação das amostras em dessecador acoplado a bomba de vácuo. Onde A = Amostras separadas por árvore para serem levadas ao dessecador e B = Amostras em dessecador conectado à bomba de vácuo para saturação das amostras



Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

Após a saturação, o volume de cada amostra foi determinado pelo método de imersão, baseado no princípio de Arquimedes. Para isso, utilizou-se mercúrio metálico como fluido de deslocamento. A escolha do mercúrio deveu-se às reduzidas dimensões das amostras avaliadas, uma vez que pequenas quantidades de água aderidas à superfície dos corpos de prova podem provocar erros significativos na determinação do volume quando se utiliza água como fluido de imersão. Além disso, a elevada densidade do mercúrio aumenta a sensibilidade da medição, proporcionando maior precisão na determinação do volume de amostras de pequenas dimensões. O volume das amostras foi então obtido dividindo-se a massa de mercúrio deslocada (empuxo) pela densidade do mercúrio, adotada como $13,53 \text{ g/cm}^3$ à temperatura ambiente de 25°C . O processo de obtenção do volume saturado pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 – Procedimento de determinação do volume saturado das amostras. Onde A = Amostras saturadas e B = Determinação do volume saturado pelo método de imersão utilizados o mercúrio como fluido de deslocamento

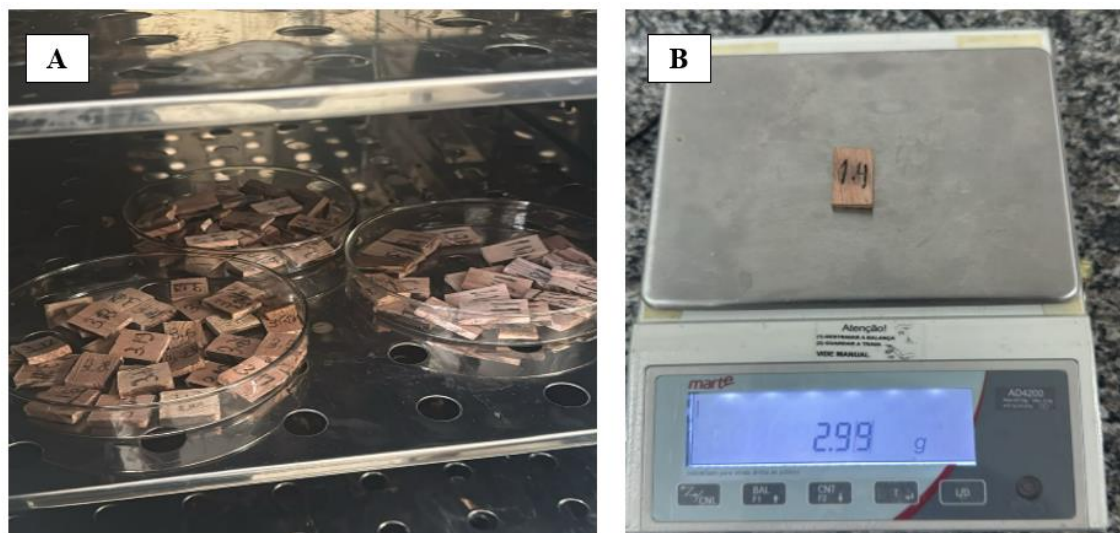


Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

2.4.2 Determinação da massa seca

Após a obtenção do volume saturado, as amostras foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 103 ± 2 °C até atingirem massa constante. Após retiradas da estufa, foi realizado resfriamento em dessecador, seguido de pesagem em balança analítica para determinação da massa seca. O processo de secagem e pesagem das amostras para determinação da massa seca pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 – Secagem das amostras em estufa e pesagem para obtenção da massa seca. Onde A = Secagem das amostras em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ e B = Pesagem das amostras para determinação da massa seca



Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

2.4.3 Análise do perfil radial da densidade básica

Os valores de densidade básica obtidos para cada amostra foram associados à respectiva distância em relação à medula. Para a construção dos perfis radiais, a medula foi adotada como ponto de origem ($x = 0$), sendo atribuídos valores negativos às amostras localizadas em um dos lados da seção radial e valores positivos às amostras localizadas no lado oposto.

A análise do perfil radial foi realizada por meio da elaboração de gráficos contendo os dados das amostras avaliadas. No eixo das abscissas (x) foi representada a distância radial em relação à medula (cm), enquanto no eixo das ordenadas (y) foi representada a densidade básica da madeira (g/cm^3). Dessa forma, foi possível visualizar a distribuição dos valores de densidade ao longo de toda a seção radial, desde uma extremidade da casca até a outra, passando pela medula.

O gráfico foi utilizado para avaliar o comportamento da densidade básica ao longo do perfil radial das árvores e comparar os padrões de variação observados entre os indivíduos amostrados.

2.4.4 Determinação matemática da densidade básica

A densidade básica (DB) foi calculada pela razão entre a massa seca e o volume saturado de cada amostra, conforme a Equação 1:

Equação 1

$$D = \frac{M_{Sec}}{V_{Sat}}$$

Onde,

D_Bas = densidade básica (g/cm³)

M_Sec = massa seca (g)

V_sat = volume saturado (cm³)

2.5 Determinação da média aritmética simples para a densidade básica

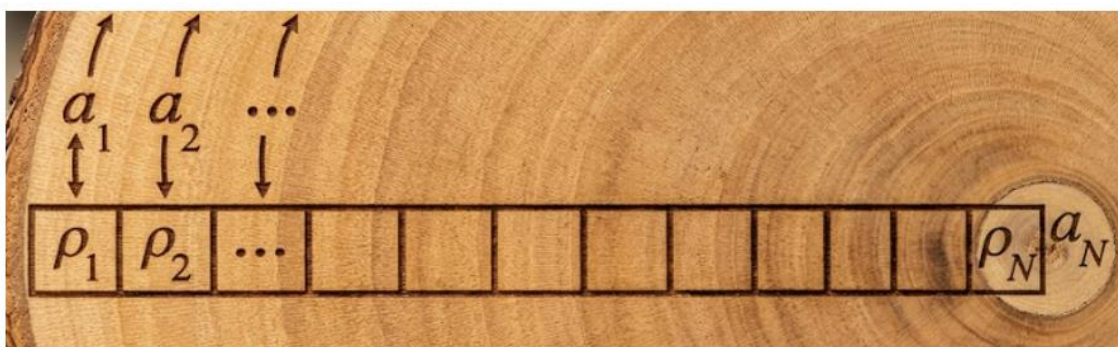
Após a determinação da densidade básica de todas as amostras obtidas ao longo do perfil radial das árvores avaliadas, foi calculada a densidade básica média aritmética simples para cada árvore. Esse procedimento consistiu na obtenção da média dos valores individuais de densidade básica das amostras, atribuindo-se o mesmo peso a todas as posições radiais analisadas. A densidade básica obtida por média aritmética simples (DB_arit) foi calculada somando-se a densidade de todas as amostras e dividindo-se pelo número de amostras. Dessa forma, cada amostra contribuiu igualmente para a composição do valor médio, independentemente de sua posição radial ou da proporção da área transversal que representava.

2.6 Determinação da média aritmética ponderada para a densidade básica

Para cada árvore, foi calculada a densidade básica média ponderada utilizando-se a área representada por cada amostra ao longo da seção radial. Inicialmente, para cada amostra, foi determinada a área do anel correspondente à sua posição radial, considerando o valor da espessura da amostra para esse cálculo. Para as amostras localizadas na região central da seção radial, adjacentes à medula, a área representada correspondeu à metade da área do círculo delimitado pelo raio equivalente à espessura da amostra. Para as demais amostras, a área representada foi obtida pela diferença entre as áreas de círculos concêntricos sucessivos. Dessa

forma, a área associada a cada amostra correspondeu ao anel compreendido entre seus limites interno e externo, definidos pela espessura da amostra e sua posição em relação à medula. Uma representação esquemática do procedimento adotado para o cálculo das áreas encontra-se apresentada na Figura 7.

Figura 7 – Demonstração esquemática da necessidade de se ponderar a densidade básica pela área que cada amostra representa do disco



Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

Como as amostras foram obtidas em uma seção radial que se estendia da casca à medula e da medula à casca, cada amostra representou apenas metade da área do respectivo anel. Dessa forma, a área calculada para cada anel foi dividida por dois, sendo o valor resultante utilizado como fator de ponderação para a respectiva amostra. Para isso foi utilizada a Equação 2.

Equação 2

$$DB_{pond} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^N D_{Bas_i} \cdot a_i$$

Onde,

DB_pond = média aritmética ponderada da densidade básica ao longo da seção radial da madeira, do anel mais externo ($i=N$) até a medula ($i=1$);

A = área total do disco amostrado para cada árvore;

N = número de amostras radiais de madeira;

D_Bas_i = valor da densidade básica na posição i ;

a_i = área do anel circular com largura igual à espessura da amostra i .

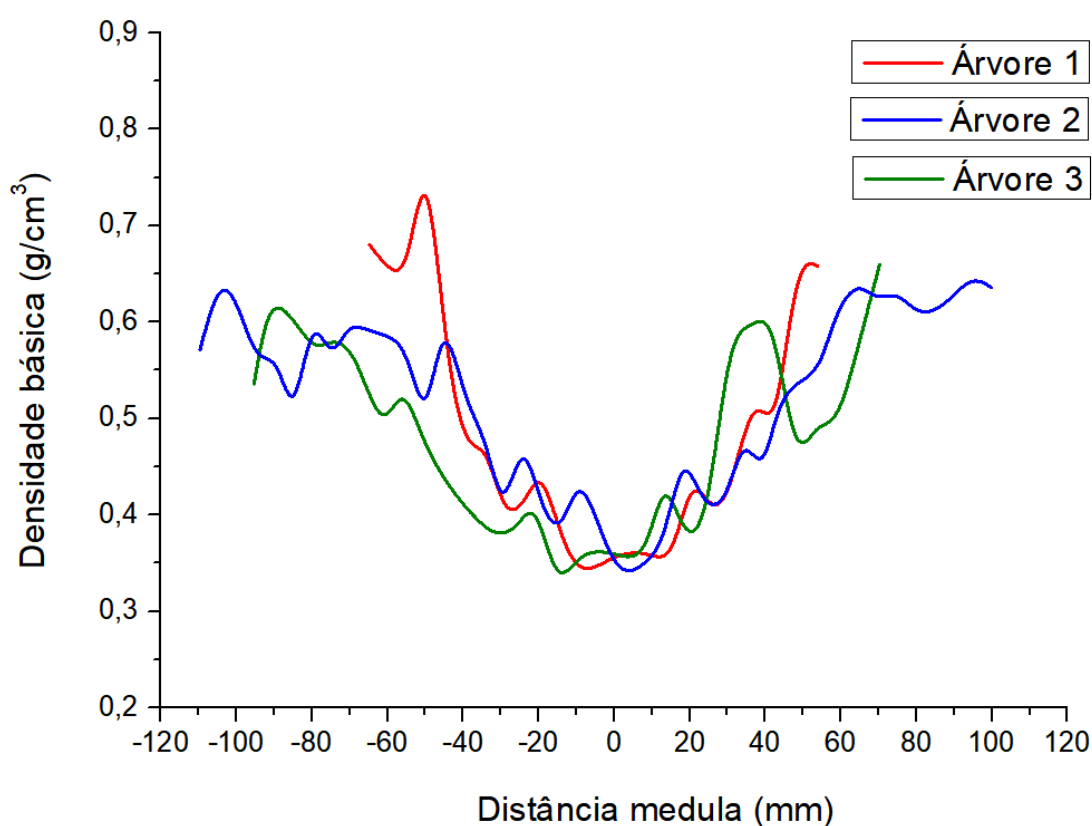
Ressalta-se que o numerador da equação corresponde ao somatório dos produtos entre a densidade básica de cada amostra e a respectiva área representada. O denominador corresponde ao somatório das áreas representadas por todas as amostras da seção radial, de modo que cada valor de densidade básica contribuiu para a média final de forma proporcional à área que representava no disco transversal.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Perfil de variação radial da densidade básica

Na Figura 8, é possível observar o perfil de variação da densidade básica em toda a seção radial para as três árvores amostradas.

Figura 8 – Perfil de variação da densidade básica para cada árvore amostrada. O valor 0 representa a posição da medula



Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

A partir da análise gráfica, foi possível observar que as três árvores apresentam um comportamento geral semelhante, relativo a valores mais baixos de densidade básica na região central do tronco (próxima à medula) e aumento gradual em direção às regiões periféricas (próximas à casca). Esse padrão é típico do eucalipto, estando relacionado principalmente à presença de lenho juvenil e adulto (BOSCHETTI *et al*, 2020; VIDAURRE *et al.*, 2011).

Conforme evidenciado em Vidaurre *et al.* (2011), a menor densidade básica observada próxima à medula está associada à formação de fibras características do lenho

juvenil, que apresentam paredes celulares mais finas e, conseqüentemente, maior proporção de espaço vazio (lúmen) em relação ao volume total da célula. Como a densidade básica representa a quantidade de massa presente em determinado volume de madeira, a menor quantidade de material constituinte das paredes celulares resulta em menores valores de densidade. Com o avanço da idade da árvore, ocorre a transição para o lenho adulto, no qual as fibras passam a apresentar paredes celulares mais espessas. Esse espessamento aumenta a quantidade de material sólido depositado na parede celular das fibras, especialmente na camada S2 da parede secundária, reduzindo proporcionalmente o volume ocupado pelo lúmen. Como resultado, há maior massa de madeira por unidade de volume, promovendo o aumento da densidade básica.

Dessa forma, o padrão observado nas três árvores, caracterizado por menores densidades na região medular e maiores densidades próximas à casca, pode ser explicado principalmente pelo aumento gradual da espessura da parede celular das fibras ao longo do crescimento radial do tronco. Em termos anatômicos, existe uma relação positiva entre espessura da parede celular e densidade básica, quanto mais espessas são as paredes das fibras, maior tende a ser a densidade da madeira. Esse comportamento é evidenciado em diversos trabalhos científicos (SALVO *et al.*, 2018; EVANGELISTA *et al.*, 2010, RAMOS *et al.*, 2011).

Assim, os valores mínimos observados próximos à medula (aproximadamente 0,34–0,40 g/cm³) refletem regiões com fibras de paredes mais delgadas, enquanto os valores superiores a 0,60 g/cm³ próximos à casca indicam regiões onde as fibras apresentam paredes celulares mais espessas e maior quantidade de parede celular (massa) por unidade de volume, resultando em valores maiores para a densidade básica. Esse comportamento é considerado um dos principais mecanismos responsáveis pela variação radial da densidade básica em árvores. Para confirmar essa tendência, recomenda-se a realização de análises anatômicas quantitativas ao longo do perfil radial, por meio da produção de macerados em cada posição de amostragem e da mensuração das dimensões das fibras, com especial atenção à espessura da parede celular.

Destaca-se que a Árvore 1 apresentou a maior variabilidade radial de densidade básica entre as três árvores amostradas, com valores oscilando entre aproximadamente 0,35 e 0,73 g/cm³. O perfil evidencia uma queda brusca da densidade da região próxima à casca (-60 mm). Variações fisiológicas na atividade do câmbio vascular podem ter influenciado a deposição de material na parede celular das fibras, resultando em uma região de menor densidade quando comparada às posições vizinhas. No entanto, a confirmação dessa hipótese depende de análises anatômicas detalhadas das fibras ao longo do perfil radial.

Por outro lado, a Árvore 2 apresentou o perfil radial mais homogêneo entre as árvores avaliadas, com densidade básica variando entre aproximadamente 0,34 e 0,64 g/cm³ no

sentido medula–casca. Próximo à medula, observam-se os menores valores de densidade, enquanto há aumento gradual em direção à casca, caracterizando o padrão típico de transição de lenho juvenil para lenho adulto, embora ainda não tenha sido possível observar estabilização concreta da densidade básica, evidenciando que o lenho adulto ainda não está formado. Para confirmar a transição entre lenho juvenil e adulto, recomenda-se a medição do comprimento das fibras ao longo de todo o perfil radial.

Por sua vez, a Árvore 3 apresentou comportamento intermediário em relação às demais árvores, com densidade básica variando entre aproximadamente 0,34 e 0,66 g/cm³ no sentido medula–casca. Próximo à medula, observam-se os menores valores de densidade, seguidos por um aumento geral em direção à casca. Entretanto, observa-se queda da densidade básica na porção direita do tronco (50 mm), após atingir valores mais elevados em regiões intermediárias. Esse decréscimo ocorre em torno da região mais externa do perfil e indica redução pontual na densidade básica antes da estabilização próxima à casca. Entretanto, após esta queda brusca, os valores obtidos para a densidade básica volta a subir em direção à casca. Tal comportamento indica que pode ter ocorrido condição atípica durante o período de formação desse trecho da madeira em específico, resultando em redução temporária na deposição de material na parede celular das fibras e, consequentemente, na densidade básica. Entretanto, observa-se que essa alteração não se manteve ao longo do crescimento subsequente, uma vez que os valores de densidade voltam a aumentar em direção à casca. Isso sugere que as condições fisiológicas de crescimento do câmbio vascular foram restabelecidas, retornando ao padrão normal de formação de fibras com maior espessura de parede celular nas regiões mais externas do tronco.

3.2 Comparação da média aritmética simples e ponderada para cada árvore

Os valores de densidade básica da madeira obtidos por meio da média aritmética (DB_arit) e da média ponderada (DB_pond) para as três árvores amostradas são apresentados na Tabela 2, bem como, a média geral entre as três árvores para cada tipologia de média para a densidade obtida.

Tabela 2 – Média aritmética (DB_arit) e média ponderada (DB_pond) da densidade básica da madeira nas três árvores amostradas e média geral entre as árvores. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão

Árvore	DB_arit (g/cm ³)	DB_pond (g/cm ³)
1	0,495	0,562
2	0,527	0,573
3	0,473	0,531
Média Geral	0,498 (0,027)	0,555 (0,021)

Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

Observa-se que a DB_arit variou entre 0,473 e 0,527 g/cm³, com média geral de 0,498 g/cm³, enquanto a DB_pond variou entre 0,531 e 0,573 g/cm³, com média geral de 0,555 g/cm³. Estes valores são próximos ao relatado para diferentes espécies de eucalipto (BOSCHETTI *et al.*, 2020). De maneira consistente, a média ponderada apresentou valores superiores à média aritmética em todas as árvores avaliadas. Esse comportamento indica que as regiões com maior contribuição volumétrica no sentido radial exercem maior influência na densidade final estimada. Considerando o gradiente radial típico da madeira, essas regiões correspondem, em geral, às porções mais externas do tronco, onde predomina o lenho adulto, e consequentemente, maior densidade básica. Assim, a maior contribuição dessas regiões na média ponderada explica os valores superiores em relação à média aritmética.

Entre as três árvores avaliadas, observa-se que a Árvore 2 apresentou os maiores valores de densidade básica, tanto para a média aritmética (0,527 g/cm³) quanto para a média ponderada (0,573 g/cm³). Em contrapartida, a Árvore 3 apresentou os menores valores, com 0,473 g/cm³ (DB_arit) e 0,531 g/cm³ (DB_pond). A Árvore 1 apresentou comportamento intermediário, com valores de 0,495 g/cm³ e 0,562 g/cm³, respectivamente. Esse resultado indica uma hierarquia consistente entre as árvores, independentemente do método utilizado, sendo a Árvore 2 a mais densa e a Árvore 3 a menos densa.

Considerando que a média ponderada é mais representativa e assertiva para a caracterização da densidade básica da madeira, por incorporar a contribuição volumétrica das diferentes regiões do tronco, observa-se que os valores obtidos indicam densidade média mais elevada do material quando comparada à média aritmética. Dessa forma, a utilização exclusiva da média aritmética tende a subestimar a densidade da madeira, uma vez que não considera o maior peso das regiões externas, onde predominam fibras com paredes celulares mais espessas e, consequentemente, maior densidade. Assim, a média ponderada fornece estimativa mais fiel

do comportamento estrutural da madeira, sendo mais adequada para fins de caracterização tecnológica do material. Essa subestimação ocorre porque a média aritmética atribui o mesmo peso às diferentes posições radiais, desconsiderando que as regiões externas do tronco, onde predominam o lenho adulto e fibras com maior espessura de parede celular, possuem maior representatividade estrutural e volumétrica. Assim, ao ignorar essa distribuição espacial, a DB_arit não reflete adequadamente o comportamento físico real da madeira.

Em larga escala, essa subestimação pode ser extremamente prejudicial, impactando diretamente o planejamento industrial, o rendimento de processos e o balanço de massa em operações de processamento da madeira. Considerando volume de 1000 m³ de madeira, a diferença média entre a DB_arit e a DB_pond (0,057 g/cm³) representa erro aproximado de 57 kg/m³, resultando em subestimação da ordem de aproximadamente 57 toneladas de madeira seca para esse volume. Embora alternativas como a amostragem em cunha possam ser utilizadas, essa metodologia não permite a compreensão detalhada da variação medula-casca. Dessa forma, a média ponderada se mostra não apenas mais precisa, mas também essencial para manter a relação entre estrutura anatômica e propriedades físicas da madeira, sendo fundamental em estudos que buscam não somente estimar a densidade da madeira, mas compreender a sua variação no sentido radial do tronco.

4 CONCLUSÃO

- A densidade básica variou no sentido medula–casca em todas as árvores avaliadas, aumentando da medula para a casca.
- A média geral da densidade básica foi de 0,498 g/cm³ ($\pm 0,027$) para a média aritmética simples (DB_arit) e de 0,555 g/cm³ ($\pm 0,021$) para a média ponderada (DB_pond).
- A média ponderada foi superior à média aritmética simples em todas as árvores analisadas, indicando que a abordagem aritmética simples tende a subestimar a densidade real da madeira.
- A DB_pond representa de forma mais fiel o comportamento da madeira, incorporando a heterogeneidade radial e o maior peso das regiões com maior densidade básica e que representam porção maior do tronco.
- Estudos futuros podem incluir análises anatômicas quantitativas, especialmente da espessura da parede celular das fibras ao longo do sentido radial, para consolidar a relação entre estrutura anatômica e variação da densidade básica.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift, Stuttgart**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Acesso em: 4 ago. 2026, 20:48.
- ARAÚJO, S. de L. et al. Sampling strategies along the tree stem to determine the basic density of Eucalyptus wood. **Cerne**, Lavras, v. 31, e-103500, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/01047760202531013500>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cerne/a/g6bKZbj8bMBpZrfrTscBN3z/>. Acesso em: 4 ago. 2026, 21:50.
- BOSCHETTI, W. T. N.; VIDAURRE, G. B.; SILVA, J. G. M. Densidade e sua variação na madeira de eucalipto. In: VIDAURRE, G. B.; SILVA, J. G. M.; MOULIN, J. C.; CARNEIRO, A. C. O. (org.). Qualidade da madeira de eucalipto proveniente de plantações no Brasil. Vitória: **EDUFES**, 2020. p. 132-170. Disponível em: <http://repositorio.ufes.br/handle/10/11606>. Acesso em: 4 ago. 2026, 16:43.
- EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. C.; VALLE, M. L. A.; XAVIER, B. A. Caracterização anatômica quantitativa da madeira de clones de Eucalyptus camaldulensis Dehnh. e Eucalyptus urophylla S. T. Blake. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 273-284, 2010. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr86/>. Acesso em: 4 ago. 2026, 11:49.
- GIRIJASHANKAR, V. Genetic transformation of Eucalyptus. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 17, n. 1, p. 9-23, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12298-010-0048-0>. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12298-010-0048-0>. Acesso em: 4 ago. 2026, 08:01.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório anual 2025**. Brasília, DF: IBÁ, 2025. Disponível em: <https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/relatorioAnual2025.pdf>. Acesso em: 4 ago. 2026, 08:05.
- JESUS, D. S.; SILVA, J. S. Variação radial de propriedades anatômicas e físicas da madeira de eucalipto. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, DF, v. 37, n. 1, e26476, 2020. DOI: <https://doi.org/10.35977/0104-1096.cct2020.v37.26476>. Disponível em: <https://apct.sede.embrapa.br/cct/article/view/26476>. Acesso em: 4 ago. 2026, 16:11.
- OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de Eucalyptus saligna Sm. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, p. 381-385, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622003000300015>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/P7dNdVMB93M8ymcvRx4ktTn/>. Acesso em: 4 ago. 2026, 21:31.
- PIMENTA, E. M. et al. Planting spacing influences radial variation of basic density and chemical composition of wood from fast growing young Eucalyptus plantations. **Holzforschung**, v. 77, n. 9, p. 657-669, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2023-0016>. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/hf-2023-0016>. Acesso em: 4 ago. 2026, 16:02.

RAMOS, L. M. A. et al. Variação radial dos caracteres anatômicos da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e idade de transição entre lenho juvenil e adulto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 92, p. 411-418, 2011. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr92/cap03.pdf>. Acesso em: 4 ago. 2026, 19:47.

SALVO, L.; LEANDRO, L.; CONTRERAS, H.; CLOUTIER, A.; ELUSTONDO, D. M.; ANANÍAS, R. A. Radial variation of density and anatomical features of *Eucalyptus nitens* trees. **Wood and Fiber Science**, v. 49, n. 3, p. 301-311, 2017. Disponível em: <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/2575>. Acesso em: 4 ago. 2026, 07:53.

SCANAVACA JÚNIOR, L.; GARCIA, J. N. Densidade básica da madeira de eucalipto. In: **Simpósio Científico dos Pós-Graduandos do Cena**, 10., 2017, Piracicaba. Resumos [...]. Piracicaba: CENA/USP, 2017. Disponível em: <https://www.cena.usp.br/producao-bibliografica-thiago>. Acesso em: 4 ago. 2026, 13:37.

TOMAZELLO FILHO, M. **Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis***. IPEF, Piracicaba, n. 29, p. 37-45, abr. 1985. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr29/cap04.pdf>. Acesso em: 4 ago. 2026, 07:27.

VIDAURRE, G. B.; LOMBARDI, L. R.; OLIVEIRA, J. T. S.; ARANTES, M. D. C. Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 18, n. 4, p. 469-480, 2011. DOI: <https://doi.org/10.4322/floram.2011.066>. Disponível em: <https://www.floram.org/article/doi/10.4322/floram.2011.066>. Acesso em: 4 ago. 2026, 17:11.