

ARTIGO ORIGINAL

A densidade básica aritmética difere da ponderada em madeiras de eucalipto?

Does the arithmetic basic density differ from the weighted one in Eucalyptus wood?

Stéffany de Lima Araujo^{1*} , Sâmara Magdalene Vieira Nunes¹ , Érica Patrícia Pinto Queiroz² , Renata Guilherme Cândido da Silva² , Vaniele Bento dos Santos¹ , João Gabriel Missia da Silva¹ , Aguinaldo José de Souza² , Osmarino Pires dos Santos³ , Paulo Henrique Muller da Silva⁴ , Graziela Baptista Vidaurre¹ 

¹Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Jerônimo Monteiro, ES, Brasil

²Suzano Papel e Celulose S.A., Aracruz, ES, Brasil

³CMPC Celulose Riograndense LTDA., Guaíba, RS, Brasil

⁴Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – IPEF, Piracicaba, SP, Brasil

INFORMAÇÕES DO
ARTIGO

Fonte de financiamento: Nenhuma.

Conflito de interesse: Nada a declarar.

*Autor correspondente: steffanylima02@yahoo.com.br

Recebido: 9 outubro 2024.

Aceito: 16 junho 2025.

Editor: Alexandre de Vicente Ferraz.

Como citar: Araujo, S. L., Nunes, S. M. V., Queiroz, E. P. P., Silva, R. G. C., Santos, V. B., Silva, J. G. M., Souza, A. J., Santos, O. P., Silva, P. H. M., & Vidaurre, G. B. (2025). A densidade básica aritmética difere da ponderada em madeiras de eucalipto? *Scientia Forestalis*, 53, e4116. <https://doi.org/10.18671/scifor.v53.10>

RESUMO

A densidade é uma característica essencial na avaliação da qualidade da madeira, variando significativamente entre espécies, indivíduos e ao longo do fuste. O objetivo do trabalho foi verificar a diferença entre os resultados obtidos com a densidade básica média aritmética e ponderada em clones e espécies de *Eucalyptus* e *Corymbia* em diferentes idades e sítios no Brasil, utilizando um banco de dados de pesquisas realizadas entre os anos de 2015 e 2024. As amostras foram classificadas por idade e espécie. A densidade básica foi determinada pelo método da balança hidrostática em todas as amostras. Os dados foram submetidos ao teste t para amostras pareadas para verificação da diferença entre a densidade básica média aritmética e ponderada. A densidade básica média aritmética das madeiras de *Eucalyptus* variou de 360 a 609 Kg.m⁻³ e de *Corymbia*, de 513 a 677 Kg.m⁻³. Já a densidade ponderada pelo volume apresentou intervalo de 350 a 612 Kg.m⁻³ e 513 a 678 Kg.m⁻³, para *Eucalyptus* e *Corymbia*, respectivamente. Para a maioria das espécies de *Corymbia*, não houve diferença significativa entre a densidade básica média aritmética e ponderada. Dentre as espécies de eucalipto avaliadas, 50% apresentaram diferenças significativas entre as metodologias utilizadas, enquanto a outra metade não evidenciou tal discrepância. A depender da idade, a densidade básica aritmética difere da ponderada em madeiras de eucalipto. Os resultados corroboram com a aplicabilidade da densidade básica média aritmética como uma abordagem simplificada e eficaz, especialmente quando a cubagem rigorosa do fuste não é viável.

Palavras-chave: Amostragem; Plantações florestais; Qualidade da madeira.

ABSTRACT

Density is an essential characteristic in wood quality assessment, varying significantly among species, individuals, and along the stem. The objective of this study was to verify the difference between results obtained using arithmetic mean basic density and volume-weighted basic density in clones and species of *Eucalyptus* and *Corymbia* at different ages and sites in Brazil, based on a database of studies conducted between 2015 and 2024. Samples were classified by age and species. Basic density was determined by the hydrostatic balance method for all samples. Data were subjected to paired t-tests to assess differences between arithmetic mean and weighted basic density. The arithmetic mean basic density of *Eucalyptus* wood ranged from 360 to 609 kg.m⁻³ and for *Corymbia*, from 513 to 677 kg.m⁻³. The volume-weighted density ranged from 350 to 612 kg.m⁻³ and 513 to 678 kg.m⁻³ for *Eucalyptus* and *Corymbia*, respectively. For most *Corymbia* species, no significant difference was observed between the arithmetic mean and weighted basic density. Among the evaluated *Eucalyptus* species, 50% showed significant differences between methodologies, while the other half showed no discrepancy. Depending on age, the arithmetic mean basic density differs from the weighted density in *Eucalyptus* wood. The results support the applicability of the arithmetic mean basic density as a simplified and effective approach, especially when rigorous stem volume measurement is not feasible.

Keywords: Sampling; Forest plantations; Wood quality.



1. INTRODUÇÃO

A densidade básica da madeira representa a quantidade de massa lenhosa que constitui um determinado volume (Boschetti et al., 2020), ela pode variar entre espécies, entre árvores da mesma espécie, entre indivíduos do mesmo clone e ao longo do fuste da mesma árvore (Couto et al., 2012). Diante de tantas possibilidades de variação, essa é uma característica que tem sido interesse de estudo, principalmente pela sua relação com as propriedades físicas, mecânicas, químicas e anatômicas da madeira, sendo este conjunto influente nos diversos processos produtivos que envolvem a madeira como matéria-prima (Dias et al., 2018).

As distintas possibilidades de amostragens base-topo adotadas no tronco das árvores, resultam em diferentes estimativas da densidade básica da madeira. Consequentemente, tanto o tipo de amostragem, quanto a forma e o método de obtenção da sua determinação, podem promover diferenças nas estimativas de massa seca e nas estimativas de produtos por área (Downes et al., 1997).

A amostragem em campo deve ocorrer de maneira assertiva e seus resultados devem ser representativos para auxiliar na tomada de decisões. Entretanto, existem diferentes abordagens de cálculo para a estimativa da densidade básica da madeira, como a média aritmética ou a ponderada pelo volume. A densidade básica média aritmética se destaca por ser mais fácil de obter, é calculada pela média da densidade obtida em cada posição amostral que representa um indivíduo arbóreo ou espécie. As amostras são tradicionalmente retiradas nas posições de 0% (base), 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial do fuste da árvore e/ou na posição do diâmetro à altura do peito (DAP) (Rocha et al., 2024).

A densidade básica ponderada considera o volume das seções de madeira amostradas no fuste e são necessárias informações complementares por meio de cubagem rigorosa da árvore (Nascimento et al., 2023). Essa, é uma técnica de mensuração volumétrica de madeira que envolve a medição minuciosa do tronco da árvore, as variáveis consideradas são diâmetro e comprimento. É caracterizada por sua elevada precisão e é amplamente empregada para obter uma estimativa volumétrica exata. A exatidão na mensuração do volume é fundamental tanto para garantir justiça nas transações comerciais, quanto para embasar práticas de manejo florestal sustentáveis com dados precisos e confiáveis (Lafetá et al., 2021).

Alguns estudos mostram que não há diferença significativa entre a densidade básica média aritmética e a ponderada (Trugilho, 2009; Nörnberg et al., 2023) para a madeira jovem de eucalipto no Brasil. Ao adotar a ponderação como critério, a posição de amostragem pode ser relevante no valor de densidade básica, uma vez que as posições consideradas ideais tendem a estar associadas a regiões com maior concentração volumétrica (Oliveira et al., 2018).

Para a determinação da biomassa, a média aritmética das densidades dos discos de madeira ao longo do tronco é considerada a técnica mais adequada. Isto porque esta abordagem considera as variações na densidade ao longo do tronco, o que resulta em uma representação mais precisa da densidade média do tronco, essencial para cálculos subsequentes de biomassa (Vismara, 2009).

Diante disso, torna-se pertinente investigar como diferentes métodos de cálculo da densidade básica influenciam os resultados. O objetivo do trabalho foi verificar a diferença entre os resultados obtidos com a densidade básica média aritmética e ponderada em clones e espécies de *Eucalyptus* e *Corymbia* em diferentes idades e sítios no Brasil, utilizando um banco de dados de pesquisas realizadas entre os anos de 2015 e 2024.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Áreas de estudo, amostragens e caracterização da madeira

Foi realizada uma revisão de dados referentes a trabalhos de qualidade da madeira, em árvores jovens de espécies de *Eucalyptus* e *Corymbia*, englobando pesquisas desde o ano de 2015 até às publicadas em 2024. O critério de seleção das árvores amostradas nas pesquisas foi baseado no diâmetro à altura do peito (DAP) médio da parcela amostral, conforme o inventário florestal mais recente fornecido em cada coleta, em seu respectivo ano de corte e obtenção das amostras de madeira. Apenas para Melo et al. (2024), a seleção das árvores foi feita com base em árvores de maiores volumes da parcela, pois se tratavam de espécies seminais. Os materiais genéticos foram separados por idade e espécie (Tabelas 1 e 2).

Foi observada variação no volume entre as diferentes espécies, atribuída tanto às distintas condições de crescimento às quais os materiais genéticos foram submetidos quanto aos critérios específicos de diâmetro mínimo adotados em cada estudo. As espécies de *Corymbia* foram avaliadas aos 6 e 7 anos (Tabela 2). Para melhor organização dos resultados, os gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* foram separados.

Ao todo, foram analisados 10 trabalhos realizadas pelo Núcleo de Pesquisas em Qualidade da Madeira (NUQMAD), da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), 2 gêneros (*Eucalyptus* e *Corymbia*), 16 espécies (11 de *Eucalyptus* e 5 de *Corymbia*) com idades de 3 a 8 anos, 353 árvores (277 de *Eucalyptus* e 76 de *Corymbia*) e 1984 discos coletados (1528 de *Eucalyptus* e 456 de *Corymbia*) plantados em diferentes sítios no Brasil.

2.2. Determinação da densidade básica média aritmética e ponderada

A densidade básica para todas as amostras foi realizada seguindo os preceitos da Norma Brasileira (NBR) 11941 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003), que consiste na relação entre a massa seca da madeira pelo seu volume saturado. A densidade básica média aritmética foi obtida pela soma dos resultados da densidade obtida em cada posição amostrada no fuste, dividida pelo número de posições (Equação 1).

$$DBm = \frac{DB_{0\%} + \dots + DB_{100\%}}{n} \quad (1)$$

em que: DBm : densidade básica média aritmética (Kg.m^{-3}); DB_p : densidade básica em determinada posição (Kg.m^{-3}); e n : quantidade de posições amostradas.

A densidade básica ponderada pelo volume, considerando as posições amostrais ao longo do fuste (0, DAP, 25, 33, 50, 66, 75 e 100%, com variação conforme o trabalho realizado), foi calculada segundo recomendações de Trugilho (2009) (Equação 2). A variação nas posições amostrais ao longo do fuste ocorre por diferenças nos objetivos dos estudos, nas metodologias adotadas e nas limitações práticas de coleta.

$$DBp = \frac{(DBm_{0\%-DAP} \times V_{0\%-DAP}) + \dots + (DBm_{75\%-100\%} \times V_{75\%-100\%})}{V_{0\%-DAP} + \dots + V_{75\%-100\%}} \quad (2)$$

em que: DBp : densidade básica ponderada (Kg.m^{-3}); $DBm_{p-(p+1)}$: densidade básica média entre duas posições consecutivas (Kg.m^{-3}); e $V_{p-(p+1)}$: volume da seção entre duas posições consecutivas (m^3).

As árvores utilizadas no estudo foram submetidas à cubagem rigorosa durante a etapa de coleta, o que permitiu a determinação da

altura comercial de cada indivíduo, conforme os critérios de diâmetro mínimo de corte adotados em cada pesquisa analisada. O diâmetro sem casca foi mensurado em cada posição ao longo do fuste, possibilitando o cálculo do volume sem casca por seção, seguindo o método proposto por Smalian (León & Uranga-Valencia, 2013).

2.3. Análise dos dados

Os dados significativos pela análise de variância (ANOVA), foram submetidos ao teste t para amostras pareadas para verificação da diferença entre a densidade básica média aritmética e ponderada. Foi calculado o intervalo de confiança para as espécies pertencentes a uma mesma idade, bem como para os materiais genéticos pertencentes a uma mesma espécie. As análises foram realizadas com nível de significância de 5%. Foi realizada uma correlação de Pearson, bem como uma regressão

linear simples para avaliar a relação entre as metodologias. Para análise dos dados, utilizou-se o *software* SigmaPlot 13.0®.

3. RESULTADOS

A densidade básica média aritmética das madeiras de *Eucalyptus* analisadas variou de 360 a 609 Kg.m⁻³, enquanto a densidade ponderada pelo volume apresentou intervalo de 350 a 612 Kg.m⁻³. Em média, 50% das amostras de eucalipto mostraram uma diferença significativa entre a densidade básica média aritmética e a densidade ponderada. As maiores discrepâncias foram observadas em espécies com três anos de idade, das quais 73% apresentaram diferenças significativas. Com o aumento da idade, as espécies tornaram-se mais homogêneas, resultando em menor número de amostras com diferença significativa entre as metodologias de cálculo da densidade básica (Figura 1).

Tabela 1. Espécies de eucalipto utilizadas e suas respectivas procedências.

Idade	Espécie e subespécie	Código	Local de coleta	Clima	Altura (m)	DAP (cm)	Volume (m ³)	Posição	Autor
3 anos (10*)	<i>E. urophylla</i> var. <i>platyphylla</i>	1	Maranhão		9,00	8,89	0,0440		
	<i>E. urophylla</i> var. <i>platyphylla</i>	2	Tocantins	Aw	7,84	8,90	0,0355	AT	Bobadilha et al. (2019)
	<i>E. tereticornis</i>				5,53	7,21	0,0186		
3 anos (5*)	<i>E. urophylla</i>	1	Bahia	Aw	11,58	12,18	0,0913	AT	Santos et al. (2024)
	<i>E. urophylla</i> x <i>E. spp.</i>	1			10,88	11,77	0,0774		
	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	1	São Paulo	Cwa	11,17	9,54	0,0542		
	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	2		Cfa	11,67	9,96	0,0607		
	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	3		Cwa	11,67	9,33	0,0535		
3 anos (6*)	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	4	Espírito Santo	Aw	10,17	9,23	0,0459	AA1	Cirilo et al. (2024)
	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	5	Minas Gerais		11,67	9,88	0,0605		
	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	6	São Paulo	Cfa	10,50	9,45	0,0509		
	<i>E. urophylla</i>	2	Minas Gerais	Cwb	12,50	10,29	0,0659		
	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	7			10,83	10,40	0,0609		
	<i>E. saligna</i>	1	Bahia	Cfa	10,50	9,50	0,0506		
	<i>E. grandis</i> x <i>E. camaldulensis</i>	1		As	9,67	9,25	0,0444		
4 anos (4')	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	1	Minas Gerais	Aw	14,50	10,17	0,0452**	AA2	Feuchard (2015)
	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	2			13,80	9,93	0,0438**		
	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	3			13,50	10,96	0,0599**		
	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	4			14,50	11,40	0,0531**		
5 anos (10*)	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	8	São Paulo	Cfa	18,85	11,92	0,1431	AT	Bobadilha et al. (2019)
	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	9			18,79	11,47	0,1244		
5 anos (5*)	<i>E. urophylla</i>	3	Bahia	Aw	20,48	13,46	0,1642	AT	Santos et al. (2024)
	<i>E. urophylla</i> x <i>E. spp.</i>	2			17,60	12,71	0,1250		
	<i>E. amplifolia</i>	1	Minas Gerais	Cwa	13,64	9,04	0,0597		
6 anos (7*)	<i>E. longirostrata</i>	1			21,92	13,79	0,1449		
	<i>E. major</i>	1			14,17	10,10	0,0955	AT	Melo et al. (2024)
	<i>E. amplifolia</i>	2	São Paulo	Aw	17,29	13,54	0,1506		
	<i>E. longirostrata</i>	2			22,10	15,26	0,2099		
	<i>E. major</i>	2			14,58	14,58	0,1578		

Código: devido a repetição de mesmas espécies, porém em idades e procedências diferentes, o código após o nome da espécie, auxilia a identificar a qual trabalho cada material pertence. Local de coleta: Todos os estados de coleta pertencem ao Brasil. Clima: conforme a classificação de Koppen-Geiger; Aw: clima tropical com estação seca no inverno; Cwa: clima subtropical úmido com inverno seco; Cfa: clima subtropical úmido, com invernos amenos e verões quentes, sem estação seca definida; As: clima tropical com estação seca no verão. Altura: altura comercial média (m); DAP: diâmetro sem casca à altura do peito médio (cm); Volume: volume médio sem casca (m³). *Número de repetições (árvores) utilizadas para cada espécie. **Volume médio individual até 50% da altura comercial. Amostragem tradicional (AT): Amostragens em 0%, DAP, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial do fuste; Amostragem alternativa 1 (AA1): Amostragens em 0%, DAP, 50% e 100% da altura comercial do fuste; Amostragem alternativa 2 (AA2): Amostragens em 0%, DAP, 25% e 50% da altura comercial do fuste; Amostragem alternativa 3 (AA3): Amostragens em 0%, DAP, 33%, 66% e 100% da altura comercial do fuste. CMPC: Empresa CMPC Celulose Riograndense Ltda.

Tabela 1. Continuação...

Idade	Espécie e subespécie	Código	Local de coleta	Clima	Altura (m)	DAP (cm)	Volume (m³)	Posição	Autor
6 anos (5*)	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	5	São Paulo	Cfa	22,22	15,71	0,1556	AT	Araujo et al. (2025)
	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	6			23,58	13,68	0,1245		
	<i>E. grandis</i>	1			24,44	14,90	0,1597		
	<i>E. urophylla</i>	4			22,92	13,74	0,1280		
7 anos (5*)	<i>E. urophylla</i>	5	Minas Gerais	Cwa	24,72	13,90	0,1917	AT	Rocha et al. (2024)
	<i>E. urophylla</i>	6			26,14	19,41	0,1564		
	<i>E. grandis</i> x <i>E. camaldulensis</i>	2			19,76	14,96	0,0727		
	<i>E. grandis</i>	2			28,92	22,77	0,2328		
7 anos (5*)	<i>E. urophylla</i>	7	Maranhão	Aw	26,26	21,38	0,1798	AT	Queiroz (2024)
	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	10			11,41	10,77	0,0261		
	<i>E. urophylla</i>	8			23,50	17,87	0,1168		
	<i>E. grandis</i> x <i>E. camaldulensis</i>	3			20,90	14,65	0,0693		
	<i>E. grandis</i>	3			25,20	21,39	0,1665		
	<i>E. urophylla</i>	9			32,00	23,00	0,2507		
8 anos (7*)	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	11	São Paulo	Cfa	11,80	10,06	0,0239	AA3	CMPC
	<i>E. saligna</i>	2			25,11	18,17	0,3249		
	<i>E. saligna</i>	3			24,94	19,19	0,3899		

Código: devido a repetição de mesmas espécies, porém em idades e procedências diferentes, o código após o nome da espécie, auxilia a identificar a qual trabalho cada material pertence. Local de coleta: Todos os estados de coleta pertencem ao Brasil. Clima: conforme a classificação de Koppen-Geiger; Aw: clima tropical com estação seca no inverno; Cwa: clima subtropical úmido com inverno seco; Cfa: clima subtropical úmido, com invernos amenos e verões quentes, sem estação seca definida; As: clima tropical com estação seca no verão. Altura: altura comercial média (m); DAP: diâmetro sem casca à altura do peito médio (cm); Volume: volume médio sem casca (m³). *Número de repetições (árvores) utilizadas para cada espécie. **Volume médio individual até 50% da altura comercial. Amostragem tradicional (AT): Amostragens em 0%, DAP, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial do fuste; Amostragem alternativa 1 (AA1): Amostragens em 0%, DAP, 50% e 100% da altura comercial do fuste; Amostragem alternativa 2 (AA2): Amostragens em 0%, DAP, 25% e 50% da altura comercial do fuste; Amostragem alternativa 3 (AA3): Amostragens em 0%, DAP, 33%, 66% e 100% da altura comercial do fuste. CMPC: Empresa CMPC Celulose Riograndense Ltda.

Tabela 2. Espécies de *Corymbia* utilizadas e suas respectivas procedências.

Idade	Espécie e subespécie	Código	Local de coleta	Clima	Altura (m)	DAP (cm)	Volume (m³)	Posição	Autor
6 anos (7*)	<i>C. citriodora</i> subsp. <i>citriodora</i>	1	Minas Gerais	Cwa	15,72	10,42	0,0855	AT	Melo et al. (2024)
	<i>C. henryi</i>	1			18,49	13,06	0,1581		
	<i>C. torelliana</i>	1			15,25	11,18	0,0802		
	<i>C. citriodora</i> subsp. <i>variegata</i>	1			18,77	13,36	0,1471		
	<i>C. citriodora</i> subsp. <i>citriodora</i>	2	São Paulo	Aw	19,28	14,17	0,1992		
	<i>C. henryi</i>	2			21,10	15,49	0,3831		
	<i>C. torelliana</i>	2			17,82	14,45	0,1753		
	<i>C. citriodora</i> subsp. <i>variegata</i>	2			25,27	15,97	0,0975		
7 anos (5*)	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	1	Minas Gerais	Cwa	16,91	10,55	0,0756	AT	Rocha et al. (2024)
	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	2			11,81	11,87	0,0682		
	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	3			11,07	8,41	0,0343		
	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	4			17,35	13,38	0,1457		

Código: devido a repetição de mesmas espécies, porém em idades e procedências diferentes, o código após o nome da espécie, auxilia a identificar a qual trabalho cada material pertence. Local de coleta: Todos os estados de coleta pertencem ao Brasil. Clima: conforme a classificação de Koppen-Geiger; Aw: clima tropical com estação seca no inverno; Cwa: clima subtropical úmido com inverno seco. Altura: altura comercial média (m); DAP: diâmetro sem casca à altura do peito médio (cm); Volume: volume médio sem casca (m³). *Número de repetições (árvores) utilizadas para cada espécie. Amostragem tradicional (AT): Amostragens em 0%, DAP, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial do fuste.

Ao agrupar as espécies de eucalipto por idade das árvores, foi obtida diferença estatística para todas as faixas etárias avaliadas, exceto aos cinco anos, idade na qual também se teve menor diferença absoluta entre metodologias (1 Kg.m⁻³). Além disso, os valores de densidade média aritmética e ponderada foram próximos entre si, variando de 425 a 528 Kg.m⁻³ e de 424 a 531 Kg.m⁻³, para densidade básica média aritmética e ponderada, respectivamente (Figura 1).

A densidade básica média aritmética para as madeiras de *Corymbia*, variou de 513 a 677 Kg.m⁻³, e a densidade ponderada pelo volume

apresentou um intervalo de resultados semelhante, entre 513 a 678 Kg.m⁻³. Das amostras de *Corymbia* avaliadas, 92% não houveram diferença estatística entre as diferentes metodologias. Também foi percebida uma tendência de maior similaridade entre as densidades com o passar da idade. Ao comparar através da junção das médias das diferentes espécies em uma única idade, não foi obtida diferença significativa (Figura 2).

Ao considerar as espécies de *Eucalyptus*, independentemente da idade das árvores, foi possível observar diferença estatística entre

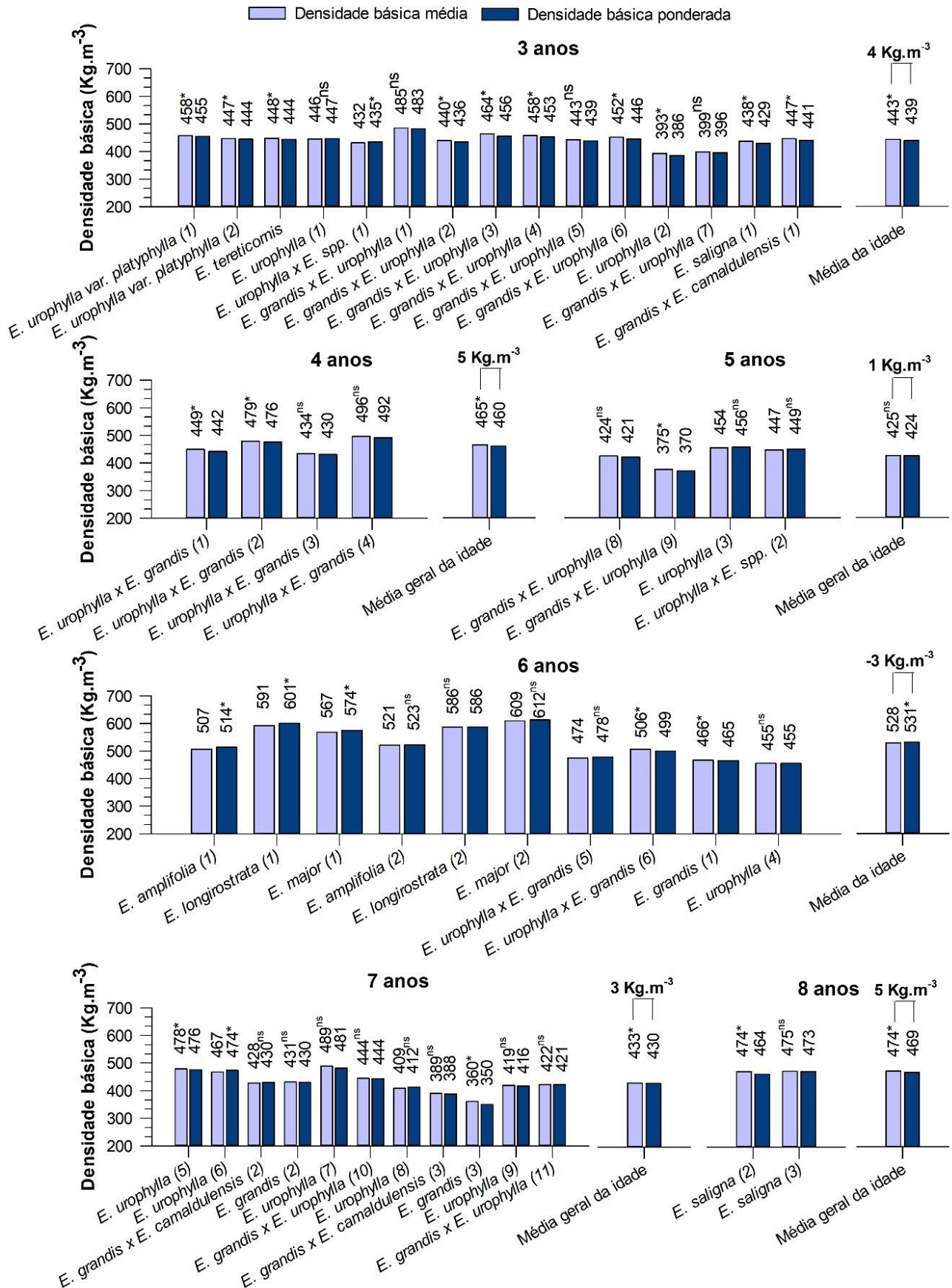


Figura 1. Densidade básica média aritmética e ponderada das madeiras de eucalipto analisadas. ^{ns}: não significativo ($p > 0,05$) e *: significativo ($p \leq 0,05$), a 5% de probabilidade de erro para o teste F.

densidade básica média aritmética e ponderada na maioria das amostras (72%). As diferenças absolutas para as espécies tidas como significativas, variaram de 2 a 6 Kg.m⁻³, enquanto para as espécies sem diferença significativa, foi de 1 a 2 Kg.m⁻³ (Figura 3). Alguns

clones, bem como a união das espécies em diferentes idades, apesar de diferenças absolutas pequenas, resultaram em diferença estatística.

Para as espécies de *Corymbia* aos seis e sete anos de idade, não foi possível observar diferença estatística entre as duas metodologias

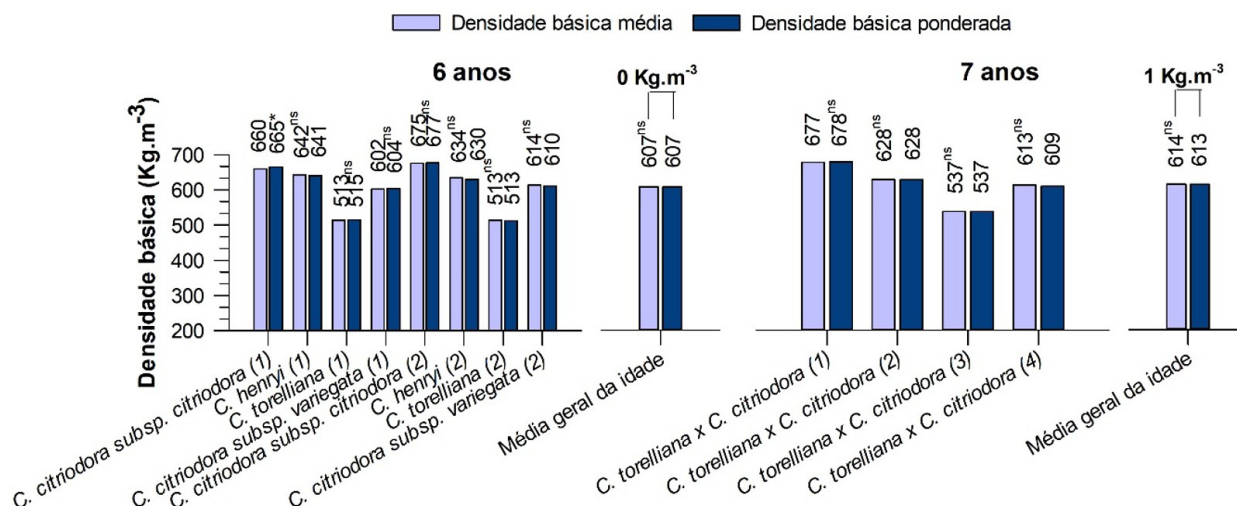


Figura 2. Densidade básica média aritmética e ponderada das madeiras de *Corymbia* analisadas. ns: não significativo ($p>0,05$) e *: significativo ($p\leq 0,05$), a 5% de probabilidade de erro para o teste F.

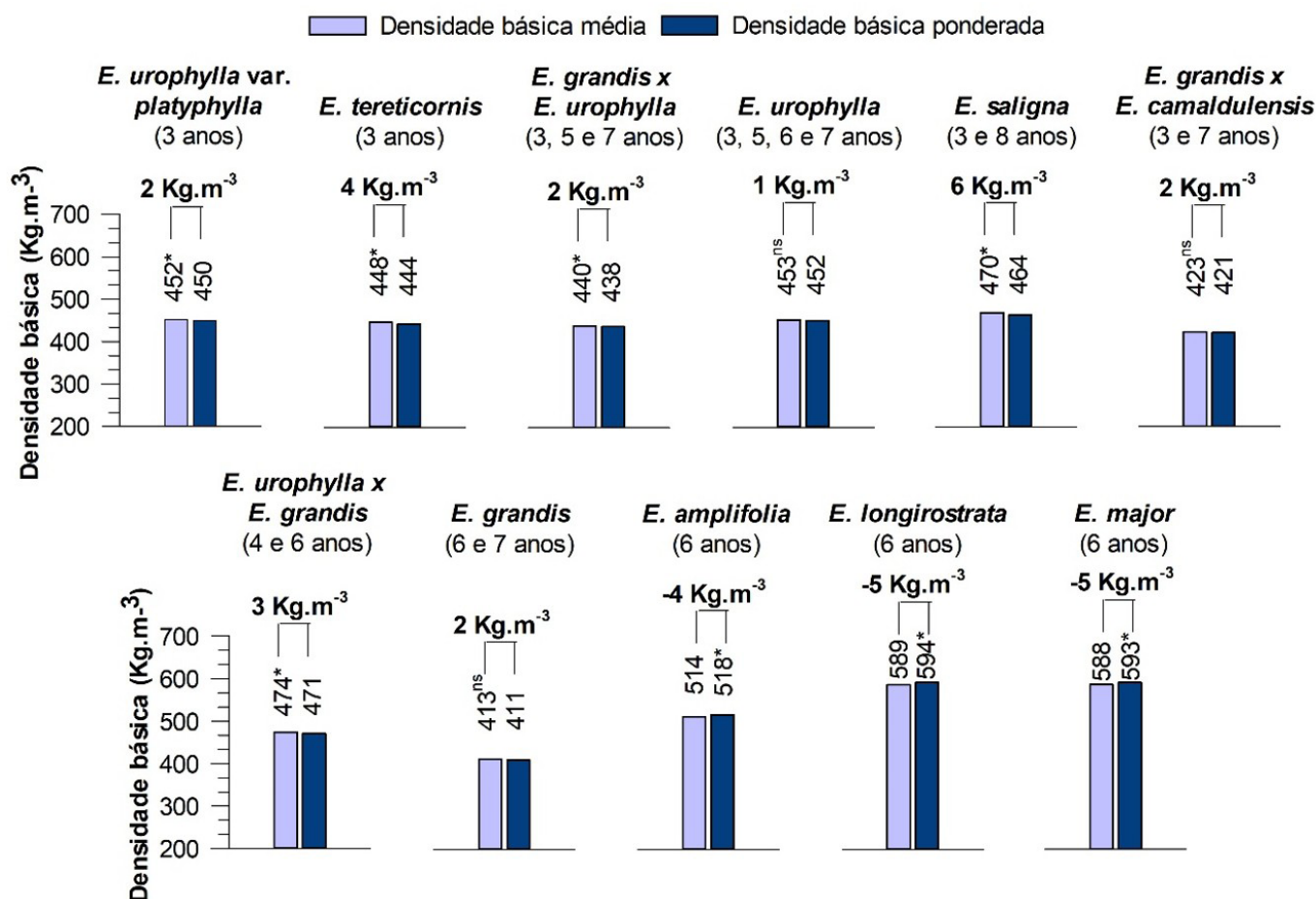


Figura 3. Densidade básica média aritmética e ponderada por espécie de eucalipto analisada. ns: não significativo ($p>0,05$) e *: significativo ($p\leq 0,05$), a 5% de probabilidade de erro para o teste F.

testadas na maioria das espécies (80%), em decorrência da proximidade entre os valores obtidos. As diferenças absolutas para o gênero variaram em intervalo menor do que para *Eucalyptus*, isto é, de 1 a 3 Kg.m⁻³ (Figura 4).

Com a junção das espécies, os valores de densidade básica média aritmética para a madeira de *Eucalyptus* variou de 413 (*E. grandis*) a 589 Kg.m⁻³ (*E. longirostrata*), enquanto para a ponderada o intervalo foi de 411 a 594 Kg.m⁻³ para as mesmas espécies. Já o gênero *Corymbia* variou de 513 (*C. torelliana*) a 668 Kg.m⁻³ (*C. citriodora* subsp. *citriodora*), para a densidade básica média aritmética e de 514 a 671 Kg.m⁻³ para a ponderada.

Para o gênero *Eucalyptus*, o *E. saligna* (média do material genético de 3 e 8 anos) apresentou a maior diferença entre os valores de densidade básica média aritmética e ponderada (6 Kg.m⁻³ - 1,3%), quando comparado as demais espécies avaliadas, enquanto o *E. urophylla* resultou em

menor diferença (1 Kg.m⁻³ - 0,22%). O *C. citriodora* subsp. *citriodora* e o *C. henryi* apresentaram as maiores diferenças de densidade básica entre as duas metodologias (3 Kg.m⁻³ - cerca de 0,5%) analisadas, enquanto as demais espécies do gênero resultaram em diferenças em torno de 1 Kg.m⁻³ (cerca de 0,18%). As diferenças foram maiores para as espécies de *Eucalyptus*, o que demonstra maior homogeneidade entre os indivíduos de *Corymbia*.

O intervalo de confiança para as espécies de eucalipto apresentou redução a partir dos 7 anos de idade, e são menores do que os obtidos para *Corymbia* aos 6 e 7 anos. Para as espécies de *Eucalyptus*, os intervalos de confiança da densidade básica média aritmética variaram entre 5,00 a 25,26 Kg.m⁻³, enquanto a densidade básica ponderada variou entre 4,75 a 25,26 Kg.m⁻³. Já para *Corymbia* o intervalo foi de 14,34 a 25,26 Kg.m⁻³ e de 15,40 a 25,26 Kg.m⁻³, para média aritmética e ponderada, respectivamente (Tabela 3).

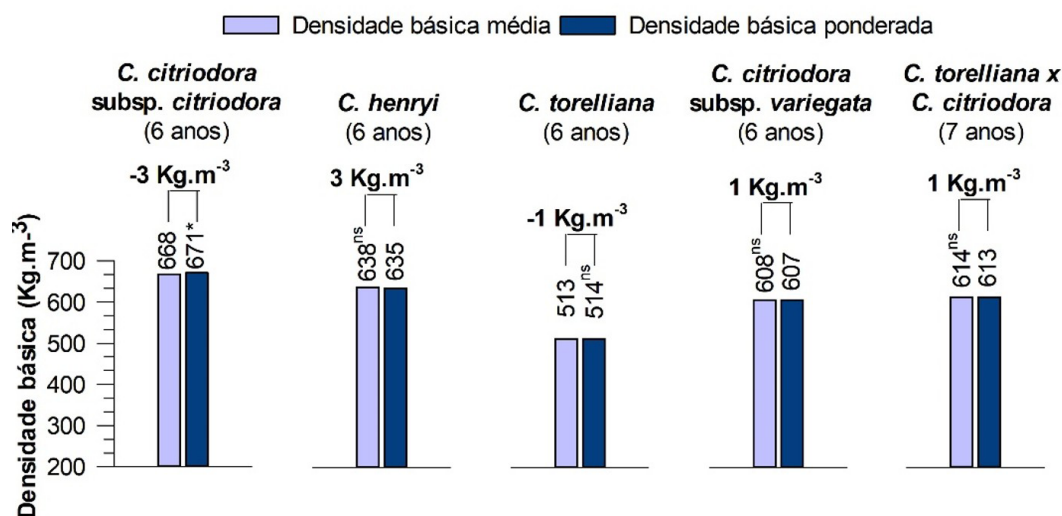


Figura 4. Densidade básica média aritmética e ponderada por espécie de *Corymbia* analisada. ns: não significativo ($p > 0,05$) e *: significativo ($p \leq 0,05$), a 5% de probabilidade de erro para o teste F.

Tabela 3. Intervalo de confiança para as espécies pertencentes a uma mesma idade, bem como para os materiais genéticos pertencentes a uma mesma espécie de *Eucalyptus* e *Corymbia*.

Idade (anos)		Intervalo de confiança (Kg.m ⁻³)			
<i>Eucalyptus</i>	DB _{ma}	DB _p	Espécie e subespécie	DB _{ma}	DB _p
3	4,94	5,14	<i>E. urophylla</i> var. <i>platyphylla</i>	5,13	4,75
4	16,77	16,64	<i>E. tereticornis</i>	7,51	7,55
5	12,36	12,73	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	7,35	7,45
6	12,28	12,61	<i>E. urophylla</i>	7,70	7,86
7	8,86	9,22	<i>E. saligna</i>	5,00	5,49
8	4,12	4,47	<i>E. grandis</i> x <i>E. camaldulensis</i>	13,02	12,47
<i>Corymbia</i>			<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	12,52	12,12
6	17,47	17,63	<i>E. grandis</i>	18,36	20,05
7	25,26	25,26	<i>E. amplifolia</i>	17,46	17,38
			<i>E. longirostrata</i>	15,31	15,87
			<i>E. major</i>	17,99	19,73
			<i>C. citriodora</i> subsp. <i>citriodora</i>	14,34	15,40
			<i>C. henryi</i>	17,63	18,53
			<i>C. torelliana</i>	16,67	17,28
			<i>C. citri. subsp. variegata</i>	19,44	19,44
			<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	25,26	25,26

DB_{ma}: densidade básica média aritmética; DB_p: densidade básica ponderada pelo volume.

Os valores de densidade básica obtidos pela média aritmética foram maiores que os valores de densidade básica quando calculada pela ponderação por meio do volume. A correlação entre os resultados de densidade básica obtidos por ambas as metodologias é significativa, forte e positiva, principalmente para *Corymbia*. Assim, os modelos gerados por regressão, para estimativa da densidade básica média aritmética por meio da densidade ponderada explicam quase 100% das alterações ocorridas (Figura 5).

4. DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para a densidade básica das espécies de *Eucalyptus* e *Corymbia* indicam uma variação significativa entre as metodologias de média aritmética e ponderada, especialmente em espécies mais jovens. Essa variação é acentuada nas fases iniciais de crescimento, como observado nas espécies de *Eucalyptus*. A densidade básica da madeira tende a aumentar e se estabilizar com a idade, o que explica a diminuição das diferenças significativas entre as metodologias com o avanço da maturidade das árvores (Boschetti et al., 2020).

A ausência de diferenças significativas em 50% das amostras de *Eucalyptus* e em 92% das amostras de *Corymbia* sugere que, para a maioria das situações, a densidade básica média aritmética pode fornecer estimativa robusta. Trata-se ainda de uma alternativa operacionalmente simples, especialmente quando os dados de cubagem do fuste não estão disponíveis (Vismara, 2009).

A média aritmética é suficientemente precisa em contextos florestais nos quais a cubagem rigorosa não é prática ou economicamente inviável (Nörnberg et al., 2023). No entanto, a ponderação pelo volume deve ser considerada em situações onde o valor econômico da madeira depende diretamente da precisão volumétrica, como em contratos comerciais ou em estimativas de biomassa para fins energéticos (Lafetá et al., 2021). Isto porque este método considera a representatividade volumétrica de cada seção do tronco, resultando em uma estimativa mais fiel da densidade e, conseqüentemente, da biomassa disponível.

A maior homogeneidade observada entre os indivíduos de *Corymbia* em comparação com os de *Eucalyptus* pode ser atribuída a fatores intrínsecos do gênero. Estudar a madeira de *Corymbia* é

importante porque o gênero apresenta propriedades promissoras para aplicações industriais e menor variabilidade entre indivíduos, além de contribuir para a diversificação florestal e o aprimoramento genético, favorecendo maior resiliência e aproveitamento tecnológico.

A média aritmética é sensível à presença de valores extremos, ou seja, pode ser influenciada desproporcionalmente quando há amostras com valores muito altos de densidade básica, mesmo que essas amostras representem uma pequena fração do volume total da árvore. No caso específico observado para o gênero *Corymbia*, foi verificada a presença de amostras de elevada densidade em posições superiores do fuste, que possuem volume relativamente pequeno. Como a média aritmética atribui o mesmo peso a todas as observações, esses valores mais altos impactam significativamente o resultado final, elevando a média geral.

A média ponderada leva em consideração o volume de cada seção do fuste, atribuindo maior peso às regiões com maior contribuição volumétrica. Assim, valores de densidade elevada em regiões de menor volume (como o topo da árvore) têm influência reduzida na média ponderada, o que explica a discrepância observada entre os dois métodos de cálculo.

Esse comportamento está relacionado à distribuição assimétrica dos dados, em que as amostras não estão distribuídas de forma uniforme ao longo do perfil do fuste. Além disso, a própria variabilidade genética entre espécies, associada a fatores como condições edafoclimáticas e silviculturais, pode acentuar as diferenças nas distribuições de densidade, principalmente quando se comparam espécies de diferentes gêneros, como *Eucalyptus* e *Corymbia*.

A proximidade entre os resultados do intervalo de confiança entre metodologias sugere que, a ponderação pelo volume não altera significativamente a densidade básica em relação à média aritmética para a maioria das espécies avaliadas. Esse resultado também foi corroborado pela análise estatística sem diferenças significativas. Contudo, a metodologia de ponderação pode introduzir uma variação maior no intervalo de confiança, possivelmente devido à distribuição desigual do volume ao longo do fuste. Além disso, a estratégia de amostragem ao longo do fuste, que variou conforme o trabalho avaliado, visto que, maior número de posições amostrais pode levar a resultados mais precisos.

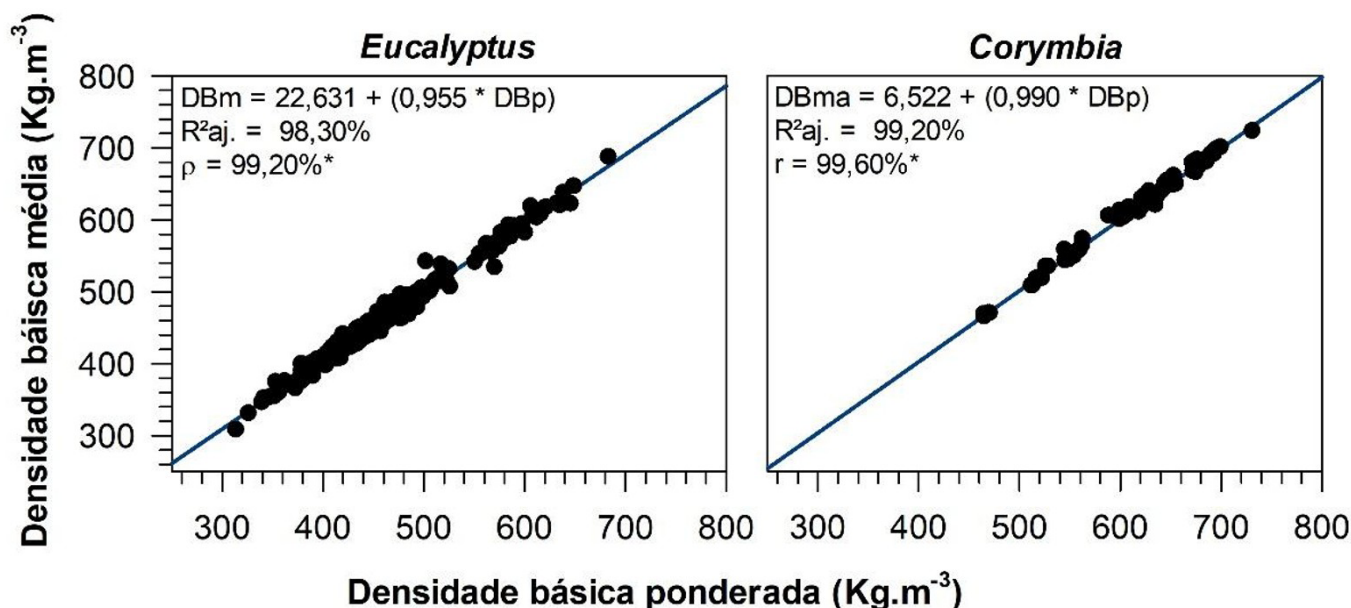


Figura 5. Regressão linear simples da densidade básica média aritmética e ponderada para espécies do gênero *Eucalyptus* e *Corymbia*. *: significativo ($p \leq 0,05$), a 5% de probabilidade de erro para o teste F.

A relevância dos intervalos de confiança na avaliação da densidade básica também se alinha com estudos de Boschetti et al. (2020), que enfatizam a importância de considerar variações ao longo do fuste e entre espécies para melhorar a precisão das estimativas. A consistência dos intervalos de confiança entre a média aritmética e a ponderada sugere que, para muitas situações, a média aritmética, apesar de ser mais sensível a valores altos de densidade, pode ser preferível devido à sua simplicidade operacional, especialmente quando os dados volumétricos não estão disponíveis.

A análise dos resultados também mostrou uma correlação forte e positiva entre as metodologias de cálculo da densidade básica, corroborando com Benjamin (2002), que encontrou altas correlações entre as densidades calculadas em diferentes porções do tronco. Este estudo confirma que ambas as metodologias de determinação da densidade básica são usuais e apresentam resultados consistentes, permitindo a escolha da metodologia de acordo com as necessidades e a disponibilidade de dados.

A média aritmética é adequada para inventários, programas de melhoramento genético e situações em que a cubagem rigorosa não é viável. É especialmente útil em materiais processados como cavacos, nos quais não há possibilidade de ponderação volumétrica (empresas de polpa celulósica e painéis de madeira reconstituída, por exemplo). Já a densidade ponderada é recomendada para aplicações que exigem maior precisão, como transações comerciais e estudos de carbono, pois reflete com mais fidelidade a distribuição volumétrica da densidade ao longo do fuste.

Além disso, é importante considerar o erro associado às determinações de densidade básica e volume, especialmente diante das pequenas diferenças observadas entre as metodologias. A densidade básica obtida por balança hidrostática, embora comum, pode variar conforme o grau de saturação, a estabilidade da balança e a homogeneidade do material. De forma semelhante, a cubagem rigorosa depende de medições precisas de diâmetro e comprimento, estando sujeita a erros sistemáticos e aleatórios. No presente estudo, as diferenças absolutas entre as metodologias, muitas vezes inferiores a $5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, situam-se dentro dos intervalos de confiança das médias. Isso sugere que parte da variação observada pode decorrer das incertezas inerentes ao processo de medição.

Este trabalho utilizou um banco de dados baseado em árvores jovens, ou seja, não apresentar diferença entre a densidade básica média e ponderada para grande parte das amostras, é um resultado relevante, considerando o ciclo de corte curto das espécies de eucalipto no Brasil. A inclusão de madeira adulta, com propriedades mais heterogêneas devido à maturação, poderia impactar significativamente esses resultados, tornando a densidade ponderada mais adequada para refletir a variabilidade real da amostra. As árvores utilizadas neste estudo foram coletadas em diferentes ambientes e por meio de diferentes estratégias de amostragem ao longo do fuste, conforme as condições intrínsecas de cada trabalho.

A escassez de estudos comparativos entre metodologias de cálculo da densidade básica da madeira decorre da complexidade técnica dos métodos e da variabilidade inerente às espécies e tipos de amostras. Esse cenário ressalta a importância de futuras pesquisas que abordem essa questão de forma sistemática. Estudos adicionais podem fornecer subsídios mais robustos para a escolha da metodologia mais adequada, considerando diferentes contextos de aplicação para o setor florestal.

5. CONCLUSÃO

Para a maioria das espécies de *Corymbia*, não há diferença significativa entre a densidade básica média aritmética e ponderada. Em *Eucalyptus*, 50% das espécies apresentaram diferenças significativas,

principalmente em árvores jovens de três anos, o que evidencia a influência da idade na divergência entre as metodologias.

A maior homogeneidade das espécies de *Corymbia* resultou em menor variação entre os métodos. A forte correlação positiva entre os cálculos indica que ambos são consistentes e aplicáveis conforme a disponibilidade de dados. Assim, a densidade média aritmética se mostra uma alternativa simplificada e eficaz, especialmente para árvores jovens ou quando a cubagem rigorosa do fuste não é viável.

REFERÊNCIAS

- Araujo, S. L., Protázio, L. B., Gimenez, G. G., Barros Junior, U. O., Castor Neto, T. C., Silva, D. F. S. H. S., Rezende, D. A. N., Almeida, M. N. F., Silva, J. G. M., & Vidaurre, G. B. (2025). Sampling strategies along the tree stem to determine the basic density of *Eucalyptus* wood. *Cerne*, 31, e-103500. <http://doi.org/10.1590/01047760202531013500>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2003). *ABNT NBR 11941: madeira: determinação da densidade básica da madeira*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Benjamin, C. A. (2002). *Comparação entre três critérios de amostragem para a avaliação da densidade básica da madeira de florestas implantadas de eucaliptos* (Dissertação de mestrado). Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Botucatu.
- Bobadilha, G. S., Vidaurre, G. B., Câmara, A. P., Fantuzzi Neto, H., Oliveira, J. T. S., Soliman, E. P., Lopes, D. J. V., & Zancunio, J. C. (2019). Effect of defoliar insect on growth and wood properties of eucalypt trees. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 77(5), 861-868. <http://doi.org/10.1007/s00107-019-01435-6>.
- Boschetti, W. T. N., Vidaurre, G. B., & Silva, J. G. M. (2020). *Qualidade da madeira de eucalipto proveniente de plantações no Brasil*. Vitória: EDUFES.
- Cirilo, N. R. M., Almeida, M. N. F., Santos, V. B., Souza, A. J., Conceição, G. J., Silva, J. G. M., Protázio, L. B., Arantes, B. S., Campoe, O. C., Hakamada, R. E., Medeiros Neto, P. N., Castor Neto, T. C., Guillemot, J., & Vidaurre, G. B. (2024). Impact of coppice and high stem management on *Eucalyptus* wood quality. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 82(6), 1841-1854. <http://doi.org/10.1007/s00107-024-02125-8>.
- Couto, A. M., Protázio, T. P., Reis, A. A., & Trugilho, P. F. (2012). Amostragens longitudinais alternativas para a determinação da densidade básica em clones de *Eucalyptus* sp. *Floresta e Ambiente*, 19(2), 184-193. <http://doi.org/10.4322/floram.2012.022>.
- Dias, A. C. C., Marchesan, R., Almeida, V. C., Monteiro, T. C., & Moraes, C. B. (2018). Relação entre a densidade básica e as retrações em madeira de teca. *Ciência da Madeira*, 9(1), 37-44. <http://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v9n1p37-44>.
- Downes, G. M., Hudson, I. L., Raymond, C. A., Dean, G. H., Michell, A. J., Schimleck, R., Evans, R., & Muneri, A. (1997). *Sampling plantation eucalypts for wood and fiber properties* (126 p.). Melbourne: CSIRO.
- Feuchard, L. D. (2015). *Influência do espaçamento de plantio e idade de colheita na qualidade da madeira de eucalipto para celulose* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro.
- Lafetá, B. O., Barbosa, I. W. B. S., Oliveira, A. G., Vieira, D. S., & Penido, T. M. A. (2021). Comprimentos de seção e altura de fustes na cubagem rigorosa em diferentes espaçamentos de eucalipto. *Agrarian*, 14(53), 360-370. <http://doi.org/10.30612/agrarian.v14i53.15237>.
- León, G. C., & Uranga-Valencia, L. P. (2013). Theoretical evaluation of Huber and Smalian methods applied to tree stem classical geometries. *Bosque*, 3493, 311-317. <http://doi.org/10.4067/S0717-92002013000300007>.

- Melo, A. B., Silva, P. H. M., Araujo, S. L., Silva, J. G. M., Ferraz, A. V., Rocha, S. M. G., Almeida, M. N. F., Araujo, M., Godinho, T., Castor Neto, T. C., Moulin, J. C., & Vidaurre, G. B. (2024). Productivity and wood quality traits of *Corymbia* and *Eucalyptus* species in two soil water deficit sites. *Industrial Crops and Products*, 219, 119141. <http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119141>.
- Nascimento, K. S. B. C., Silva, S. R., & Rodovalho, R. S. (2023). Modelagem volumétrica para árvores do cerrado em reserva legal no município de Uruaçu. *Mirante*, 16(1), 36-49. <http://doi.org/10.31668/mirante.v16i1.13751>.
- Nörnberg, L. V., Cardoso, G. V., Fernandes, M. A. M., Santos, O. P., & Pimentel, N. (2023). Otimização de pontos amostrais ao longo do fuste pra determinação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna*. *Nativa*, 11(1), 128-133. <http://doi.org/10.31413/nativa.v11i1.15068>.
- Oliveira, G. M. V., Mello, J. M., Scaloni, J. D., Scolforo, J. R. S., & Monteiro, T. C. (2018). Amostragem de discos e uso de equações para estimar a densidade básica da madeira em diversas fitofisionomias. *Ciência Florestal*, 28(4), 1615-1626. <http://doi.org/10.5902/1980509835127>.
- Queiroz, E. P. P. (2024). *Estimativa de densidade básica da madeira de eucalipto por métodos não destrutivos* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro.
- Rocha, S. M. G., Barros Junior, U. O., Oliveira, L. J., Ribeiro, L. A. A., Oliveira, C. V. A., Almado, R. P., Moulin, J. C., Valente, B. M. R. T., & Vidaurre, G. B. (2024). Association between the anatomical features and the natural drying of young wood from hybrid *Corymbia torelliana* and *Corymbia citriodora* clones. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 82(6), 1901-1912. <http://doi.org/10.1007/s00107-024-02134-7>.
- Santos, V. B., Conceição, C. J., Rodrigues, P. D., Cirilo, N. M. R., Almeida, M. N. F., Rocha, M. F. V., Guimarães, J. F. R., Carvalho, A. M. M. L., Gomes, F. J. B., Marceluno, P. R. C., Barbosa, V. O. P., Castor Neto, T. C., Moulin, J. C., Pedraza, C., & Vidaurre, G. B. (2024). Impacto da idade e do genótipo na qualidade da madeira de eucalipto para celulose solúvel. *Industrial Crops and Products*, 218, <http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118930>.
- Trugilho, P. F. (2009). Densidade básica e estimativa de massa seca e de lignina na madeira em espécies de *Eucalyptus*. *Ciência e Agrotecnologia*, 33(5), 1228-1239. <http://doi.org/10.1590/S1413-70542009000500005>.
- Vismara, E. S. (2009). *Mensuração da biomassa e construção de modelos para construção de equações de biomassa* (Dissertação de mestrado). Universidade de São Paulo, Piracicaba.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

SLA: conceitualização, curadoria dos dados, análise dos dados, pesquisa, validação de dados, design de apresentação de dados, redação do manuscrito original; SMVN: pesquisa, metodologia, redação do manuscrito original; EPPQ: pesquisa, metodologia, redação do manuscrito original; RGCS: Revisão; VBS: conceitualização, metodologia, revisão; JGMS: revisão; AJS: conceitualização, metodologia, revisão; OPS: metodologia, revisão; PHMS: metodologia, revisão; GBV: conceitualização, pesquisa, administração do projeto, supervisão, revisão.