UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DAVIDSON DA SILVA NOVAES

MÉTODO DA ALTURA RELATIVA APLICADO A INDIVÍDUOS DE *Pinus taeda* L.

DOIS VIZINHOS

2023

DAVIDSON DA SILVA NOVAES

MÉTODO DA ALTURA RELATIVA APLICADO A INDIVÍDUOS DE *Pinus taeda* L.

Relative height method applied to individuals of *Pinus taeda* L.

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Eleandro José Brun.
Coorientador: Veridiana Padoin Weber.

DOIS VIZINHOS
2023

4.0 Internacional

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Dois Vizinhos

DAVIDSON DA SILVA NOVAES

MÉTODO DA ALTURA RELATIVA APLICADO A INDIVÍDUOS DE PINUS TAEDA L.

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Ciências Agrárias da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Agroecossistemas.

Data de aprovação: 01 de Setembro de 2023

Dr. Eleandro Jose Brun, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Elisabete Vuaden, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Evandro Alcir Meyer, Doutorado - Universidade Federal de Santa Maria (Ufsm)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 06/09/2023.

A todas as pessoas que acreditaram no meu trabalho.

Obrigado por tudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus por ter estado ao meu lado nos momentos difíceis.

Ao meu pai Gilson Novaes dos Santos e Deize Lucia da Silva Novaes (*in memorian*) por alimentar meus sonhos e permitir que eu fosse mais longe.

Aos meus orientadores Eleandro José Brun e Veridiana Padoin Weber por todo auxílio nesse processo desafiador.

Ao Campus Dois Vizinhos por ter se revelado como uma mão amiga em um dos momentos mais difíceis da minha vida até o momento.

RESUMO

O manejo de florestas plantadas com espécies do gênero Pinus demanda, entre as ferramentas fundamentais para tal, que medições com a maior precisão possível sejam realizadas. Porém, tais práticas podem envolver custo e tempo elevados, o que demanda a pesquisa e desenvolvimento de métodos de medição que sejam mais rápidos, baratos e igualmente precisos. Este estudo objetivou avaliar as estimativas de diâmetro e volume, obtidos pelo Método da Altura Relativa, em comparação ao Método de Smalian observados através da cubagem de árvores-amostra, em povoamento de *Pinus taeda* L. Foram usados dados de 65 árvores da espécie, plantadas na região de Centro Sul do Paraná, em Irati, com idades entre 7,5 e 29,5 anos. Foram realizados cálculos de volume através dos métodos de altura relativa, os quais foram comparados pelo volume obtido pelo método de Smalian. A comparação se deu através dos critérios Desvio médio percentual (MDP%), Bias, correlação linear ($r_{(Y \hat{Y})}$) e erro padrão da estimativa ($s_{(Y \hat{Y})}$), entre valores observados e estimados de diâmetro e volume ao longo do tronco das 65 árvores. Os dados foram submetidos às análises estatísticas de teste t para dados pareados, teste F e a precisão (P%), obtida pelo teste de Qui-quadrado. Não houve diferença significativa entre os diâmetros mensurados nas posições sugeridas por Smalian e o Método da Altura Relativa, fato que torna esse último método como uma possibilidade para a cubagem de árvores em pé. Em relação ao desempenho do Método da Altura Relativa entre modelos volumétricos e fatores de forma, não houve vantagens em utilizar o método testado, podendo ser usado qualquer um com a mesma precisão relativa. As regiões do fuste que apresentaram maior valor de erro padrão para o volume foram: entre a altura relativa e altura total, seguida pela região do DAP e altura relativa e, por fim, a região entre a altura zero e DAP. Para as estimativas do volume, o método da altura relativa apresentou uma leve superestimativa dos valores para as árvores estudadas.

Palavras-chave: Florestas plantadas. Pinus. Medições Florestais.

ABSTRACT

The management of planted forests with species of the genus *Pinus* requires, among the fundamental tools for this purpose, that measurements be performed with the greatest possible precision. However, such practices can involve high costs and time, which demands research and development of measurement methods that are faster, cheaper and equally precise. This study aimed to evaluate the estimates of diameter and volume, obtained by the Relative Height Method, in comparison with the Smalian Method observed through the cubing of sample trees, in a *Pinus taeda* L. stand. Data from 65 trees of the species, planted in the South-Central region of Paraná, in Irati, with ages ranging from 7.5 to 29.5 years, were used. Volume calculations were performed using the relative height methods, which were compared with the volume obtained by the Smalian method. The comparison was made using the following criteria: Mean Percentage Deviation (MDP%), Bias, linear correlation (r_(Y Ŷ)) and standard error of the estimate (s_(Y Ŷ)), between observed and estimated values of diameter and volume along the trunk of the 65 trees. The data were subjected to statistical analyses using the t-test for paired data, the F-test and the precision (P%), obtained by the Chi-square test. There was no significant difference between the diameters measured in the positions suggested by Smalian and the Relative Height Method, a fact that makes this last method a possibility for cubing standing trees. Regarding the performance of the Relative Height Method between volumetric models and shape factors, there were no advantages in using the tested method, and any one can be used with the same relative precision. The regions of the trunk that presented the highest standard error value for the volume were: between the relative height and total height, followed by the region of DBH and relative height and, finally, the region between zero height and DBH. For volume estimates, the relative height method presented a slight overestimation of the values for the trees studied.

Keywords: Planted forest. Pinus. Forestry measurements.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 9
2 OBJETIVOS 11
2.1 Objetivo geral 11
2 2 Objetivos específicos 11
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **12**
3.1 Pinus taeda l 12
3.2 - Métodos de cubagem 13
3.2.1 - Cubagem pelo Método de Smalian 14
3.2.2 Método da Altura relativa 16
3.2.3 Uso de Fator de forma no cálculo de volume 19
4. MATERIAL E MÉTODOS **22**
4.1 Caracterização dos povoamentos de coleta de dados 22
4.2 - Método da altura relativa 23
4.3 - Estimativa de volume 24
4.4 Critérios estatísticos de análise 25
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO **27**
5.1 Modelos e fatores de forma analisados 29
5.2 – Volume pelo método da altura relativa e os erros de estimativas 32
5.3 – Comparativo entre os diâmetros medidos e estimado pelo método da altura relativa 34
5.3.1 - Diâmetro abaixo do DAP 35
5.3.2 - Diâmetro entre DAP e hr 39
5.3.3 - Diâmetro entre hr e ht 43
5.3.4 - Volume abaixo do DAP 48
5.3.5 - Volume entre DAP e Altura relativa 51
5.3.6 - Volume entre Altura relativa e Altura total 53
6 CONCLUSÕES **56**
REFERÊNCIAS **57**

1 INTRODUÇÃO

As florestas são relevantes para a produção interna de vários países, destacando-se como fonte energética e de matéria-prima e por serem indispensáveis para a conservação e estabilidade de outros recursos naturais renováveis (IBA, 2022)

Devido à presença perene do uso de madeira, os estudos voltados a volumetria são uma prática recorrente do engenheiro florestal (PÉLLICO NETO, 2004). Uma árvore pode ter múltiplos usos, agregando valor à matéria prima de acordo com o mercado, sendo assim essencial para o planejamento e quantificação do produto (MACHADO et al., 2004; COSTA et al., 2016).

A mensuração do estoque madeireiro em florestas possui elevada importância para o plan`ejamento de empresas florestais. Usualmente, para conhecer o volume de florestas plantadas é feito o inventário da floresta, construindo modelos para estimar o volume de cada árvore mensurada, exigindo que algumas árvores representativas sejam derrubadas no povoamento (GAMA, 2019).

A necessidade de abater árvores-amostra para a construção de modelos matemáticos é o mais recomendado para melhorar a acurácia do resultado. Sendo assim, tal prática é responsável por custos altíssimos, tendo por base que a cubagem, que deve ser realizada de forma recorrente e em múltiplos estratos que compõem as populações amostradas. Aliando ao custo e o tempo de deslocamento das equipes e porte das árvores, a cubagem passa a ser negligenciada em empreendimentos florestais, impactando negativamente na qualidade das predições volumétricas (ANDRADE et al., 2009)

Existem variadas fórmulas e métodos disponíveis para quantificar o volume de madeira nas árvores, os quais são chamados de volumes reais, devido à forma como são construídos. Os métodos de mensuração de volume real são desenvolvidos com base no método de Deslocamento da Água (Xilômetro), fazendo desses métodos uma estimativa do volume verdadeiro (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2009).

Desenvolvido por Andrade e Leite (1997), o método da Altura Relativa tem como base os princípios dos sólidos de revolução apresentados por Gomes (1957),

como sequência a serem empregadas nas atividades de mensuração de plantios florestais.

O Método da Altura Relativa possui como uma das suas características a não necessidade de abater árvores-amostra, sendo possível reduzir o número de árvores bem como a quantidade de medições em cada indivíduo, quando comparado com a cubagem, onde as árvores-amostras precisam ser abatidas (ANDRADE; LEITE, 2001).

Segundo Leite e Andrade (2002) o Método da Altura Relativa dispensa ajustar, analisar e testar equações volumétricas ou de *taper* para estimar o volume, sendo necessário apenas a mensuração do diâmetro a 1,3 m do solo (*dap*), altura total (*Ht*) e diâmetro em um ponto entre o *dap* e a *Ht*.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar as estimativas de diâmetro e volume, obtidos pelo Método da Altura Relativa, em comparação ao Método de Smalian observados através da cubagem de árvores-amostra, em povoamento de *Pinus taeda* L.

2 2 Objetivos específicos

- Comparar a acurácia entre os métodos Altura Relativa e Smalian;
- Avaliar a influência da idade e DAP no volume individual.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Pinus taeda l.

O gênero *Pinus* é o segundo mais plantado no Brasil. A maioria das plantações, 87%, está localizada no Sul do Brasil, nos estados do Paraná (44%), Santa Catarina (26%) e Rio Grande do Sul (17%) (IBÁ, 2022). Segundo o IBÁ (2022), o principal uso do pinus é madeira, celulose e papel, painéis e energia, sendo um dos principais gêneros utilizados no país para a produção de celulose de fibra longa (SHIMIZU, 2008).

Pinus taeda L. é uma espécie do gênero Pinus, com ocorrência natural no sudeste dos Estados Unidos da América, encontrado nos estados de Nova Jersey, Flórida, Texas, Arkansas, Oklahoma, Vale do Mississipi e Tennessee. (SUASSUNA, 1977).

Na região de ocorrência natural de *P. taeda*, o clima é úmido, temperado-ameno, com verões quentes e longos. A precipitação pluviométrica média anual varia de 1.020 mm a 1.520 mm e o período livre de geadas varia de cinco meses na parte norte até dez meses, na parte costeira sul. As temperaturas médias anuais variam de 13°C a 24°C, podendo chegar à mínima extrema de -23 °C (AGUIAR, 2014).

No Brasil, devido à baixa ocorrência de coníferas nativas e baixa rusticidade da *Araucaria angustifolia*, a única espécie com importância econômica, fez-se necessária a introdução das espécies do gênero *Pinus*, almejando atender à demanda da indústria por matéria-prima (SUASSUNA, 1977; ALBUQUERQUE; SILVA, 2008).

Os primeiros plantios feitos com espécies do gênero pinus possuíram a densidade variando entre 2.000 e 2.500 árvores por hectare, com espaçamento igual a 2,5 m x 2,0 m e 2,0 m x 2,0 m. Atualmente, o espaçamento mais adequado, baseado em pesquisas buscando a melhor produtividade, recomendam de 4,5 m^2 a 6,0 m^2 de área vital por árvore (SUASSUNA, 1977; SANQUETTA, 2004), o qual pode ainda ser ampliado, dependendo do grau de melhoramento do material genético e do objetivo final da produção.

Quanto ao regime de manejo, o ideal é modificá-lo de acordo com o objetivo do plantio, podendo ser aplicado ou não o desbaste, ainda sendo possível escolher a seletividade da atividade (PACHECO, 2013), bem como o grau e peso de desbaste.

Entre 2020 e 2021, a área plantada de pinus no Brasil passou de 1,91 para 1,93 milhões de ha respectivamente, representando 19,4% da área total de florestas plantadas, atingindo produtividade média de 29,7 m³/ha/ano (IBÁ, 2022).

Em solo brasileiro, o *Pinus taeda* se adapta bem em locais com clima fresco e inverno frio, com disponibilidade constante de umidade durante o ano. Esta condição é encontrada em todo o planalto das regiões Sul e Sudeste (ALBUQUERQUE; SILVA, 2008), correspondendo, em geral, ao clima do tipo Cfb.

3.2 - Métodos de cubagem

A correta mensuração do volume total de madeira e seus derivados constitui uma das informações de maior importância para o conhecimento e análise do potencial produtivo. Igualmente o estoque disponível em um povoamento florestal é imprescindível para o planejamento e monitoramento dos plantios comerciais, especialmente em estudos de crescimento e produção, bem como para quantificação de multiprodutos (SOUZA et al., 2011).

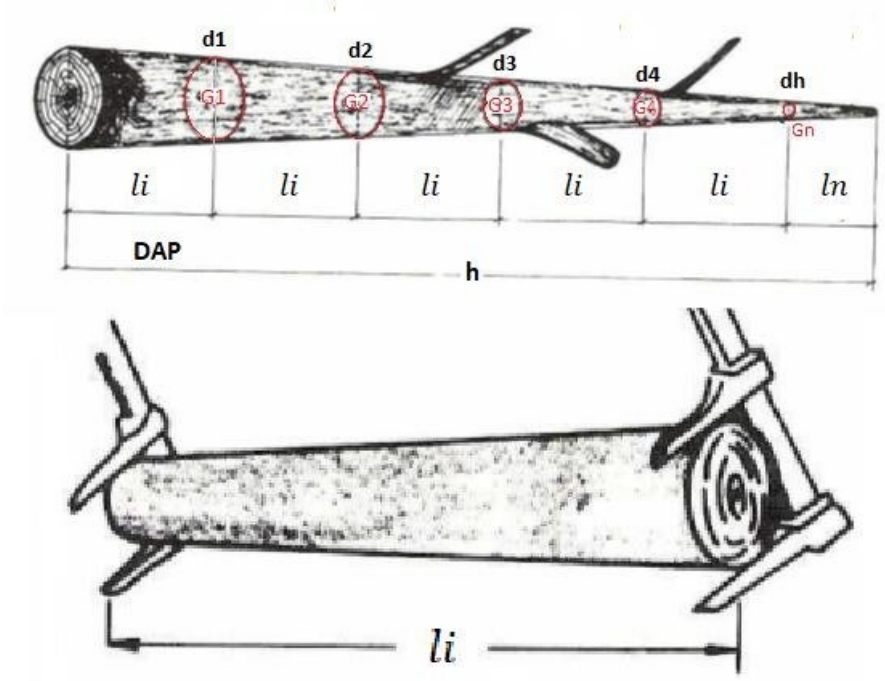
As informações que permitem a avaliação da forma da árvore são obtidas a partir do escalonamento, que consiste na medição de diâmetros sobre um tronco de árvore em várias alturas. Isso pode ser feito medindo o diâmetro das árvores diretamente após a colheita, ou indiretamente, com um dendrômetro óptico (CAMPOS; LEITE, 2009) em árvores em pé. O escalonamento indireto é mais barato que o escalonamento direto e pode ser feito usando um pentaprisma de Wheeler, um relascópio Bitterlich, um dendrômetro de Barr ou um Criterion, por exemplo (NICOLETTI et al., 2021). Estudos avaliaram o escalonamento indireto usando o Criterion RD 1000 em comparação com medidas diretas, e observaram que o escalonamento indireto é confiável e não apresenta tendência aos resultados (CURTO et al., 2019; NICOLETTI et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2019). NICOLETTI et al. (2015)

compararam medições indiretas do dendrômetro óptico Criterion 400 e RC3H com medições diretas de dimensionamento destrutivo e encontraram que o dimensionamento indireto realizado com o Criterion 400 era mais confiável.

3.2.1 - Cubagem pelo Método de Smalian

Essa forma de cubagem foi concebida por Septofontaines, em 1791 e posteriormente introduzida na Alemanha por Smalian, tendo por isso seu nome a ela associado (SILVA, 1979). Nesse método, o volume de cada secção é calculado em função do comprimento e das áreas basais nas extremidades das secções, como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Seccionamento pelo método de Smalian.



Fonte: Adaptado de FINGER (1992)

A cubagem por esse método secciona a árvore em n seções de comprimentos absolutos. Sobre as seções são medidos os diâmetros (d_i) ou as circunferências (c_i)

com e sem casca nas suas extremidades e, em seguida, calcula-se o volume, conforme a equação 1.

$$vn = (\frac{g_1 + g_2}{2})\, ln \quad (1)$$

Em que:

$vn =$ Volume da tora (seção) em m³.

$g_1 =$ Área transversal na base da tora em m² (ver também equação 2);

$g_2 =$ Área transversal no topo da tora em m² (ver também equação 3);

$ln =$ Comprimento da tora em m.

$$g_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} = \frac{c_1^2}{4\pi} \quad (2)$$

$$g_2 = \frac{\pi d_2^2}{4} = \frac{c_2^2}{4\pi} \quad (3)$$

Em que:

$d_1 =$ Diâmetro na base da tora em cm.

$c_1 =$ Circunferência na base da tora em cm.

$d_2 =$ Diâmetro no topo da tora em cm.

$c_2 =$ Circunferência no topo da tora em cm.

Após o cálculo do volume das n seções (toras), o volume total ou o volume da árvore (v) é obtido pela soma dos volumes das <n= seções. Além disso, para obtenção do volume rigoroso, incluindo a ponteira da árvore, deve-se considerar o cálculo do cone (ponteira), conforme equação 4.

$$v_p = \frac{g_{n^l_p}}{3} \quad (4)$$

Em que:

$vp =$ Volume da ponteira em m³.

$g_{n^l_p} =$ Área transversal na base da tora em m².

Quando ocorrem irregularidades nos troncos, pela existência de galhos e nós, o ponto de medição pode ser transferido para o local onde o tronco volta ao normal, imediatamente acima ou abaixo do ponto exato, conforme a maior proximidade do ponto em relação a normalidade do tronco.

Comparando os métodos de Smalian, Huber e Newton para *Pinus elliottii*, definindo seções de 1, 2, 4 e 6 m, Machado e Nadolny (1991) calcularam os erros percentuais, com base no volume verdadeiro, para o volume total de cada indivíduo e para o volume de cada seção ao longo da árvore. Os autores analisaram os erros percentuais para os volumes das diferentes seções ao longo do fuste, observando-se uma tendência de superestimativa dos volumes da base e subestimativa dos volumes da parte superior do fuste para todos os métodos. Concluíram então que os métodos de Huber e Newton foram as de melhor desempenho.

Loetsch et al. (1973), buscando identificar a diferença entre os métodos de Newton, Smalian e Huber, observaram que utilizando o método proposto por Huber, o erro variou entre -1 e 2%, e quando utilizando o método de Smalian, o erro passou a ficar próximo a 2%, quando comparado com os volumes determinados pela fórmula de Newton, que é mais exata, segundo Husch et al. (1983).

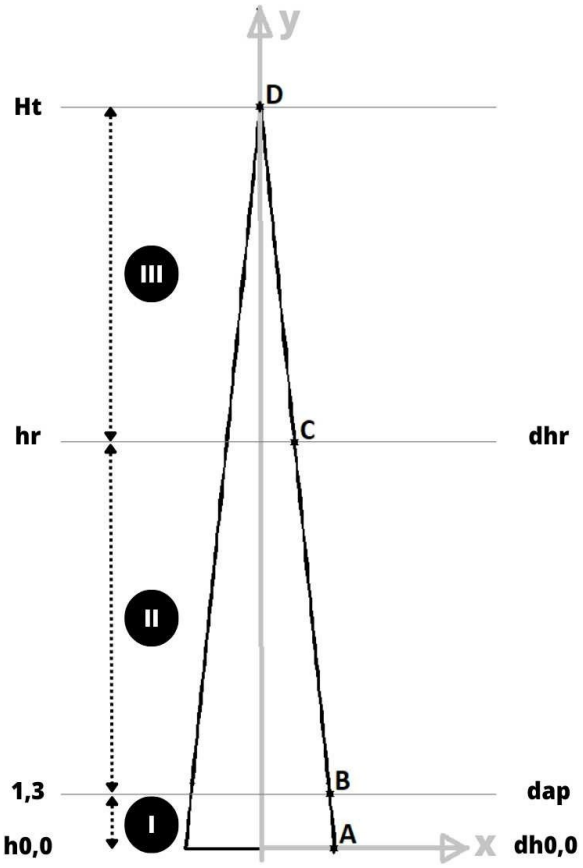
3.2.2 Método da Altura relativa

A base teórica do método da altura relativa segue o seguinte postulado: <Existe um determinado ponto entre o dap e a altura total de uma árvore que, dividindo-a em dois intervalos, permite-se minimizar os erros da estimativa do taper, pois, em relação ao dap, considera-se que o perfil de uma árvore seja o resultado da intercessão de várias retas com coeficientes angulares, em determinados intervalos, aproximadamente iguais, sendo que os lados opostos se encontram no ponto coincidente com a altura total da árvore, tendo, portanto, o eixo Y como uma reta perpendicular que separa igualmente estes perfis". Este postulado é melhor visualizado na Figura 2, onde são ilustradas as informações necessárias para o desenvolvimento do método. O ponto de divisão da árvore, denominado de altura

relativa (hr), conforme ANDRADE e LEITE (1997), é obtido pela expressão: $/r = \frac{(Ht-1{,}7)}{1{,}7}$

Figura 2: Croqui de árvore-amostra ilustrando as informações necessárias para desenvolvimento do método da altura relativa.

Em que:



Fonte: Adaptado de ANDRADE, (2001)

A = ponto contendo o par ordenado $(\mathrm{X} = \frac{d/_{0,0}}{2}; Y = /_{0,0})$;

B = ponto contendo o par ordenado $(\mathrm{X} = \frac{dap}{2}; Y = 1{,}3)$;

C = ponto contendo o par ordenado $(\mathrm{X} = \frac{d/r}{2}; Y = /r)$;

D = ponto contendo o par ordenado $(\mathrm{X} = 0; Y = Ht)$;

I = intervalo formado entre $/_{0,0}$ e $1{,}3$

II = intervalo formado entre $1{,}3$ e $/r$

III = intervalo formado entre $/r$ e Ht

De acordo com ANDRADE e LEITE (1997) as informações coletadas, indicadas nas posições da Figura 2, são utilizadas nas expressões a seguir para o cálculo estimado:

$$CAR_{IJ} = \frac{1{,}3\ 2\ /_{0,0}}{\frac{(dap_j\ 2\ d/_{0,0j})}{2}} \quad (5)$$

$$CAR_{IIJ} = \frac{1{,}3\ 2\ /_{rj}}{\frac{(dap_j\ 2\ d/r_j)}{2}} \quad (6)$$

$$CAR_{IIIJ} = \frac{/r_j\ 2\ Ht_j}{\frac{(d/r_j)}{2}} \quad (7)$$

Em que:

CAR_{IJ} = coeficiente angular da reta definida pelo i-ésimo intervalo na j-ésimo árvore-amostra,

Onde i = I, II, III (Figura 1);

$d/_{0,0j}$, dap_j e d/r_j = diâmetro medidos à $/_{0,0}$,1,3 e $/r$ metros do nível do terreno, na j-ésima árvore-amostra;

Ht_j = altura total da j-ésima árvore-amostra.

A cubagem pode ser feita utilizando-se alturas absolutas ou relativas ao longo do tronco, com a árvore abatida (GOMES, 1957, AHRENS, 1980, LIMA, 1986, CAMPOS, 1986, FINGER, 1992, SCHNEIDER et al., 1996, PETERSSON, 1999), ou com a árvore em pé (SOUZA; JESUS, 1991, NEGRÓN, 1995, SCOLFORO et al., 1998, CHICHORRO, 2000, ANDRADE e LEITE, 2000). Também, a cubagem pode ser feita utilizando-se alturas absolutas e relativas ao longo do tronco (FIGUEIREDO-FILHO et al., 1996).

3.2.3 Uso de Fator de forma no cálculo de volume

Usado comumente para casos em que temos poucas informações do plantio referente ao volume, o fator de forma é uma opção antiga para levantar parte das variáveis dendrométricas, permitindo realizar com rapidez o trabalho de inventário. Fornece estimativas confiáveis, desde que se controle idade, espaçamento e sítio (FRANCO et al., 1997).

Definido como a razão entre volumes utilizada para corrigir o volume do cilindro para o verdadeiro volume da árvore, o fator de forma é uma variável influenciada pela espécie, sítio, espaçamento, desbaste e idade, entre outros fatores (SCOLFORO, 1998).

A redução do diâmetro do fuste, chamado de <forma da árvore ou *taper*=, é a razão fundamental para a variação do volume da árvore, tendo origem nas variações da forma do tronco com diminuição sucessiva dos diâmetros da base ao topo da árvore. É modificada em função da espécie, diâmetro à altura do peito, idade, manejo e sítio (DRESCHER et al., 2001).

O fator de forma é definido como um módulo de redução, que deve ser multiplicado pelo produto da área basal (g) com a altura (h) para se ter o volume de uma árvore em pé (SILVA, 1979), como mostra a equação 8.

$$v = g_i * / * \bar{A}_{1,30} \quad (8)$$

Em que:

V = Volume em m³;

g = Área transversal da tora em m²;

h= altura total (m);

$\bar{A}_{1,30}$ = Fator de forma normal;

À medida que o fator de forma se aproxima de 1, mais cilíndrica é a árvore. Fatores iguais a 1 não são obtidos, porque implicaria na forma de um cilindro e a árvore apresenta sempre um afilamento ao longo do tronco (Nicoletti et al., 2021).

O fator de forma médio é calculado sobre um número de árvores representativo da população e serve para aproximações rápidas do volume de árvores. Segundo o processo de cálculo, os fatores de forma podem ser chamados de artificiais ou naturais conforme as equações 9 e 10.

$$\bar{A}_{1,3} = \frac{V\bar{A}lume\ ri\acute{y}\bar{A}r\bar{A}s\bar{A}}{V\bar{A}lume\ d\bar{A}\ cilindr\bar{A}\ c\bar{A}m\ di\hat{a}metr\bar{A}\ a\ d_{1,3}} \quad (9)$$

$$\bar{A}_{0,1} = \frac{V\bar{A}lume\ ri\acute{y}\bar{A}r\bar{A}s\bar{A}}{v\bar{A}lume\ d\bar{A}\ cilindr\bar{A}\ c\bar{A}m\ di\hat{a}metr\bar{A}\ a\ d^{*}_{0,1h}} \quad (10)$$

Onde:

$\bar{A}_{1,30}$ = fator de forma normal.

V rigoroso = volume obtido a partir da cubagem rigorosa (m³).

V cilindro = volume calculado a partir da área basal a 1,30m e altura total (m³).

*$d_{0,1/}$= diâmetro de Hohenadl tendo como referência a base da árvore.

A semelhança a determinados sólidos geométricos que o tronco de uma árvore possui, pode ser dividido por cada região do tronco. A base da árvore se assemelha a um neilóide, a face intermediária a um paraboloide e a extremidade final a um cone (GOMES, 1957; CAMPOS, 1986; SCOLFORO e FIGUEIREDO FILHO, 1993; AVERY e BURKHERT, 1997).

Coníferas raramente apresentam troncos cones, parabolóides ou neilóides padrões, assumindo formas intermediárias entre o cone e o parabolóide (HUSCH et al., 1983).

As exigências dos diversos setores que utilizam madeira de pinus como matéria-prima são diferentes, portanto, existem diferentes práticas de manejo aplicadas aos povoamentos para maximizar a produtividade e os ganhos econômicos em cada caso (DAVID et al., 2018). Um dos fatores de manejo mais importantes é o espaçamento de plantio, pois afeta a forma das árvores, o volume, a taxa de crescimento e até a frequência de controle de plantas competidoras e adubação.

O espaçamento de baixa densidade tende a produzir menor quantidade de árvores, porém de maiores dimensões, o que é adequado para a indústria de serraria, apesar do fato de que essa situação tende também a produzir maior conicidade. Por outro lado, espaçamentos de alta densidade tendem a produzir muitas árvores e de menores dimensões, que são adequadas para a indústria de celulose e papel (LIMA et al., 2010) e biomassa energética.

Quanto maior o espaçamento de cultivo, mais recursos disponíveis para a planta, mais rápido é esse crescimento, e o caule tende a ser mais cônico e menos cilíndrico (SILVEIRA et al., 2014). Estudos avaliaram a forma e o volume das árvores sob diferentes espaçamentos para *Tectona grandis* L. (Vendruscolo et al., 2016) e *Eucalyptus benthamii* (BENIN, Wionzek e WATZLAWICK, 2014).

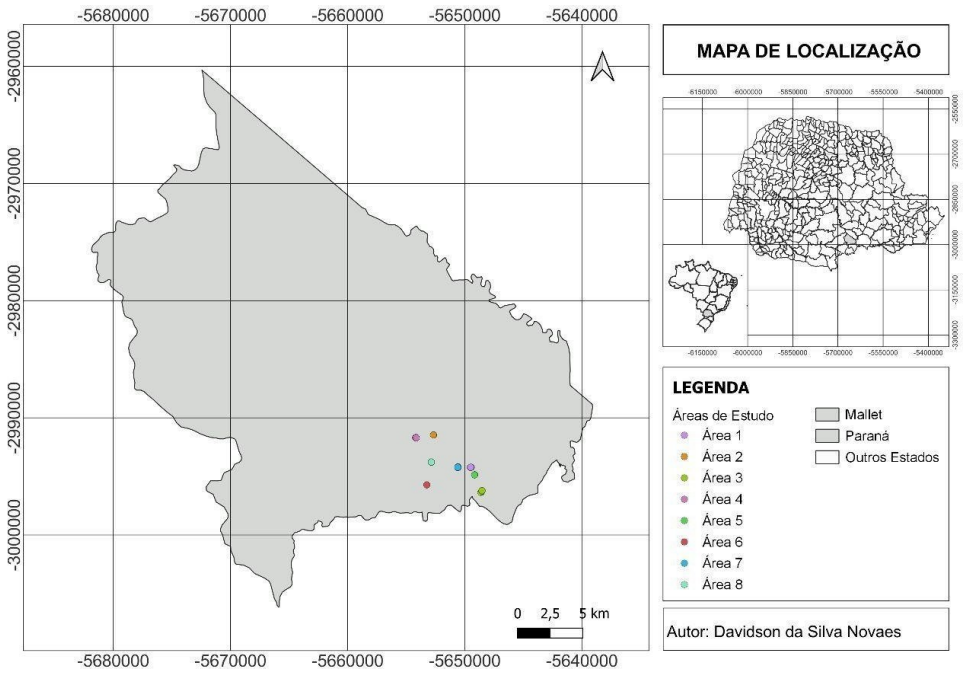
A conicidade é outra variável importante a ser considerada nas práticas de manejo, pois retrata a forma da árvore em um valor, o que é muito conveniente para as indústrias de folheados, por exemplo.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização dos povoamentos de coleta de dados

O estudo foi realizado utilizando-se de dados de sessenta árvores de *Pinus taeda*, plantadas em diferentes propriedades rurais na região de Irati-Paraná, conforme o mapa com a localização das propriedades onde as árvores estavam plantadas (Figura 3).

Figura 3: Mapa de localização das fazendas onde as arvores usadas no estuda foram plantadas.



Fonte: Autoria própria (2023)

De acordo com a classificação climática de Köppen, a região onde a floresta está inserida apresenta clima do tipo Cfb -Subtropical Úmido Mesotérmico com geadas frequentes no inverno e verões frescos, sem estação seca. O período quente ocorre de setembro a abril, com temperaturas médias inferiores a 22°C, e a estação fria, que vai de maio a agosto, apresenta médias inferiores a 18°C e mínimas abaixo de 0°C. Os meses de dezembro a março apresentam chuvas com maiores volumes. Predominam solos do tipo Latossolos vermelhos, Cambissolos Háplicos e Argissolos

Vermelho-amarelos (MAZZA, 2006). As características silviculturais gerais e os principais tratos aplicados aos povoamentos estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1: Características gerais das plantações de Pinus taeda em cada fazenda onde os dados foram coletados.

Propriedade	Área (ha)	Idade (anos)	Número de árvores cubadas	Total de árvores derrubadas	Espaçamento (m x m)
1	6	11	1	10	2,5 x 2,5
	20	30	9		2,5 x 2,5
2	2	14	1	5	2,5 x 2,5
	4	15	4		2,5 x 2,5
3	3	16	3	11	2,5 x 2,5
	14	25	8		2,5 x 2,5
4	12	24	10	10	2,5 x 2,5
5	14	25	6	6	2,5 x 2,5
6	11	8	3	3	2,5 x 2,5
7	9	29	10	10	2,5 x 2,5
8	5	26	2	10	2,5 x 2,5
	10	8	8		2,5 x 2,5
Soma	108	-	-	65	2,5 x 2,5

Fonte: Autoria própria (2023)

Todas as informações de cubagem foram cedidas pelos proprietários das fazendas onde estavam implantadas as áreas florestais. Os indivíduos foram cubados de acordo com o método de Smalian, mensurando a circunferência nas respectivas posições ao longo do tronco: 0,15 m; 0,7 m; 1,3 m; 2,0 m; a partir da posição 2 metros, foi mantido um intervalo de dois metros para a medição da variável de interesse até atingir a altura total de cada indivíduo, incluindo-se a medição do cone, na última porção de cubagem (ponteira).

4.2 - Método da altura relativa

Para o estudo, foram utilizadas as informações de diâmetro nas posições $d_{0,15}$, $d_{1,3}$, $d_{/r}$e / de cada árvore obtidos para o cálculo da cubagem rigorosa. Os valores foram usados para calcular o volume dos indivíduos pelo método proposto por

Andrade e Leite (2001). Quando a altura relativa calculada não coincidia com uma seção cubada na árvore, foi adotada uma interpolação simples para obter o diâmetro nesse ponto.

4.3 - Estimativa de volume

Os dados coletados por meio da cubagem pelo método de Smalian foram usados para testar o desempenho de quatro modelos volumétricos previamente selecionados de acordo como sua facilidade de coleta das variáveis independentes, buscando compara o método testado com outros métodos usuais (Tabela 2).

Tabela 2: Modelos avaliados para estimar o volume das arvores usadas no estudo.

Equação	Modelo	Autor
1		Kopezky e Gehrhardt
2		Hahenade e Krenn
3		Husch, (1952)
4		Spurr (variável combinada)

Em que: V= volume em m^3; dap= diâmetro com casca a 1,3 m de altura (cm); h= altura total (m); βi= coeficientes de regressão; · = erro aleatório, sendo = N (0, Ã²).

Fonte: Autoria própria (2023)

A avaliação dos modelos foi feita pelos valores calculados para o Erro padrão de estimativas ($S_{yx\%}$), Coeficiente de determinação ($R^2_{aj.}$), Probabilidade de confiança $\{|T| > c\}$ estimados pelas seguintes nas equações

$$S_{yx\%} = \frac{\sqrt{\frac{S\bar{A}res}{GLres}}}{\hat{Y}} * 100 \quad (11)$$

Onde:

SQres = soma dos quadrados do resíduo;

GLres = graus de liberdade do resíduo;

Ȳ= média dos volumes reais.

$$R^2_{aj} = 1\ 2\ (\frac{n\ 2\ 1}{n\ 2\ p\ 2\ 1})\ (\frac{S\bar{A}res}{S\bar{A}t}) \quad (12)$$

Onde:

R^2_{aj} = coeficiente de determinação ajustado;

SQres = soma dos quadrados do resíduo;

SQt = soma dos quadrados total;

n = número de dados observados;

p = número de coeficientes do modelo matemático.

$$T = \frac{2\bar{Y}}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n} + \frac{S_2^2}{m}}} \quad (13)$$

4.4 Critérios estatísticos de análise

Os métodos foram comparados mediantes estatísticas para cada sessão da árvore de acordo com a idade, entre eles o Desvio médio percentual ($MDP_{\%}$), Bias, correlação linear ($r_{Y\,\hat{Y}}$) e erro padrão da estimativa ($s_{Y\,\hat{Y}}$), entre valores observados e estimados, de diâmetro e volume, ao longo do tronco das 65 árvores estudadas. Os dados foram submetidos às seguintes análises estatísticas: teste t para dados pareados, teste F (GRAYBILL, 1976) e a precisão (P%), obtida pelo teste de Qui-quadrado, conforme FREESE (1960).

$$MDP_{(\%)} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\hat{Y}_i - Y_i}{Y_i}\right) 100 \quad (14)$$

$$Bias = \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} \hat{Y}_i - \sum_{i=1}^{n} Y_i\right) \quad (15)$$

$$Bias_{(\%)} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \hat{Y}_i - \sum_{i=1}^{n} Y_i}{\sum_{i=1}^{n} Y_i} 100 \quad (16)$$

$$r_{Y\,\hat{Y}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Y_i \hat{Y}_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} Y_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} \hat{Y}_i\right)}{n}}{\sqrt{\left\{\left[\sum_{i=1}^{n} (Y_i - \bar{Y})^2\right]\left[\sum \left((\hat{Y}_i - \bar{Y})^2\right)\right]\right\}}} \quad (17)$$

$$S_{Y\,\hat{Y}_{(\%)}} = 100\sqrt{\bar{A}M\ Re\ s} \quad (18)$$

$$P_{\%} = \sqrt{\left[\frac{196^2}{X_n^2} \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i}\right)^2\right]} \quad (19)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 é apresentada estatística descritiva dos dados utilizados para o trabalho, a qual, levando em consideração os parâmetros da média, moda, desvio padrão, máximo e mínimo, para as variáveis selecionadas para estudo, estão apresentadas quanto aos seus valores relativos à idade do plantio (anos), altura total (m) e DAP (cm). Os valores observados para cada variável, levando em consideração os itens de descrição foram: média de 21 anos, com moda de 24 anos e desvio padrão de 8 anos, sendo a idade mínima de 7,5 anos e a máxima 29 anos. Para a altura, o valor médio mensurado foi de 28 metros, com moda de 34,9 metros, desvio padrão de 8,2 metros, sendo o menor valor aferido 12,4 metros e o maior 39,5 metros. Em relação ao DAP, o valor médio foi de 33,9 cm e a moda foi de 30,0 cm, assumindo um valor de desvio padrão igual a 13,3 cm, apresentando valor mínimo de 10,0 cm e máximo de 53,7 cm.

Tabela 3: Estatística descritiva gerais dos plantios de Pinus taeda em cada fazenda onde os dados foram coletados.

Parâmetro	Idade (anos)	h (m)	DAP (cm)
Média	21	28,0	33,9
Moda	24	34,9	30,0
Desvio padrão	8	8,2	13,3
Mínimo	7,5	12,4	10,0
Máximo	29,5	39,5	53,7
Contagem	-	24,6	28,2

Em que: Idade = é apresentada em anos; h = altura total (m); DAP = diâmetro à altura do peito com casca, a 1,3 m de altura (cm).

Fonte: Autoria própria (2023)

Os dados abrangeram uma variabilidade amostral significativa, tanto em idade como, consequentemente, em altura total e diâmetro, de forma a qualificar as análises posteriores e torná-las suficientemente abrangentes para o sistema de manejo que é adotado na região, com foco principal na produção de madeira serrada, com uso de desbastes, onde o primeiro, geralmente realizado entre o ano 8 ao 12, dependendo da qualidade do povoamento, gerando produção de material mais fino (maravalha, cavacos, etc.), um segundo desbaste gerador de toras finas já para serraria, realizado

geralmente entre os 16 e 20 anos e, o corte final, em geral realizado entre os 20 e 30 anos, gerando toras para serraria ou laminação como produto principal da floresta.

Na Tabela 4 são apresentadas as cinco classes em que os dados do estudo foram divididos, com os indivíduos pertencentes a cada classe de idade, seu respectivo DAP médio, altura média, volume real média e fator de forma para a classe.

Tabela 4: Valor médio das variáveis dendrométricas para cada classe de idade dos plantios de Pinus taeda em cada árvore estudada para a região de Irati-PR.

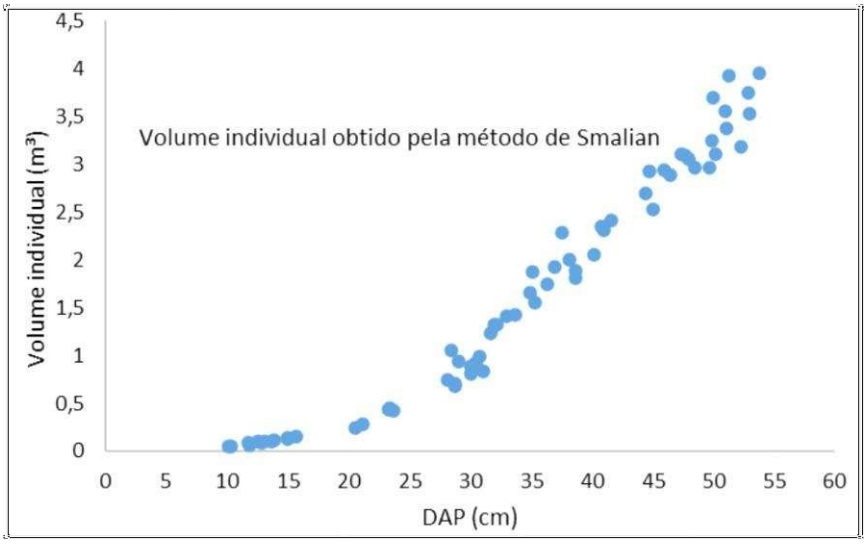
Classes de idade (anos)	n	DAP	Altura	Volume real	ff
< 8	11	13	14	0,0969	0,51
8 - 14,9	6	31	27	1,0077	0,47
15 - 21,9	3	32	33	1,3252	0,50
22 - 28,9	36	37	31	1,8442	0,49
> 29	9	51	36	3,4579	0,48
Soma / Média	65	32,8	28,2	1,55	0,49

Em que: n = Número de indivíduos; DAP = Diâmetro a Altura do Peito (cm); Altura total = Altura da árvore (m); Volume real = Volume calculado pelo método de Smalian; ff – Fator de Forma.

Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 4 apresenta o comportamento do volume individual com o aumento dos diâmetros. As estimativas de volume apresentaram um crescimento proporcional em relação ao DAP, sendo observado um padrão diferente nas árvores com diâmetro a altura do peito abaixo de 20 centímetros, com menores incrementos em volume.

Figura 4: Volume individual apresentados em relação ao DAP de cada árvore de Pinus taeda estudada, através da cubagem pelo Método de Smalian.



Fonte: Autoria própria (2023)

5.1 Modelos e fatores de forma analisados

A Tabela 5 apresenta os parâmetros ajustados dos modelos testados para as árvores estudadas. Pelos dados apresentados na tabela, temos um erro padrão residual variando de 7,87 a 18,43% sendo o valor mais baixo apresentado pelo modelo de Spurr. Em relação ao coeficiente de determinação, a variação dos valores é de 0,9781 a 0,9964 sendo o modelo com melhor desempenho o de Spurr. Para todos os modelos a hipótese nula não pode ser rejeitada, ou seja, houve diferenças nas estimativas por cada modelo. Dentre os modelos testados, o que apresentou melhor desempenho na estimativa foi o proposto por Spurr.

Tabela 5: Modelos volumétricos testados com os parâmetros observados para a escolha do acurado para o plantio de Pinus taeda.

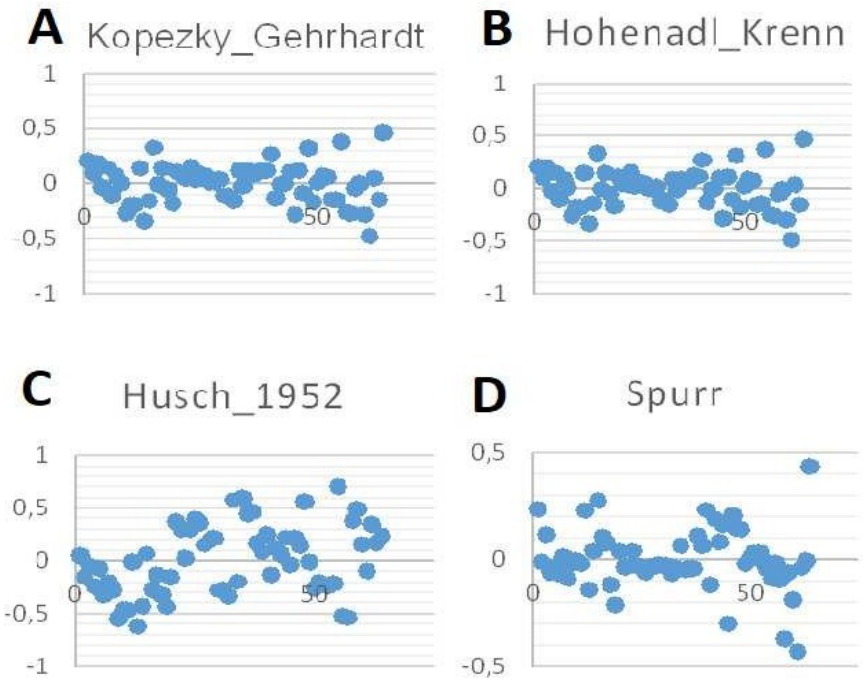
Modelo	Parâmetros			Syx%	R^2 aj	Pr (> |t|)
	β0	β1	β2			
Kopezky_Gehrhardt	-0,2083	0,001422		18,43	0,9781	< 2,2e-16
Hohenadl_Krenn	-0,1531	-0,003900	0,001481	18,55	0,9785	< 2,2e-16
Husch_1952	-9,2441	2,6913		13,57	0,9892	< 2,2e-16
Spurr	-10,1529	0,9985		7,87	0,9964	< 2,2e-16

Em que: β0; β1; β2 = Coeficientes da regressão; Syx% = Erro padrão da estimativa (m³); R^2 = Coeficiente de determinação; Pr = coeficiente significativo a 95% de probabilidade.

Fonte: Autoria própria (2023)

Para verificar a eficiência destes, foi realizada a análise gráfica dos resíduos em relação ao volume estimado com o volume observado para todos os modelos ajustados (Figura 5).

Figura 5: Resíduos dos modelos volumétricos analisados para estimar o volume das árvores estudadas: 5A – Modelo volumétrico de Kopezky e Gehrhardt. 5B – Modelo volumétrico de Hohenadl e Krenn. 5C – Modelo volumétrico de Husch (1952). 5D – Modelo volumétrico de Spurr.



Fonte: Autoria própria (2023)

O modelo de Spurr apresentou um bom desempenho. Isso era esperado, já que utiliza a variável combinada dap²h de duas variáveis utilizadas para o cálculo do volume. Em outros estudos, foi verificada uma elevada correlação entre essa variável e o volume. Meyer (2015) verificou uma correlação de 0,99 entre dap²h com o volume de *Nectandra megapotamica*. Silva e Carvalho (1984), estudando o volume numa floresta secundária no Pará, encontraram a alta correlação entre dap²h e volume

Os modelos de única entrada, no geral, não apresentaram bom desempenho na descrição da população amostral pelo fato de utilizarem apenas uma variável. Azevedo et al. (2011) discorrem sobre os baixos valores de R^2 e valores elevados de

S_{xy} dos modelos de Kopezky e Gehradt e de Hohenald e Krenn devidos a tendenciosidade desses modelos.

Outra forma de obter uma estimativa do volume é a utilização de fatores de forma. Na Tabela 6 verifica-se os resultados do erro padrão de estimativa comparativo entre os fatores de forma utilizados (0,48 e 0,51) e volume obtido Método da Altura relativa em relação ao volume real.

Tabela 6: Resultados da análise de desempenho para o plantio de Pinus taeda em relação aos métodos apresentados e os dados de cubagem para todas as árvores estudadas.

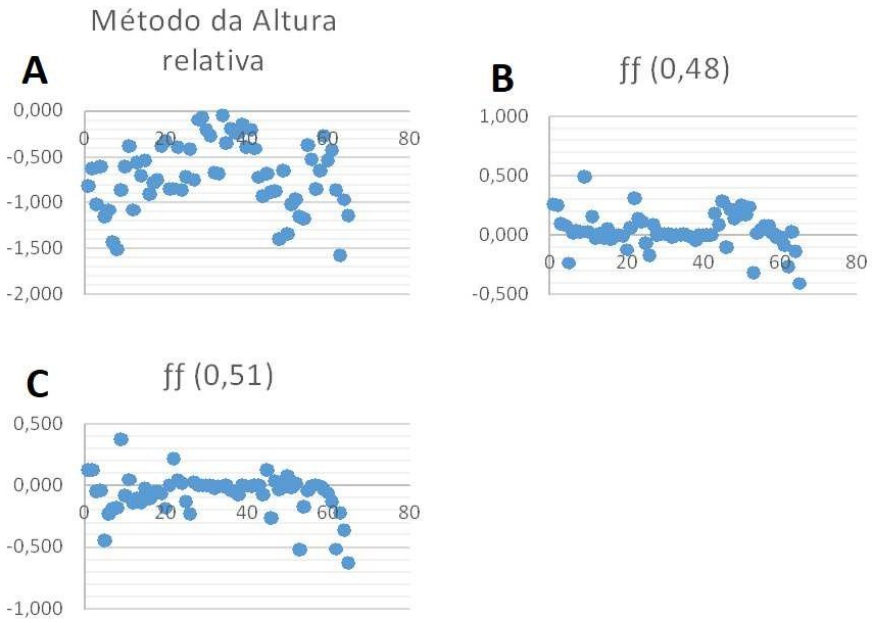
Método	Syx%
ff (0,48)	15,29
ff (0,51)	16,25
Volume pelo Método da Altura relativa	19,33

Em que: Syx% = Erro padrão da estimativa.

Fonte: Autoria própria (2023)

O erro padrão apresentado pelos métodos assemelham-se com os valores calculados para modelos de única entrada. Métodos de única entrada tendem a apresentar estatísticas não satisfatórias. Buscando entender melhor o comportamento dos métodos perante o critério estatístico analisado, foi feito a análise gráficas dos resíduos para os métodos estudados (Figura 6)

Figura 6: Resíduos dos modelos volumétricos analisados para estimar o volume das árvores estudadas: 5A – Volume calculado pelo Método da Altura Relativa. 5B – Volume calculado utilizando o fator de forma 0,48. 5C – Volume calculado utilizando o fator de forma 0,51.



Fonte: Autoria própria (2023)

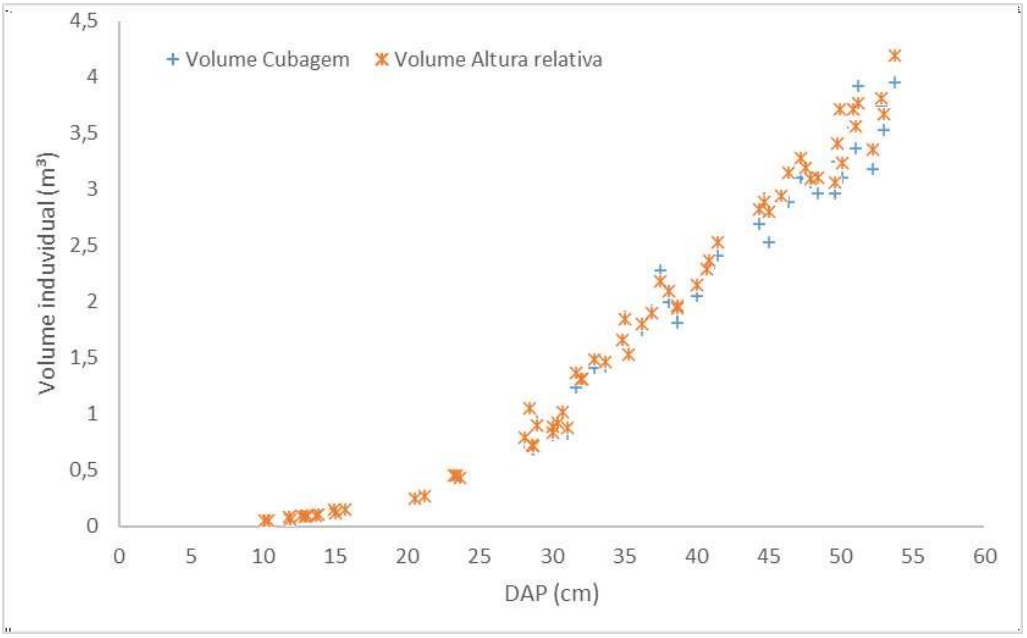
Os resultados calculados para os valores de erro padrão foram elevados, sendo o menor destes calculados para a estimativa calculada pelos fatores de forma 0,48 e 0,51 e o maior pelo método da altura relativa, cada um com os valores 15,29, 16,25 e 19,33 % respectivamente.

Azevedo et al. (2011) tratam como um dos fatores de tendenciosidade de modelos de simples entrada os valores altos calculados para S_{xy}, revelando a dificuldade de representar a população amostral.

5.2 – Volume pelo método da altura relativa e os erros de estimativas.

Na Figura 7 são apresentados os resultados do volume calculado pela cubagem rigorosa e o método da Altura Relativa, apresentados em relação ao DAP.

Figura 7: Resultados dos cálculos do volume pelo método da altura relativa e cubagem rigorosa, apresentados em relação ao DAP (Diâmetro a Altura do Peito) de cada árvore estudada de Pinus taeda.



Fonte: Autoria própria (2023)

Os valores resultantes do método testado, apresentam o mesmo comportamento que os valores obtidos para os volumes observados, porém de forma superestimada ao longo de todas as classes de DAP.

Este mesmo comportamento foi observado por Gama (2019) ao estudar árvores de *Khaya senegalensis* de 2,9 anos, obtendo valores superiores aos reais durante o estudo. O mesmo padrão foi relatado por Oliveira (2011) ao estudar a aplicação do método da altura relativa para seleção de materiais genéticos do gênero *Eucalyptus*.

A Tabela 7 apresenta o desvio padrão do volume e os erros mínimos para cada classe de idade e região da árvore utilizada para calcular o Coeficiente Angular da Reta (CAR).

Tabela 7: Desvio padrão e erros do volume (m^3) em cada sessão por classe de idade para cada árvore estudada de Pinus taeda.

Classes de idade (anos)	Sessão	Desvio Padrão do erro do volume	Erro médio do volume	Erro máximo do volume	Erro mínimo do volume
< 8	< 1,3	0,000509	-0,001073	-1,78E-04	-0,002065
< 8	1,3 - hr	0,005504	-0,007175	2,2E-05	-0,021046

< 8	hr - Ht	0,186757	-0,252533	-4,2E-02	-0,675048
8 - 14,9	< 1,3	0,003406	-0,004495	0,000701	-0,007681
8 - 14,9	1,3 - hr	0,034084	-0,108288	-0,070754	-0,156393
8 - 14,9	hr - Ht	0,226274	-0,443190	-0,181371	-0,753816
15 – 21,9	< 1,3	0,000791	-0,006814	-0,006095	-0,007661
15 – 21,9	1,3 - hr	0,06533	-0,143619	-0,080561	-0,211006
15 – 21,9	hr - Ht	0,201012	-0,609669	-0,381681	-0,761373
22 – 28,9	< 1,3	0,007665	-0,010211	-0,000400	-0,031330
22 – 28,9	1,3 - hr	0,116317	-0,155084	-0,012442	-0,433607
22 – 28,9	hr - Ht	0,277753	-0,590877	-0,130739	-1,215973
> 29	< 1,3	0,004724	-0,010852	-0,004914	-0,018141
> 29	1,3 - hr	0,123728	-0,304629	-0,047297	-0,434614
> 29	hr - Ht	0,172006	-0,741838	-0,565405	-1,125942

onde: hr: altura relativa; ht: altura total; * a unidade dos desvios e erros é m^3.

Fonte: Autoria própria (2023)

Os valores para desvio padrão apresentam características crescentes dentro da classe de idade, aumentando em relação à altura. Esse é um padrão que se repete ao longo das classes de idade e se repete para os erros médios, máximos e mínimos. A região com maiores valores em todas as classes de idade é a região entre a altura relativa das árvores e a altura total. Essa é a região onde fica a copa da árvore, possuindo assim mais dinamismo em relação às variáveis dendrométricas, fato devido aos pontos de inserção dos galhos.

5.3 – Comparativo entre os diâmetros medidos e estimado pelo método da altura relativa.

As 65 árvores deste estudo tiveram seu diâmetro em várias posições ao longo do fuste medidos e calculados pelo método testado. Em relação ao volume, o valor considerado como verdadeiro foi o calculado pela cubagem rigorosa e foi comparado com o método da altura relativa nas mesmas posições. Buscando organizar melhor a análise, as árvores foram divididas de acordo com a classe de idade para cada árvore amostra.

A análise de acurácia para os diâmetros e volume foram divididas em três regiões respectivamente, abaixo do DAP, entre DAP e altura relativa e entre esta e a altura total.

5.3.1 - Diâmetro abaixo do DAP

Os resultados obtidos após os cálculos para a região abaixo do DAP são apresentados para as cinco classes de idade na Tabela 8.

Tabela 8: Teste t para a sessão abaixo do DAP e para cada classe de idade para as árvores estudada de Pinus taeda.

Classe de idade (anos)	Método	Média (cm)	Variância (cm)	Desvio Padrão (cm)	N Obs.	Variância agrupada (cm)	Hip. ac.	GL	Stat t	P (T<=t) uni-caudal	t crítico uni-caudal	P (T<=t) bi-caudal	t crítico bi-caudal
< 8	Diâmetro medido	15,3589	5,4907	2,3074	33	5,2451	0	64	-0,6826	0,2487	1,6690	0,4973	1,9977
	D. est (Altura Relativa)	15,7438	4,9996	2,2018	33								
8 - 14,9	Diâmetro medido	37,2692	11,4124	3,2830	18	11,3366	0	34	0,5093	0,3069	1,6909	0,6138	2,0322
	D. est (Altura Relativa)	36,6976	11,2608	3,2612	18								
15 - 21,9	Diâmetro medido	36,4565	2,4881	1,4871	9	3,3513	0	16	0,8354	0,2079	1,7459	0,4158	2,1199
	D. est (Altura Relativa)	35,7356	4,2145	1,9355	9								
22 - 28,9	Diâmetro medido	42,8231	141,4514	11,8381	108	139,7191	0	214	0,5844	0,2798	1,6520	0,5596	1,9711
	D. est (Altura Relativa)	41,8831	137,9868	11,6923	108								
> 29	Diâmetro medido	57,6020	14,8723	3,7916	30	15,1972	0	58	0,7091	0,2406	1,6716	0,4811	2,0017
	D. est (Altura Relativa)	56,8883	15,5220	3,8736	30								

Onde: Diâmetro medido: diâmetro real medido; D est.: diâmetro estimado pelo método da altura relativa; Hip. ac.: hipótese aceita; GL: graus de liberdade; Stat. t: valor calculado pela estatística t; P (T<=t) uni-caudal, t crítico uni-caudal, P (T<=t) bi-caudal e t crítico bi-caudal: parâmetros estatísticos calculados.

Fonte: Autoria própria (2023)

De acordo com o resultado do teste t para a região abaixo do DAP para todas as árvores definidas pelas classes de idade, observa-se que não houve diferenças estatísticas significativas entre os métodos utilizados para comparação, diâmetro medido e altura relativa.

Tratando-se dos critérios estatísticos apresentados na Tabela 9, os menores valores de desvio médio percentual ($MDP_{\%}$), são apresentados para as árvores da classe de idade 15 – 21, seguida pelas classes > 29, 8 – 14,9, < 8 e 22 – 28,9, apresentando os respectivos valores: 4,93, 6,77, 8,95, 14,55 e 28,11%.

Tabela 9: Critérios estatísticos da análise do diâmetro para a sessão abaixo de 1,3 m em cada classe de idade para as árvores estudadas de Pinus taeda.

Idade	MDP%	Bias (cm)	Bias %	R (YŶ)	R (YŶ) %	S (YŶ)	S (YŶ) %	Teste F
< 8	14,55	12,7	2,4	0,9874	1,26	0,3767	37,67	1
8 - 14,9	8,95	-10,29	-1,5	0,9784	2,16	0,7147	71,47	1
15 - 21,9	4,93	-6,49	-2,0	0,9476	5,24	0,5385	53,85	1
22 - 28,9	28,11	-101,52	-2,2	0,9961	0,39	1,0372	103,72	1
> 29	6,77	-21,41	-1,3	0,9814	1,86	0,7690	76,90	1

Em que: MDP % = Desvio Médio Percentual; Bias = Viés estatístico; $R_{Y\hat{Y}}$ = Correlação Linear; $S_{Y\hat{Y}}$ = Erro Padrão da Estimativa.

Fonte: Autoria própria (2023)

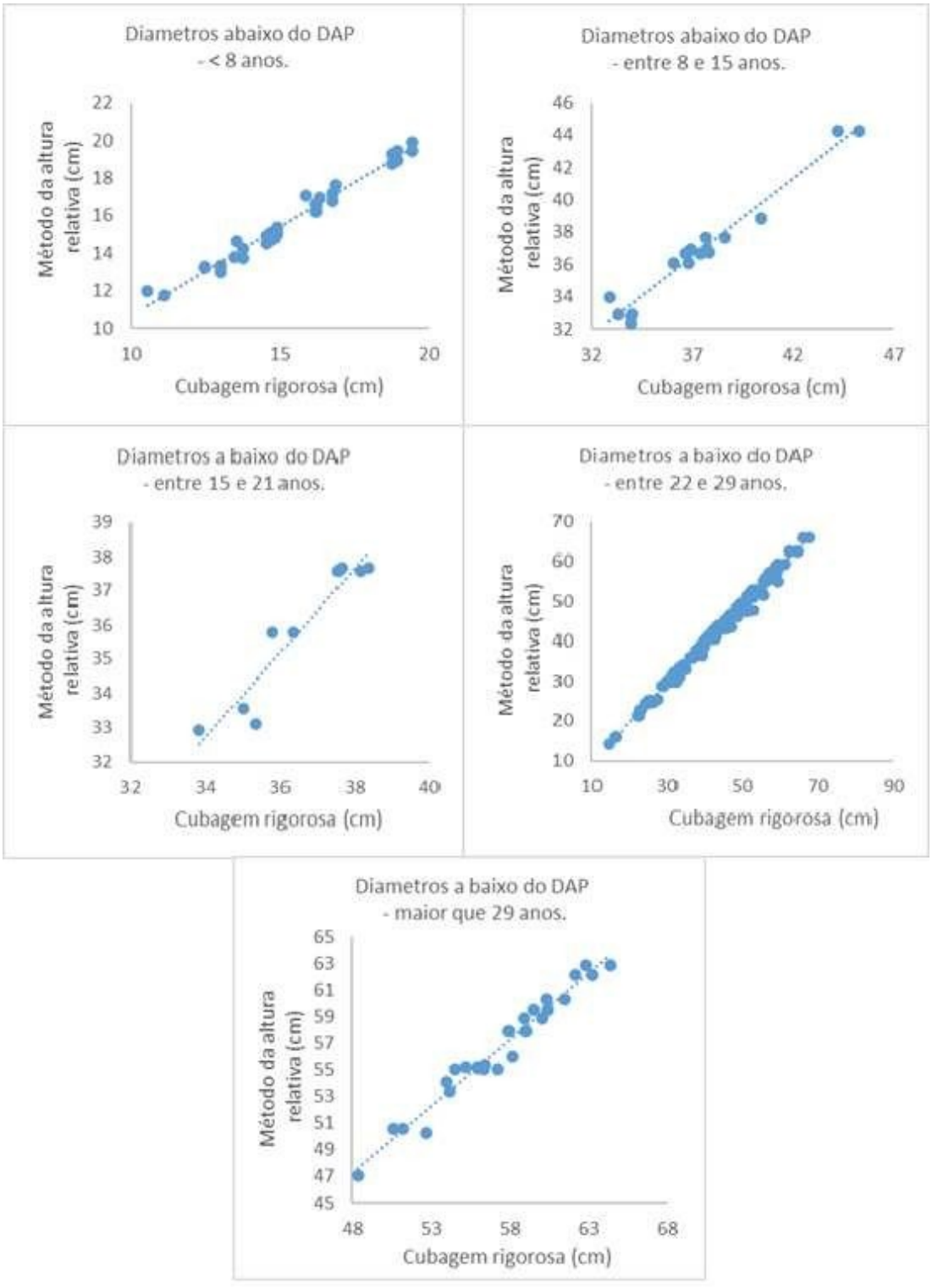
Para os Bias (%), os menores valores apresentados foram para a classe > 29, seguidas pelas classes de idade 8 – 14,9; 15 – 21,9; 22 - 28,9 e < 8, apresentando os seguintes valores: -1,3, -1,5, -2, -2,2, -2,4%.

Referente aos valores de correlação linear ($r_{Y\hat{Y}}$) %, os menores valores apresentados foram para a classe de idade 22 – 28,9, seguida pelas classes de idade < 8, > 29, 8 – 14,9, 15 – 21,9, apresentando os seguintes valores 0,39, 1,26, 1,86, 2,16, 5,24%, respectivamente.

Tratando-se do erro padrão da estimativa ($s_{Y\hat{Y}}$)%, os menores valores apresentados foram para a classe de idade < 8, seguidas pelas classes de idade 15 – 21,9; 8 – 14,9; > 29; 22 – 28,9, apresentando os seguintes valores 37,67, 53,85, 71, 47, 76,90, 103,72%, respectivamente. Os resultados dos testes F para todas as classes de idade, não apresentaram diferença significativa.

A Figura 8 apresenta graficamente os resíduos entre os métodos testados. A classe de idade que apresentou menor resíduo foi a classe de idade 22 – 28,9, seguida pelas classes de idade < 8; 8 – 14,9; > 29 e 15 – 21,9, respectivamente.

Figura 8: Resultados dos cálculos pelo método da altura relativa e cubagem rigorosa, apresentados em relação ao DAP de cada arvore estudada de Pinus taeda.



Fonte: Autoria própria (2023)

5.3.2 - Diâmetro entre DAP e hr

De acordo com o resultado do teste t para a região entre o DAP e a hr, para todas as árvores definidas pelas classes de idade (Tabela 10), observa-se que não houve diferenças estatísticas significativas entre os métodos comparados de diâmetro medido e altura relativa.

Tabela 10: Teste t para a sessão entre DAP e hr para cada classe de idade para as árvores estudada de Pinus taeda.

Classe de idade (anos)	Método	Média (cm)	Variância (cm)	Desvio Padrão (cm)	N. Obs.	Variância agrupada (cm)	Hip. ac.	GL	Stat t	P (T<=t) uni-caudal	t crítico uni-caudal	P (T<=t) bi-caudal	t crítico bi-caudal
< 8	Diâmetro medido	11,8889	4,0590	1,9894	40	4,0161	0	78	0,1639	0,4351	1,6646	0,8703	1,9908
	D. est (Hr)	11,8154	3,9732	1,9682	40								
8 - 14,9	Diâmetro medido	27,1862	16,5234	4,0195	45	16,7982	0	88	0,7299	0,2337	1,6624	0,4674	1,9873
	D. est (Hr)	26,5555	17,0730	4,0858	45								
15 - 21,9	Diâmetro medido	28,4753	8,5954	2,8749	26	9,0023	0	50	1,1137	0,1354	1,6759	0,2707	2,0086
	D. est (Hr)	27,5485	9,4091	3,0079	26								
22 - 28,9	Diâmetro medido	32,5940	75,8343	8,6940	305	73,0665	0	608	0,5847	0,2795	1,6474	0,5590	1,9639
	D. est (Hr)	32,1893	70,2987	8,3707	305								
> 29	Diâmetro medido	42,5990	40,6091	6,3421	105	36,2158	0	208	0,5402	0,2948	1,6522	0,5896	1,9714
	D. est (Hr)	42,1503	31,8226	5,6142	105								

Onde: Diâmetro medido: diâmetro real medido; D est.: diâmetro estimado pelo método da altura relativa; Hip. ac.: hipótese aceita; GL: graus de liberdade; Stat. t: valor calculado pela estatística t; P (T<=t) uni-caudal, t crítico uni-caudal, P (T<=t) bi-caudal e t crítico bi-caudal: parâmetros estatísticos calculados.

Fonte: Autoria própria (2023)

Conforme os critérios estatísticos apresentados na Tabela 11, os menores valores de Desvio médio percentual ($MDP_{\%}$) são apresentados para as árvores da classe de idade 15 – 21,9 anos, seguida pelas classes > 29; 8 – 14,9; < 8 e 22 – 28,9 anos, apresentando os respectivos valores: 10,81, 14,22, 15,14, 16,70 e 26,52%.

Para os Bias (%), os menores valores apresentados foram para a classe < 8, seguidas pelas classes de idade > 29; 22 – 28,9; 8 – 14,9 e 15 – 21,9, apresentando os seguintes valores respectivos: 0,6, -1,1, -1,3, -2,3, -3,4%.

Referente à correlação linear ($r_{Y\hat{Y}}$) %, os menores valores apresentados foram para a classe de idade 22 – 28,9, seguida pelas classes de idade < 8; > 29; 8 – 14,9 e 15 – 21,9, apresentando os seguintes valores 0,39, 1,26, 1,86, 2,16, 5,24%, respectivamente. Os resultados dos testes T para todas as classes de idade, não apresentaram diferença significativa.

Tabela 11: Critérios estatísticos da análise do diâmetro para a sessão entre DAP e a altura relativa em cada por classe de idade para as árvores estudadas de Pinus taeda.

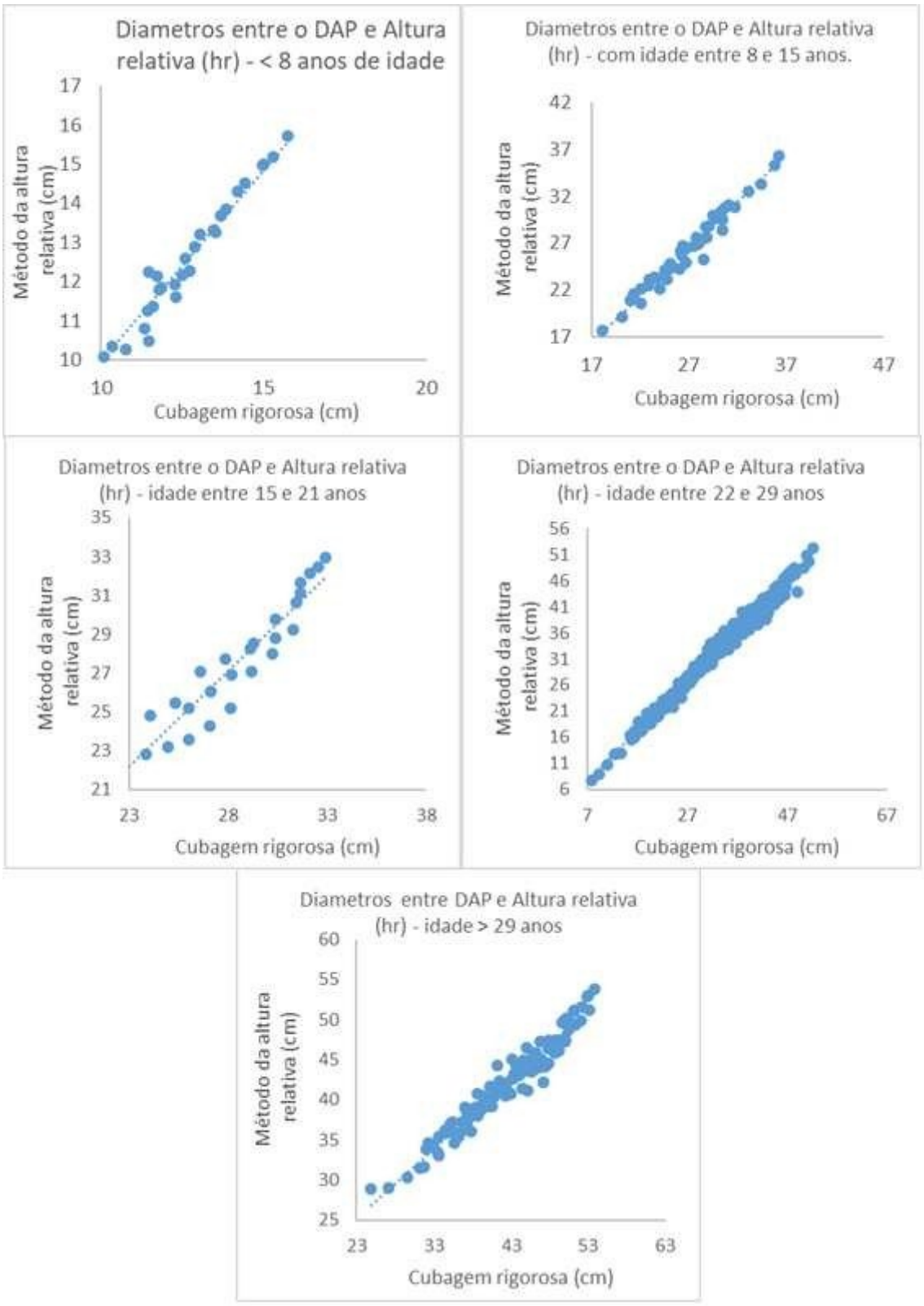
Idade	MDP%	Bias (cm)	Bias %	R (YŶ)	R (YŶ) %	S (YŶ)	S (YŶ) %	Teste F
< 8	16,70	2,94	0,6	0,9893	1,07	0,3680	36,80	1
8 - 14,9	15,14	-28,38	-2,3	0,9834	1,66	0,7581	75,81	1
15-21,9	10,81	-24,10	-3,4	0,9378	6,22	1,0386	58,03	1
22-28,9	26,52	-123,43	-1,3	0,9926	0,74	1,0173	101,73	1
> 29	14,22	-47,11	-1,1	0,9748	2,52	1,4293	142,93	1

Em que: DAP = Diâmetro a Altura do Peito; hr = Altura relativa; MDP = Desvio Médio Percentual; Bias = Viés estatístico; $R_{Y\hat{Y}}$ = Correlação Linear; $S_{Y\hat{Y}}$ = Erro Padrão da Estimativa.

Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 9 mostra graficamente os resíduos entre os métodos testados. A classe de idade que apresentou menor resíduo foi a classe de idade 22 – 28,9, seguida pelas classes de idade < 8; 8 – 14,9; 15 – 21,9 e > 29, respectivamente.

Figura 9: Resultados dos cálculos pelo método da altura relativa e cubagem rigorosa, apresentados em relação ao DAP de cada árvore estudada de Pinus taeda.



Fonte: Autoria própria (2023)

5.3.3 - Diâmetro entre hr e ht

A Tabela 12 apresenta o resultado do teste t para a região entre o hr e ht para as cinco classes de idade. Verificou-se que não houve diferença estatística entre os métodos usados, sendo aceita a hipótese de nulidade de diferenças (H0), dados também comprovados pelos demais parâmetros estatísticos presentes na tabela.

Tabela 12: Teste t para a sessão entre hr e ht para cada classe de idade para as árvores estudadas de Pinus taeda.

Classe de idade (anos)	Método	Média (cm)	Variância (cm)	Desvio Padrão (cm)	N. Obs.	Variância agrupada (cm)	Hip. Ac.	GL	Stat t	P (T<=t) uni-caudal	t crítico uni-caudal	P(T<=t) bi-caudal	t crítico bi-caudal
< 8	Diâmetro medido	5,3896	7,3642	2,6827	44	8,1187	0	86	-0,2261	0,4108	1,6628	0,8216	1,9879
	D. est (Hr)	5,5269	8,8733	2,9448	44								
8 - 14,9	Diâmetro medido	13,5624	36,9453	6,0018	40	38,8793	0	78	0,7391	0,2310	1,6646	0,4621	1,9908
	D. est (Hr)	12,5319	40,8133	6,3082	40								
15 - 21,9	Diâmetro medido	16,5610	35,1155	5,8011	24	40,3968	0	46	0,7544	0,2272	1,6787	0,4544	2,0129
	D. est (Hr)	15,1768	45,6781	6,6163	24								
22 - 28,9	Diâmetro medido	17,5031	76,1977	8,7125	262	78,7244	0	522	2,2193	0,0134	1,6478	0,0269	1,9645
	D. est (Hr)	15,7827	81,2511	8,9967	262								
> 29	Diâmetro medido	21,7713	81,7864	8,9854	78	95,0652	0	154	1,2631	0,1042	1,6548	0,2085	1,9755
	D. est (Hr)	19,7993	108,3439	10,3419	78								

Onde: Diâmetro medido: diâmetro real medido; D est.: diâmetro estimado pelo método da altura relativa; Hip. ac.: hipótese aceita; GL: graus de liberdade; Stat. t: valor calculado pela estatística t; P (T<=t) uni-caudal, t crítico uni-caudal, P (T<=t) bi-caudal e t crítico bi-caudal: parâmetros estatísticos calculados.

Fonte: Autoria própria (2023)

Tratando-se dos critérios estatísticos apresentados na Tabela 13, os menores valores de desvio médio percentual ($MDP_{\%}$), são apresentados para as árvores da classe de idade 15 – 21,9, seguida pelas classes 8 – 14,9; > 29; < 8 e 22 – 28,9, apresentando os respectivos valores: 41,25, 49,30, 50,57,51,62 e 56,37%

Tabela 13: Critérios estatísticos da análise do diâmetro para a sessão entre altura relativa e altura total em cada por classe de idade para as árvores estudadas de Pinus taeda.

Idade (anos)	MDP%	Bias (cm)	Bias %	R (YŶ)	R (YŶ) %	S (YŶ)	S (YŶ) %	Teste F
< 8	51,62	-6,04	-2,5	0,9442	5,58	0,9040	90,40	1
8 - 14,9	49,30	-41,22	-8,2	0,9704	2,96	1,4871	148,71	1
15 - 21,9	41,25	-33,22	-9,1	0,9685	3,15	1,5087	123,99	1
22 - 28,9	56,37	-450,75	-10,9	0,01993	98,01	2,6409	264,09	1
> 29	50,57	-153,82	-10,0	0,008554	99,14	0,1123	11,23	1

Em que: hr = Altura relativa; ht = Altura total; MDP = Desvio Médio Percentual; Bias = Viés estatístico; $r_{Y\hat{Y}}$ = Correlação Linear; $S_{Y\hat{Y}}$ = Erro Padrão da Estimativa.

Fonte: Autoria própria (2023)

Para os Bias (%), os menores valores apresentados foram para a classe < 8, seguidas pelas classes de idade 15 – 21,9; 8 – 14,9; >29 e 22 -28,9, apresentando os seguintes valores: -2,5, -8,2, -9,1, -10,0, -10,9%, respectivamente.

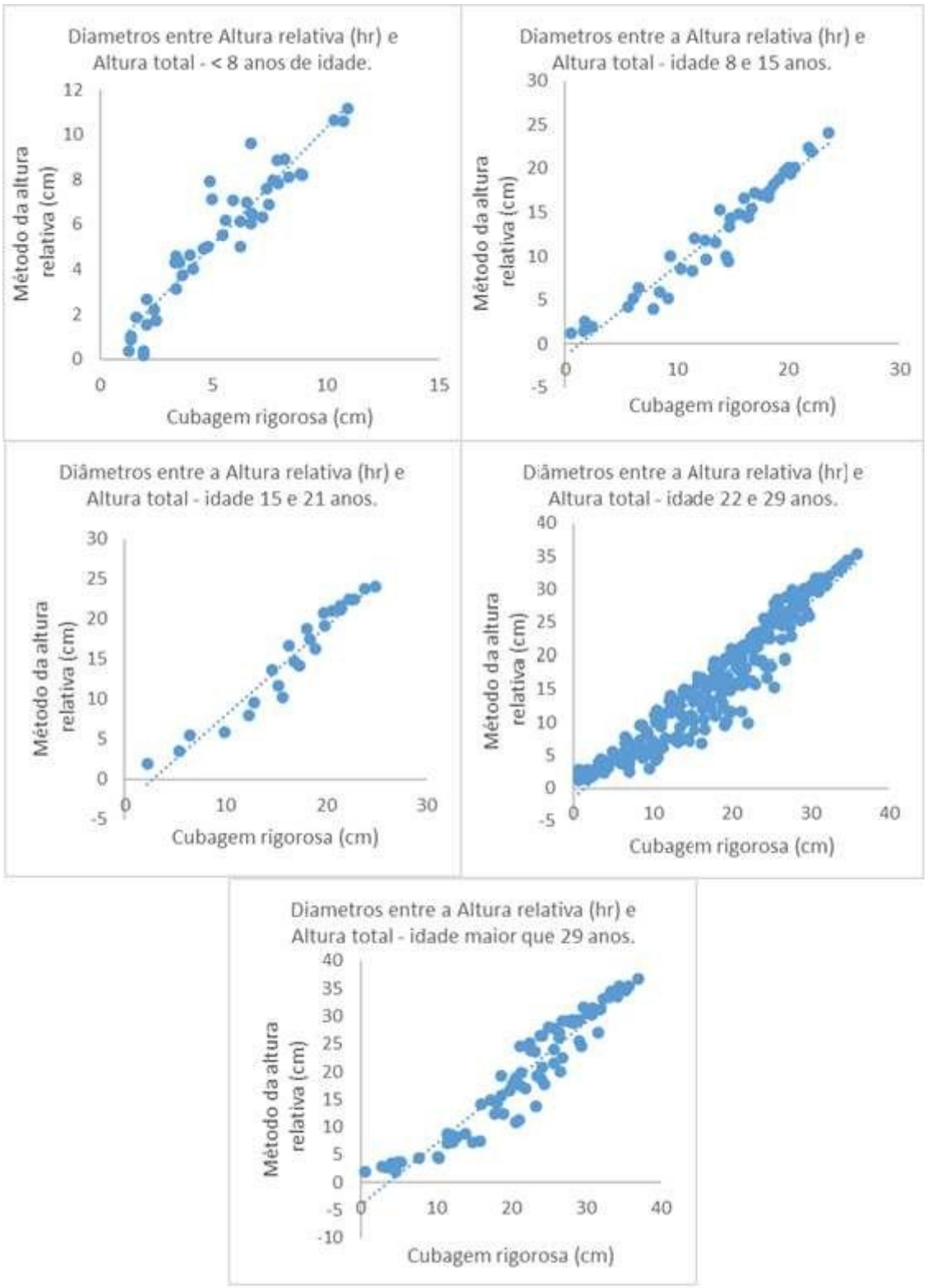
Referente aos valores de correlação linear ($r_{Y\hat{Y}}$) %, os menores valores apresentados foram para a classe de idade 8 – 14,9, seguida pelas classes de idade 15 – 21,9; < 8; 22 – 28,9, > 29, apresentando os seguintes valores, 2,96; 3,15; 5,58; 98,01 e 99,14%, respectivamente.

Tratando-se do erro padrão da estimativa ($s_{Y\hat{Y}}$)%, os menores valores apresentados foram para a classe de idade > 29, seguidas pelas classes de idade < 8; 15 – 21,9; 8 – 14,9; 22 – 28,9, apresentando os seguintes valores 11,23; 90,40; 123,99; 148,71 e 264,09%.

Os resultados dos testes t para todas as classes de idade, não apresentaram diferença significativa.

A Figura 10 apresenta graficamente os resíduos entre os métodos testados. A classe de idade que apresentou o menor resíduo foi a classe de idade 8 – 14,9; seguida pelas classes de idade 15 – 21,9; > 29; < 8; 22 – 28,9.

Figura 10: Resultados dos cálculos do volume pelo método da altura relativa e cubagem rigorosa, apresentados em relação ao DAP de cada arvore estudada de Pinus taeda.



Fonte: Autoria própria (2023)

De acordo com os parâmetros utilizados para analisar o desempenho entre os métodos testados em relação ao diâmetro, foram obtidos resultados com diferenças não significativas para as três regiões das árvores estudadas, exceto para as classes de idade 8 – 14,9, 15 – 21,9, 22 – 28,9 e > 29. Esta redução de acurácia também foi observada por Gama (2019), porém com dados mais uniformes, ou seja, com menores variâncias.

A seção abaixo do DAP foi a que apresentou os melhores resultados, seguida pela região entre DAP e Altura Relativa e a seção entre Altura relativa e Altura total.

Os resultados apresentados para as regiões estudadas estão de acordo com os valores apresentados por Andrade e Leite (2001) ao estudar a aplicação do método da altura relativa para descrever o perfil do tronco de árvores de eucalipto.

Gama (2019), ao estudar a aplicação do método da altura relativa em povoamento de *Khaya senegalensis* com 2,9 anos, apresentou resultados semelhantes, com o melhor desempenho obtido para a região entre DAP e Altura total, Abaixo do DAP e entre a Altura relativa e Altura total.

5.3.4 - Volume abaixo do DAP

A Tabela 14 apresenta o resultado do teste t para a região abaixo do DAP para as cinco classes de idade.

Tabela 14: Teste t para volume da sessão abaixo do dap para cada classe de idade para as árvores estudadas de Pinus taeda.

Classe de idade (anos)	Método	Média	Variância	Desvio Padrão	Nº obs.	Variância agrupada	Hip. ac.	GL	Stat t	P (T<=t) uni-caudal	t crítico uni-caudal	P (T<=t) bi-caudal	t crítico bi-caudal
< 8	Diâmetro medido	0,007236	0,00001362	0,003633778	33	0,00001416	0	64	-0,40	0,35	1,67	0,69	2,00
	D. est (Hr)	0,007604	0,00001471	0,000239947	33								
8 - 14,9	Diâmetro medido	0,04248	0,0003784	0,018904588	18	0,0003698	0	34	0,18	0,43	1,69	0,86	2,03
	D. est (Hr)	0,04134	0,0003612	0,018469993	18								
15 - 21,9	Diâmetro medido	0,04176	0,0003584	0,017848212	9	0,0003408	0	16	0,20	0,42	1,75	0,84	2,12
	D. est (Hr)	0,04000	0,0003232	0,016950861	9								
22 - 28,9	Diâmetro medido	0,06003	0,001651	0,040442057	108	0,001576	0	214	0,50	0,31	1,65	0,62	1,97
	D. est (Hr)	0,05735	0,001502	0,038572039	108								
> 29	Diâmetro medido	0,1042	0,002144	0,045524183	30	0,002112	0	58	0,20	0,42	1,67	0,85	2,00
	D. est (Hr)	0,1019	0,002080	0,044838196	30								

Diâmetro medido: diâmetro real medido; D est.: diâmetro estimado pelo método da altura relativa; Hip. ac.: hipótese aceita; GL: graus de liberdade; Stat. t: valor calculado pela estatística t; P (T<=t) uni-caudal, t crítico uni-caudal, P (T<=t) bi-caudal e t crítico bi-caudal: parâmetros estatísticos calculados.

Fonte: Autoria própria (2023)

Tratando dos critérios estatísticos na Tabela 15, os menores valores de Desvio médio percentual ($MDP_{\%}$), são apresentados para as árvores da classe de idade 15 – 219, seguida pelas classes > 29, 8 – 14,9, < 8 e 22 – 28,9, apresentando os respectivos valores: 43,57, 44,35, 45,73, 50,00 e 70,51%.

Tabela 15: Critérios estatísticos da análise do volume para a sessão abaixo de 1,3 em cada por classe de idade para as árvores estudada de Pinus taeda.

Idade	MDP%	Bias (cm)	Bias %	R (YŶ)	R (YŶ) %	S (YŶ)	S (YŶ) %	Teste F
< 8	50,01	-0,01217	-5,0	0,9986	0,14	0,0001950	0,020	1
8 - 14,9	45,73	-0,02060	-2,8	0,9981	0,19	0,001242	0,12	1
15 - 21,9	43,57	-0,01587	-4,4	0,9993	0,070	0,000768	0,080	1
22 - 28,9	70,51	-0,2894	-4,7	0,2102	78,98	0,001915	0,19	1
> 29	44,35	-0,06949	-2,3	0,9995	0,050	0,001874	0,19	1

Em que: < 1,3 = mensurações abaixo de 1,3 metros de altura na árvore; MDP = Desvio Médio Percentual; Bias = Viés estatístico; $r_{Y\,\hat{Y}}$ = Correlação Linear; $S_{Y\,\hat{Y}}$ = Erro Padrão da Estimativa; Teste F = Teste F aplicado para a variância dos dados.

Fonte: Autoria própria (2023)

Para os Bias (%), os menores valores apresentados foram para a classe >29, seguidas pelas classes de idade 15 – 21,9, 8 – 14,9, 15 – 21,9, 22 -28,9, e < 8 apresentando os seguintes valores: 2,3, 2,8, 4,4, 4,7, 5,0%.

Referente aos valores de correlação linear ($r_{Y\,\hat{Y}}$) %, os menores valores apresentados foram para a classe de idade > 29, seguida pelas classes de idade 15 – 21,9, < 8, 8 – 14,9 e 22 – 28,9, apresentando os seguintes valores 0,050, 0,070, 0,14, 0,19 e 78,98%

Tratando-se do erro padrão da estimativa ($s_{Y\,\hat{Y}}$)%, os menores valores apresentados foram para a classe de idade < 8, seguidas palas classes de idade 15 – 21,9, 8 – 14,9, 22 – 28,9, e > 29, apresentando os seguintes valores 0,020, 0,080, 0,12, 0,19, 0,19%. Os resultados dos testes t para todas as classes de idade, não apresentaram diferença significativa.

5.3.5 - Volume entre DAP e Altura relativa

A Tabela 16 apresenta o resultado do teste t para a região entre o DAP e hr para as cinco classes de idade. Para esta secção, também não foram detectadas diferenças estatísticas significativas entre os métodos de determinação de volume testados.

Tabela 16: Teste t para a sessão entre dap e hr para cada classe de idade para as árvores estudada de Pinus taeda.

Classe de idade	Método	Média	Variância	Nº Obs.	Desvio Padrão	Variância agrupada	Hip. ac.	GL	Stat t	P(T<=t) uni-caudal	t crítico uni-caudal	P(T<=t) bi-caudal	t crítico bi-caudal
< 8	Diâmetro medido	0,01697	0,00005443	40	0,007285	0,00005310	0	78	0,52	0,30	1,66	0,61	1,99
	D. est (Hr)	0,01612	0,00005176	40	0,007104								
8 - 14,9	Diâmetro medido	0,1071	0,001276	45	0,03532	0,001202	0	88	1,70	0,05	1,66	0,09	1,99
	D. est (Hr)	0,09463	0,001128	45	0,03321								
15 - 21,9	Diâmetro medido	0,1186	0,0008747	26	0,02900	0,0008077	0	50	1,83	0,04	1,68	0,07	2,01
	D. est (Hr)	0,1041	0,0007408	26	0,02669								
22 - 28,9	Diâmetro medido	0,1657	0,007311	305	0,08536	0,006621	0	608	2,27	0,01	1,65	0,02	1,96
	D. est (Hr)	0,1507	0,005931	305	0,07689								
> 29	Diâmetro medido	0,2761	0,005846	105	0,07609	0,005466	0	208	2,70	0,00	1,65	0,01	1,97
	D. est (Hr)	0,2485	0,005086	105	0,07098								

Diâmetro medido: diâmetro real medido; D est.: diâmetro estimado pelo método da altura relativa; Hip. ac.: hipótese aceita; GL: graus de liberdade; Stat. t: valor calculado pela estatística t; P (T<=t) uni-caudal, t crítico uni-caudal, P (T<=t) bi-caudal e t crítico bi-caudal: parâmetros estatísticos calculados.

Fonte: Autoria própria (2023)

A avaliação dos critérios estatísticos é apresentada na Tabela 17. Os menores valores de Desvio médio percentual ($MDP_{\%}$), são apresentados para as árvores da classe de idade 15 – 21,9, seguida pelas classes > 29, 8 – 14,9, < 8 e 22 – 28,9, apresentando os respectivos valores: 27,65, 30,12, 37,32, 43,56, 56,64%.

Tabela 17: Critérios estatísticos da análise do volume para a sessão entre DAP e altura relativa em cada por classe de idade para as árvores estudadas de Pinus taeda.

Idade	MDP %	Bias (cm)	Bias %	R (YŶ)	R (YŶ) %	S (YŶ)	S (YŶ) %	Teste F
< 8	43,56	-0,03362	-5,0	0,9893	1,07	0,001063	0,11	1
8 - 14,9	37,32	-0,5602	-11,6	0,9852	1,48	0,006196	0,62	1
15 - 21,9	27,65	-0,3754	-78,1	0,9582	4,18	0,008638	0,86	1
22 - 28,9	56,64	-4,5706	-9,9	0,9929	0,71	0,01021	1,02	1
> 29	30,12	-2,8968	-10,0	0,9775	2,25	0,01513	1,51	1

Em que: DAP = Diâmetro a Altura do Peito; hr = Altura Relativa; MDP = Desvio Médio Percentual; Bias = Viés estatístico; $r_{Y\hat{Y}}$ = Correlação Linear; $S_{Y\hat{Y}}$ = Erro Padrão da Estimativa. Teste F = Teste F aplicado par a variância dos dados.

Fonte: Autoria própria (2023)

Para os Bias (%), os menores valores apresentados foram para a classe < 8, seguidas pelas classes de idade 22 -28,9, > 29, 8 – 14,9, e 15 – 21,9, apresentando os respectivos valores: 5, 9,9, 10, 11,6, 78,1%.

Referente aos valores de correlação linear ($r_{Y\hat{Y}}$) %, os menores valores apresentados foram para a classe de idade 22 – 28,9, seguida pelas classes de idade < 8; 8 – 14,9; > 29 e 15 – 21,9, apresentando os seguintes valores 0,71; 1,07; 1,48; 2,25 e 4,18%

Tratando-se do erro padrão da estimativa ($s_{Y\hat{Y}}$)%, os menores valores apresentados foram para a classe de idade < 8, seguidas pelas classes de idade < 8 – 14,9; 15 – 21,9; 22 – 28,9 e > 29, apresentando os respectivos valores 0,11; 0,62; 0,86; 1,02 e 1,51%. Os resultados dos testes t para todas as classes de idade, não apresentaram diferença significativa.

5.3.6 - Volume entre Altura relativa e Altura total

A Tabela 18 apresenta o resultado do teste t para a região entre o hr e ht para as cinco classes de idade.

Tabela 18: Teste t para a sessão entre hr e ht para cada classe de idade para as árvores estudadas de Pinus taeda.

Classe de idade	Método	Média	Variância	Nº Obs.	Desvio Padrão	Variância agrupada	Hip. ac.	GL	Stat t	P(T<=t) uni-caudal	t crítico uni-caudal	P(T<=t) bi-caudal	t crítico bi-caudal
< 8	Diâmetro medido	0,06821	0,01856	44	0,1347	0,009289	0	86	3,12	0,00	1,66	0,00	1,99
	D. est (Hr)	0,004141	0,00001566	44	0,003912								
8 - 14,9	Diâmetro medido	0,09497	0,01661	40	0,1273	0,008567	0	78	3,33	0,00	1,66	0,00	1,99
	D. est (Hr)	0,02609	0,0005216	40	0,02255								
15 - 21,9	Diâmetro medido	0,1166	0,02212	24	0,1456	0,01148	0	46	2,54	0,01	1,68	0,01	2,01
	D. est (Hr)	0,03787	0,0008453	24	0,02846								
22 - 28,9	Diâmetro medido	0,1270	0,01668	262	0,1289	0,009359	0	522	9,70	0,00	1,65	0,00	1,96
	D. est (Hr)	0,04502	0,002033	262	0,04500								
> 29	Diâmetro medido	0,1712	0,01244	78	0,1108	0,007934	0	154	7,20	0,00	1,65	0,00	1,98
	D. est (Hr)	0,06846	0,003430	78	0,05819								

Diâmetro medido: diâmetro real medido; D est.: diâmetro estimado pelo método da altura relativa; Hip. ac.: hipótese aceita; GL: graus de liberdade; Stat. t: valor calculado pela estatística t; P (T<=t) uni-caudal, t crítico uni-caudal, P (T<=t) bi-caudal e t crítico bi-caudal: parâmetros estatísticos calculados

Fonte: Autoria própria (2023)

A Tabela 19 apresenta os critérios estatísticos avaliados. Os menores valores de Desvio médio percentual ($MDP_{\%}$), são apresentados para as árvores da classe de idade 15 – 21,9, seguida pelas classes > 29; 22 – 28,9; < 8; 8 – 14,9 e, apresentando os respectivos valores: 27,65; 149,47; 233,01; 277,87 e 374,33%

Tabela 19: Critérios estatísticos da análise do volume para a sessão entre altura relativa e altura total em cada por classe de idade para as árvores estudadas de Pinus taeda.

Idade	MDP%	Bias (cm)	Bias %	R (YŶ)	R (YŶ) %	S (YŶ)	S (YŶ) %	F
< 8	277,87	-2,8190	-1547	-0,4197	0,0036	0,003634	0,36	1
8 - 14,9	374,33	-2,7550	-264	-0,2289	122,89	0,1271	12,71	1
15 - 21,9	27,65	-0,3754	-78,1	0,9582	4,18	0,008638	0,86	1
22 - 28,9	233,01	-21,4900	-182,2	0,01993	98,01	0,1294	12,94	1
> 29	149,47	-8,0115	-150	0,008554	99,14	0,1123	11,23	1

Em que: hr = Altura Relativa; ht = Altura total; MDP = Desvio Médio Percentual; Bias = Viés estatístico; $r_{Y\hat{Y}}$ = Correlação Linear; $S_{Y\hat{Y}}$ = Erro Padrão da Estimativa.

Fonte: Autoria própria (2023)

Para os Bias (%), os menores valores apresentados foram para a classe 15 – 21,9, seguidas pelas classes de idade >29; 22 - 28,9; 8 – 14,9; < 8 e, apresentando os respectivos valores: -78,1, -150, -182,2, -264, -1547%.

Referente aos valores de correlação linear ($r_{Y\hat{Y}}$) %, os menores valores apresentados foram para a classe de idade < 8, seguida pelas classes de idade 15 – 21,9; 22 – 28,9; > 29; 8 – 14,9, apresentando os seguintes valores 0,0036, 4,18, 98,01, 99,14, 122,89%

Tratando-se do erro padrão da estimativa ($s_{Y\hat{Y}}$)%, os menores valores apresentados foram para a classe de idade < 8, seguidas pelas classes de idade 15 – 21,9; > 29; 8 – 14,9; e 22 – 28,9, apresentando os seguintes valores 0,36; 0,86; 11,23; 12,71 e 12,94%, respectivamente. Os resultados dos testes F para todas as classes de idade, não apresentaram diferença significativa.

As estimativas pelo método da Altura relativa apresentaram diferença significativa em comparação a cubagem rigorosa, apresentando um padrão de superestima para os valores. Este comportamento de superestimar foi observado também por Andrade et al. (2006), Thiersch et al. (2006) e Almeida et al. (2011).

6 CONCLUSÕES

Não houve diferença significativa entre os diâmetros mensurados nas posições sugeridas por Smalian e o Método da Altura Relativa, fato que torna esse último método como uma possibilidade para a cubagem de árvores em pé.

Em relação ao desempenho do Método da Altura Relativa entre modelos volumétricos, fatores de forma, não houve vantagens em utilizar o método testado, podendo ser usado qualquer método com a mesma precisão relativa.

As regiões do fuste que apresentaram maior valor de erro padrão para o volume foram: entre a altura relativa e altura total, seguida pela região do DAP e altura relativa e, por fim, a região entre a altura zero e DAP.

Para as estimativas do volume, o método da altura relativa apresentou uma leve superestimativa dos valores para as árvores estudadas.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, A. V. de (ed.). **Cultivo de pinus.** 2. Ed (Embrapa Florestas. Sistemas de produção, 5). Colombo: Embrapa Florestas, 2014. 73 p.

AHRENS, S. **A mathematical expression of stem form for loblolly pine in Southern Brazil.** 1980. 60 f. Thesis (Magister of Scienc). Oklahoma State University.

ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA, A. G. da (ed.). **Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas** - Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008.

ALMEIDA, R. C.; CABACINHA, C. D.; ROCHA, T. B.; PAULA, A. Volumetria de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake pelo método geométrico do Planalto da Conquista, Bahia. **Revista Caatinga**, v.24, n.1, p.65-75, 2011.

ANDRADE, V. C. L. de, LEITE, H. G. Pesquisas recentes sobre determinação do volume de árvores. **Revista Folha Florestal**, n.95, p.6, 2000.

ANDRADE, V. C. L. de, LEITE, H. G., FRANCO, F. S. Equação de Razão Volumétrica para *Toona Ciliata* var. *australis* em Sistema Agroflorestal na Zona da Mata de Minas Gerais. **Revista Árvore**, v.24, n.4, p.385-388, 2006.

ANDRADE, V. C. L.; CALEGARIO, N.; SCOLFORO, J. R. S. Análise de algumas alternativas para obter o coeficiente angular da reta no método da altura relativa. **Ciência Florestal**, v.16, n.3, p.303-317, 2006.

ANDRADE, V. C. L.; CALEGARIO, N.; SOUZA, A. L.; REZENSE, J. L. P.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; SILVA, J. R. M. Uso de sólidos geométricos para gerar equações de forma do tronco de árvores em pé. **Scientia Forestalis**, v. 37, n. 38, p. 299-311, 2009.

ANDRADE, V. C. L.; LEITE, H. G. **Análise do perfil do tronco de árvores utilizando geometria analítica.** Viçosa: UFV, 1997. 35p. Iniciação Científica Sem Bolsa de Pesquisa (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa.

ANDRADE, V. C. L.; LEITE, H. G. Uso da geometria analítica para descrever o taper e quantificar o volume de árvores individuais. **Revista Árvore**, v.25, n.4, p.481-486, 2001.

AVERY, T. E.; BURKHART, H. E. **Forest measurements.** 4.ed (McGraw-Hill series in forest resources). New York: McGraw-Hill, 1997. 408p.

AZEVEDO, G B; SOUSA, G T. O; BARRETO; P A B; JÚNIOR, V C. Estimativas volumétricas em povoamentos de eucalipto sob regime de alto fuste e talhadia no sudoeste da Bahia. **Pesq. flor. bras.**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 309-318, 2011.

CAMPOS, A. L. A. S. **Desenvolvimento de um sistema compatível de crescimento e produção para manejo de *Eucalyptus grandis* (W. Hill ex-Maiden).** 1986. 73p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas.** 3.ed. Viçosa: UFV, 2009.

CHICHORRO, J. F. **Análise estrutural econômica de multiprodutos da madeira em florestas naturais.** 2000. 241p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa.

COSTA, E. A.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R.; HESS, A. F. Função de afilamento e sortimentos de madeira para *Araucaria angustifolia*. **Revista Ciência Florestal**, v.26, n.2, p.523-533, 2016.

CURTO, R. A.; LAURO, A. C.; TONINI, H.; KOHLER, S. V.; ARAÚJO, E. J. G.; BIAZATTI, S. C. Cubagem de árvores em pé com dendrômetro óptico em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. **Pesquisa Florestal Brasileira**, [S. l.], v. 39, n. 1, 2019. DOI: 10.4336/2019.pfb.39e201801646. Disponível em: https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/1646. Acesso em: 28 ago. 2024.

DAVID, H. C., PÉLLICO NETTO, S., ARCE, J.E., WOYCIKIEVICZ, A.P.F., ARAÚJO, E.J.G., MIRANDA, R. O.V., 2018. Intensive management for optimizing the production of high-value logs of pine forests in southern Brazil. **Ciência Florestal.** v.28, n.3, p.1303–1316, 2018. https://doi.org/ 10.5902/1980509833352.

DRESCHER, R, SCHNEIDER, P. R., FINGER, C. A. G. Sortimentos de *Pinus elliottii* Engelm para a região da serra do sudeste do Estado do Rio Grande do Sul – Brasil. **Ciência Florestal**, v.9, n.2, p.55-73. 1999.

FIGUEIREDO-FILHO, A., BORDERS, B.E., HITCH, K.L. Taper equations for *Pinus taeda* plantations in Southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v.83, p.39-46, 1996.

FINGER, C.A.G. **Fundamentos de Biometria florestal**. Santa Maria: UFSM, CEPEF - FATEC, 1992. 270p.

FRANCO, E. J.; SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, A. D. Eficiência dos métodos para estimativa volumétrica de *Eucalyptus camaldulensis*. **Revista Cerne**, v. 3, n. 1, p. 82-117, 1997.

FREESE, F. Testing acuracy. **Forest Scienc**, v.6, n.2, p.139-145, 1960.

GAMA, R. C. **Método da altura relativa aplicado em povoamento de *Khaya Senegalensis*.** 2019. 52 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Universidade Federal do Tocantins.

GOMES, A. M. A. **Medição dos arboredos**. Lisboa: Livraria Sá da Costa, 1957. 413p.

GRAYBILL, F.A. **Theory and application of linear model**. Belmont: Duxbury Press, 1976.

HUSCH, B.; MILLER, C. L.; BEERS, T. E. **Forest mensuration**. 3. ed. New York: Ronald Press, 1983.402 p.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório Anual 2022 IBÁ:** ano base 2021. São Paulo: IBÁ, 2022 96 p.

LEITE, H.G.; ANDRADE, V.C.L. Um método para condução de inventários florestais sem o uso de equações volumétricas. **Revista Árvore**, v.26, n.3, p. 321-328, 2002.

LIMA, F.S. **Análise de funções de <taper= destinadas à avaliação de multiprodutos de árvores de *Pinus elliottii*.** 1986. 79 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa.

LIMA, M. A.et al. Trocas gasosas em folhas de sol e sombreadas de cajueiro anão em diferentes regimes hídricos. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 4, p. 654-663, 2010.

LOETSCH, E.; ZOHRER, F.; HALLER, K. E. **Forest inventory**. 2 ed. Vol II. Munchen: Blv Verlagsgellschat, 1973., 469 p.

MACHADO, S. A.; NADOLNY, M. C. Comparação de métodos de cubagem de árvores e de diversos comprimentos de seção. In: CONGRESSO FLORESTAL E DO MEIO AMBIENTE DO PARANÁ, 3., 1991, Curitiba. **Anais...** Curitiba: APEF, 1991. v. 1, p. 89-104.

MACHADO, S. A.et al. Comparação de modelos de afilamento do tronco para diferentes idades e regimes de desbaste em plantações de *Pinus Oocarpa* Schiede. **Pesquisa Floresta Brasileira**, n.48, p.41-64, 2004.

MACHADO, S. A; FILHO, A. F. **Dendrometria**. -2. ed. Guarapuava: UNICENTRO, 2009. 316 p.

MAZZA, C. A. Silva. **Caracterização ambiental da paisagem da microrregião colonial de Irati e zoneamento ambiental da Floresta Nacional de Irati, PR.** 2006. 167 f. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) - Universidade Federal de São Carlos.

NEGRÓN, C.F.F. Ecuacion del volumen de una poblacion ribereña de *Cedrela odorata* en Madre de Dios. Perú. **Revista Forestal del Perú**, Lima, v.22, n.1-2, p. 5-13, 1995.

NICOLETTI, M. F.; LIMA, B. A.; BRANCO, M. E. R.; STEPKA, T. F. Quantificação do fator de forma por meio de diferentes métodos de cubagem em *Pinus taeda* L. **Scientia Forestalis**, v.49, n.131, 2021. e3504. https://doi.org/10.18671/scifor.v49n131.06

NICOLETTI, M. F; SILVA, E; FLORIANI, M. M. P. Metodologia não destrutiva para quantificação do volume e biomassa fazer fusível em Retorno florestal. **Nativa**, v. 3, n; 2, p.287-291, 2015. doi: 10.14583/2318-7670.v03n02a11.

OLIVEIRA, M. M.et al. Growth and split of the dry mass in young plants of amburana (*Amburana cearensis* (fr. all.) ac smith) and umbuzeiro (*Spondias tuberosa* arr. cam.). **Ciencia Florestal**, v. 29, n. 3, p. 1142-1153, 2019 https://doi.org/10.5902/1980509827189.

PACHECO, J. M. **Influência do espaçamento no crescimento de *Pinus taeda* L. na região Centro-Sul do Paraná – Irati.** 2013. 58 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Florestal) - Universidade Estadual do Centro.

PÉLLICO NETTO, S. Equivalência volumétrica: uma nova metodologia para estimativa do volume de árvores. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, v.2, n.1, p.17- 30, 2004.

PETERSON, H. A segmented stem profile model for *Pinus sylvestris*, **Forest Ecology and Management**, v. 124, n. 1, 1999, Pages 13-26, ISSN 0378-1127, https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00052-3. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112799000523). Acesso em: 02 ago. 2022.

SANQUETTA, C. R.; REZENDE, A. V.; GAIADA, R.; SCHAAF, L. B.; ZAMPIER, A. C.; ARCE, J. E. Produção de madeira para celulose em povoamentos de *Pinus taeda* L. submetidos a diferentes densidades de plantio e regimes de desbaste. **Revista Cerne**, Lavras, v.10, n.2, p.154-166, 2004.

SCHNEIDER, P.R., FINGER, C.A.G., KLEIN, J.E.M., TOTTI, J.A., BAZZO, J.L. Forma de Tronco de Sortimentos de Madeira de *Eucalyptus grandis* Maiden para o Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.6, n.1, p.79-88, 1996.

SCOLFORO, J.R.S., RIOS, M.S., OLIVEIRA, A. D., MELLO, J.M., MAESTRI, R. Acuracidade de equações de afilamento para representar o perfil do fuste de *Pinus elliottii*. **Revista Cerne**, Lavras, v.4, n.1, p.100-122, 1998.

SCOLFORO, J.R.S.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Mensuração florestal 2: volumetria.** Lavras: ESAL/FAEPE, 1993. 126p.

SHIMIZU, J. Y. **Pínus na silvicultura brasileira.** Colombo: Embrapa Florestas, 2008. 223 p.

SILVA, J. A. A.; PAULA NETO, F. **Princípios básicos de dendrometria**. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Ciência Florestal, 1979. 191p.

SILVA, J. N. M.; CARVALHO, M. S. P. de. Equações de volume para uma floresta secundária no planalto do Tapajós, Belterra, Pará**. Boletim de Pesquisa Florestal**, v. 8 , n. 9, p. 26 – 34, 1984.

SOUZA, A.L., JESUS, R.M. Equações de volume comercial e fator de forma para espécies da Mata Atlântica ocorrentes na reserva florestal da Companhia Vale do Rio Doce, Linhares-ES. **Revista Árvore**, Viçosa, v.15, n.3, p.257-273, 1991.

SOUZA, G. S.; CASTRO, E. M.; SOARES, A. M.; SANTOS, A. R.; ALVES, E. Teores de pigmentos fotossintéticos, taxa de fotossíntese e estrutura de cloroplastos de plantas jovens de *Mikania laevigata* schultz bip. Ex baker cultivadas sob malhas coloridas. **Semina: Ciencias Agrarias**, v. 32(SUPPL. 1), p. 1843-1854, 2011. https://doi.org/10.5433/1679-0359.2011v32Suplp1843.

SUASSUNA, J. **A Cultura Do Pinus:** uma perspectiva e uma preocupação. Revista Brasil Florestal n° 29, 1977. Disponível em: https://www.gov.br/fundaj/pt-br/destaques/observa-fundaj-itens/observa-fundaj/artigos-de-joao-suassuna/a-cultura-do-pinus-uma-perspectiva-e-uma-preocupacao. Acesso em: 03 jan. 2023.

THIERSCH, C.R.; SCOLFORO, J. R.; OLIVEIRA, A. D.; MAESTRI, R.; DEHON, G. Acurácia dos métodos para estimativa do volume comercial de clones de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, v.12, n.2, p.167-181, 2006.

VENDRUSCOLO, D G S; DRESCHER, R., SOUZA, H S, MOURA, J P V M, MAMORÉ, F M D, SIQUEIRA, T A da S. Estimativa da altura de eucalipto por meio de regressão não linear e redes neurais artificiais **Rev. Bras. Biom.**, v.33, n.4, p.556-569, 2015.