REVISTA AGROAMBIENTAL

Lista de Periódicos Disponível em Periódicos

ARTIGO ORIGINAL

Página inicial do periódico: REVAGRO

PELAGRA MOÇAMBIQUE

Modelos Taper para descrever o afilamento de *Pinus taeda* na floresta de Inhamacari no posto administrativo de Machipanda

Taper models to describe the tapering of Pinus taeda in the inhamacari forest in the Administrative Post of Machipanda

[1a] Igor Orlando Custódio ,[b] Fanuel Garai Albino Muiambo ,[c] Anunciado João Pedro Marquebo

[a]*BridgeCarbon Moçambique, igororlandoo@gmail.com;*
[b]*Lipilichi Wilderness Investments LDA, Moçambique, fanuel@yambone.com;*
[c]*Instituto Médio Agrário de Chidzolomondo, Moçambique, campiaojr@gmail.com.*

Informações do Artigo

Palavras-Chaves:
Modelagem do perfil de tronco
Sortimento
Plantações florestais
Análise de regressão

RESUMO

O presente estudo objectivou-se em ajustar equação de perfil de tronco não segmentada para estimativas de afilamento de *Pinus taeda*, da floresta de Inhamacari, Província de Manica. Os dados para o presente trabalho foram colectados no povoamento de *Pinus taeda*, numa amostra de 100 indivíduos. Mensurou-se a altura total, comercial e as circunferências do fuste, nas posições a 0,30; 0,50; 0,70; 0,90 1,10; 1,30; 1,50; 1,70; 2,30 m; quando maior que 2,30m foi mensurada aproximadamente, de 1,00 a 1,00 m até a altura total. Com estes dados ajustou-se diferentes modelos de perfil de tronco, os de Schöepfer, Hradetzky e de Kozak *et al*, tendo sido selecionada a melhor equação usando o coeficiente de determinação de ajuste (R^2%), erro padrão de estimativa percentual (Syx%) análise gráfica dos resíduos e análise gráfica dos perfis estimado. Os modelos de Hradetzky e o de Shöepfer obtiveram resultados satisfatórios, com alto valor de coeficiente de determinação ajustado de 99,756 % para o modelo de Hradetzky e de 98,394 % para o modelo de Shöepfer, baixo erro-padrão da estimativa de 6,94 % para Hradetzky e 7,25 % para o modelo Shöepfer e melhor distribuição de resíduos para ambos os modelos, o modelo de Kozak *et al*, obteve resultados baixos em comparação aos outros modelos (95,52 % de R^2% e 11,50 % de Syx%). Na validação dos modelos, usou-se o teste Qui-quadrado (X^2), onde seleccionou-se o modelo de Hradetzky que teve melhor ajuste, o mesmo apresentando X^2-*calculado* menor de 0,173835024 que o X^2crítico de15,507, indicando melhor desempenho.

***Keywords*:**
Trunk profile models
Pinus taeda
Regression analysis

The present study aimed to adjust the non-segmented trunk profile equation to estimate the taper of *Pinus taeda*, from the Inhamacari forest, Manica Province. The data for the present work were collected in the Pinus taeda stand, in a sample of 100 individuals. The total height, commercial and the circumferences of the bole were measured, in the positions at 0.30; 0.50; 0.70; 0.90 1.10; 1.30; 1.50; 1.70; 2.30 m; when greater than 2.30m it was measured approximately, from 1.00 to 1.00 m to the total height. With these data, different trunk profile models were fitted, those of Schöepfer, Hradetzky and Kozak et al. The best equation was selected using the coefficient of determination of fit (R^2%), standard error of percentage estimate (Syx%) graphical analysis of the residuals and graphical analysis of the estimated profiles. The Hradetzky and Shöepfer models obtained satisfactory results, with a high coefficient of determination of 99.756 % for the Hradetzky model and 98.394 % for the Shöepfer model, low standard error of the estimate of 6.94 % for Hradetzky and 7.25% for the Shöepfer model and better residue distribution for both models, the model by Kozak *et al*, obtained unsatisfactory results (95.52% of R^2% and 11.50% of Syx%) compared to the others. In the validation of the models, the Chi-square test (X2) was used, where the Hradetzky model that had the best fit was selected, with the same calculated X2 smaller than 0.173835024 than the critical X2 of 15.507, indicating better performance.

[1] Para correspondência: igororlandoo@gmail.com

DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.17360640

1. INTRODUÇÃO

O panorama florestal moçambicano é marcado pela presença de plantações exóticas de rápido crescimento, como o *Pinus* e o *Eucalyptus*, que ocupam cerca de 76.075 hectares, concentrados nas regiões Norte e Centro do país (Ministério da Agricultara, 2015).

Essas plantações são cruciais para aliviar a pressão sobre as florestas nativas e assegurar o fornecimento contínuo de madeira (Titos, 2013). Contudo, o sector enfrenta o desafio de maximizar o aproveitamento da matéria-prima, uma vez que a crescente demanda do mercado exige das empresas alternativas para a utilização integrada da madeira, impulsionando a pesquisa sobre o afilamento do fuste da árvore (Leite *et al.,* 2006). A análise do afilamento, que é a redução do diâmetro ao longo do tronco, é fundamental para o planeamento florestal.

A chave parcial para optimizar o uso da madeira reside na aplicação de modelos de afilamento, também conhecidos como modelos de perfil ou de forma do tronco, que são ferramentas, equações estatísticas essenciais na cadeia de produção de produtos madeireiros.

A principal vantagem dessas equações é a capacidade de identificar produtos madeireiros específicos a partir de qualquer ponto do fuste, estimando o diâmetro em uma altura desejada ou a altura comercial para um dado diâmetro superior (Husch *et al.,* 2003). Além disso, as equações de afilamento são importantes por fornecerem estimativas de volume mais precisas, tanto total quanto parcial, ao longo de qualquer segmento do tronco, maximizando o aproveitamento do povoamento florestal (GARCIA *et al.,* 1993)

A urgência deste estudo é evidenciada pela alta taxa de desperdício, cerca de 57,80% observada na transformação do *Pinus taeda* na Centro Agroflorestal de Machipanda, CEFLOMA (Manjate, 2021). Este desperdício resulta da falta de conhecimento sobre qual segmento do fuste destinar a cada multiproduto (Campos e Leite, 2009). A dificuldade é agravada pela inexistência de tabelas de sortimento apropriadas, essenciais para o planejamento e a avaliação económica (Mendonça *et al.,* 2014).

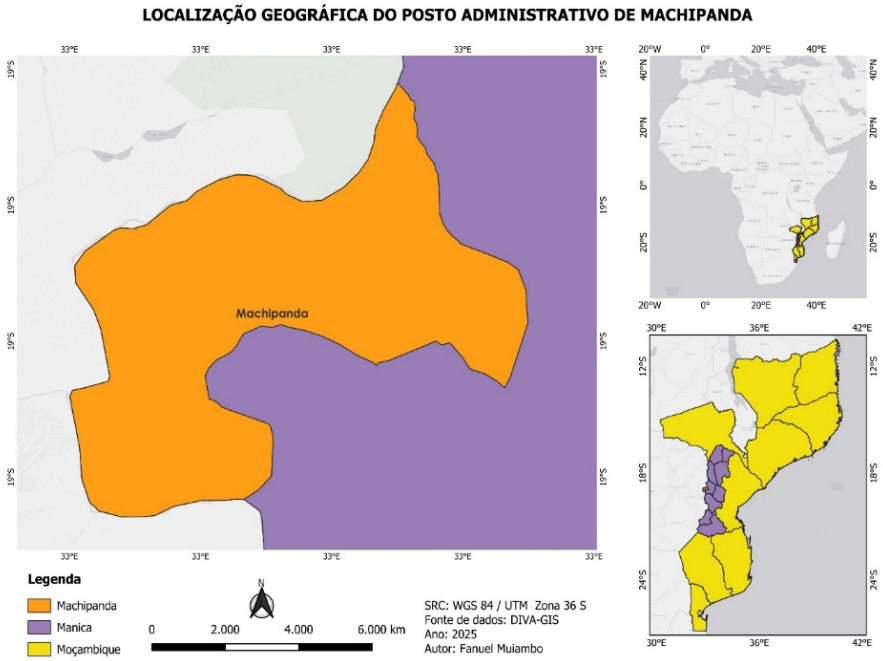
Assim sendo, o presente estudo tem o objectivo central de ajustar equação de perfil de tronco para o *Pinus taeda* na floresta de Inhamacari. Essa equação fornecerá à empresa as ferramentas necessárias para descrever o perfil da árvore, prever o diâmetro em diferentes alturas e, crucialmente, criar tabelas de sortimentos. Isso permitirá o uso múltiplo do tronco e, consequentemente, a minimização dos desperdícios durante o desdobro dos toros.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização e caracterização geográfica da área de estudo

A área de estudo da pesquisa foi na floresta de Inhamacari, que localiza-se no posto administrativo de Machipanda, no distrito de Manica, província de homónima, na região central de Moçambique (Figura 1). Geograficamente, a área de estudo faz fronteira com a República do Zimbabwé a Norte e Oeste, e suas coordenadas situam-se entre a latitude 18◦ 55′ 45″ e 18◦ 57′ 56″ Sul e a longitude 32◦ 41′ 52″ e 32◦ 44′ 57″ Este (Tuzine, 2011). O distrito de Manica está situado na parte central-oeste da província, limitando-se ainda com os distritos de Bárue (Norte), Sussundenga (Sul) e Gondola (Leste) (MAE, 2014).

Figura 1. Localização da área do estudo



Fonte: Autores (2025)

2.2 Clima e recursos hídricos

O clima da região, classificado como temperado húmido pela classificação de Köppen (MAE, 2014), apresenta uma temperatura média anual de cerca de 21,2°C, com extremos de 31°C em Outubro e 7,3°C em Julho. O distrito é caracterizado por duas estações distintas: a chuvosa, de Novembro a Abril, e a seca no restante do ano, com precipitação média anual variando de 1000 a 1600mm. A drenagem hídrica da região é realizada pelo rio Revué e seus afluentes, que escoam suas águas para a principal bacia hidrográfica local, o rio Búzi. A floresta de Inhamacari ocupa cerca de 994 hectares, divididos quase

igualmente entre floresta plantada (496 hectares) e floresta nativa de miombo e de montanha (498 hectares) (Chamba & Rokyta, 1994).

2.3 Composição florística e fauna da floresta

A floresta plantada em Inhamacari é composta principalmente pelos géneros *Pinus* e *Eucalyptus*. O género *Eucalyptus* inclui espécies como *Eucalyptus cloeziana*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*, enquanto as plantações de *Pinus* são formadas por espécies como *Pinus taeda* (o foco do estudo), *Pinus patula* e *Pinus elliotti*. A área de inhamacai também é coberta por uma floresta nativa do tipo miombo e floresta sempre verde de montanha, onde se destacam espécies como *Brachystegia spiciformis*, *Pterocarpus angolensis* e *Julbernardia globiflora*. A área também abriga fauna brava, incluindo pequenos mamíferos, porcos do mato e macacos, cuja caça pela comunidade local tem sido uma fonte de incêndios descontrolados na floresta (Tuzine, 2011).

2.4 Colecta de dados

A pesquisa foi conduzida no talhão 3 da floresta de Inhamacari, focada em um povoamento de *Pinus taeda* de 16 anos, com um espaçamento homogéneo de 2,5×2,5m. Para garantir a robustez dos resultados, foram seleccionadas 100 árvores dentro de uma parcela de 25×25m. A validade da amostra foi rigorosamente verificada, assegurando uma margem de erro aceitável de apenas 4,44% através da metodologia descrita na Equação 1, confirmando sua representatividade para o povoamento.

$$n = \frac{t^2.CV^2}{E^2} \quad (1)$$

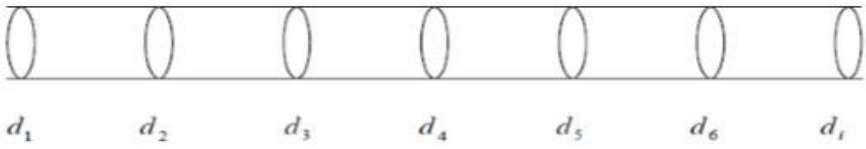
Onde: n = Tamanho amostral por individual; s^2 = *estimativa* da variância dos dados preliminares; E = erro (4.44%); t = valor de t tabelado para determinado nível de significância definido pelo usuário; p = 0,05.

2.5 Mensuração detalhada do perfil do tronco

Para obter os dados necessários ao estudo do afilamento, as árvores seleccionadas foram derrubadas. Após o abate, foram registadas a altura total e a altura comercial de cada fuste. O método de colecta de dados de perfil envolveu a medição sistemática das circunferências (utilizadas para derivar o diâmetro) em pontos predefinidos ao longo do tronco. Inicialmente, as medições foram realizadas em intervalos curtos e regulares, nas alturas de 0,30; 0,50; 0,70; 0,90; 1,10; 1,30; 1,50 e 1,70 metros, seguidas de uma medição a 2,30 metros. A diante, para capturar o afilamento em toda a sua extensão, as medições foram

espaçadas em aproximadamente 1,00 metro, prosseguindo até o ponto mais alto do tronco da árvore (Figura 2).

Figura 2. Ilustração dos intervalos da posição das circunferências mensuradas



Fonte: Autores (2025)

2.6 Ajuste dos Modelos

Para o ajuste das equações de perfil de tronco (ver tabela 1), foi utilizado o *Software Statistic Packet Social for Science* (SPSS) na versão 21, onde efectuou-se a análise de regressão não linear das variáveis dependentes sobre as variáveis explanatórias.

2.6.1 Funções de afilamento testados

Ajustou-se três funções de afilamento (Tabela 1) para o agrupamento dos dados da espécie estudada, sendo avaliados os modelos não segmentados de Kozak *et al.* (1969), Schopfer (1966) *e* Hradetzky (1976).

Tabela 1. Modelos de afilamento ajustados.

Modelo	Autor	Ano
$\left(\frac{d_i}{d_{1,3}}\right)^2 = \beta_0 + \beta_1\left(\frac{h_i}{H}\right) + \beta_2\left(\frac{h_i}{H}\right)^2 + e$	Kozak, *et al.*	1969
$\left(\frac{d_i}{d_{1,3}}\right) = \beta_0 + \beta_1\left(\frac{h_i}{H}\right) + \beta_2\left(\frac{h_i}{H}\right)^2 + \beta_3\left(\frac{h_i}{H}\right)^3 + \beta_4\left(\frac{h_i}{H}\right)^4 + \beta_5\left(\frac{h_i}{H}\right)^5 + e$	Schop-fer	1966
$\left(\frac{d_i}{d_{1,3}}\right) = \beta_0 + \beta_1\left(\frac{h_i}{H}\right)^x + \beta_2\left(\frac{h_i}{H}\right)^{x2} + \beta_3\left(\frac{h_i}{H}\right)^{x3} + \beta_4\left(\frac{h_i}{H}\right)^{x4} + ...\beta_n\left(\frac{h_i}{H}\right)^{xn} + e$	Hra-detzky	1976

Onde: d_i = diâmetro a altura *i* do solo (cm); $d_{1,3}$ = diâmetro a altura do peito (cm); H = altura total da árvore (m); h_i = altura *i* onde foi medido o diâmetro d_i, *xi*=potências seleccionadas (m); βi = coeficientes dos modelos a serem estimados; e=erro (4.44%).

O modelo de afilamento foi construído utilizando o procedimento de selecção Stepwise, seguindo a abordagem sugerida por Hradetzky (1976). Essa metodologia combina diferentes tipos de potências para descrever as distintas seções do tronco, assim, potências inteiras de ordem de dezenas são empregadas para representar a base da árvore, enquanto potências fraccionárias são usadas para modelar a porção superior do fuste. Para este

estudo, um amplo conjunto de potências foi testado para optimizar o ajuste do modelo de afilamento. As potências avaliadas incluíram: 0,005; 0,09; 0,08; 0,07; 0,06; 0,05; 0,04; 0,03; 0,02; 0,01; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1; 1; 2,4; 3; 4; 5; 10; 15; 20 e 25.

2.6.2 Parâmetros para selecção

Para avaliar a qualidade do modelo de afilamento, foram utilizados critérios estatísticos rigorosos, conforme recomendado por Stepka *et al.* (2017). Os principais indicadores buscados foram:

1. O erro padrão da estimativa (Syx%) deve ser o mais próximo possível de zero, indicando que as previsões do modelo são precisas.
2. O coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj\%}$) deve ser o mais próximo de 100%, sinalizando que o modelo explica uma alta proporção da variação observada nos dados.
3. A análise gráfica dos resíduos deve apresentar uma alta concentração da nuvem de pontos em torno de zero, com os resíduos distribuídos tanto nas regiões positivas quanto negativas. Essa distribuição equilibrada ("erros compensastes") é desejável, pois indica um melhor ajuste e ausência de vieses sistemáticos.

Deste modo, para o cálculo do coeficiente de determinação ajustado (R²aj) da regressão, o qual estima o ajustamento, e no quadrado médio dos resíduos (QMRes) que estima o afastamento, utilizou-se a equação 2:

$$\boldsymbol{R^2}\text{aj } \% = \left[1 - \left(\frac{SQres}{SQtot}\right)\right] * 100 \quad (2)$$

Onde: R²aj = coeficiente de determinação ajustado; SQres = soma de quadrados do resíduo; SQtot = soma de quadrados totais.

O erro padrão da estimativa em percentagem (Syx%) informa o erro médio ocasionado pelo uso do modelo (Soares, 2011), havendo a necessidade de recalcular o erro para as equações não lineares:

$$\boldsymbol{S_{yx}}\% = \sqrt{\frac{QMres}{\hat{Y}} * 100} \quad (3)$$

Onde: Syx% = erro padrão da estimativa em percentagem; QMres = quadrado médio do resíduo; $\bar{Y}$= média dos diâmetros observadas.

Para a construção dos gráficos de distribuição utilizados na análise, calculou-se os valores residuais através da equação:

$$\boldsymbol{Resíduo}\ (\%) = \frac{(Y - \hat{Y})}{Y} * 100 \quad (4)$$

Onde: $\hat{Y}$ = valores estimados pela equação; e Y = valores observados.

2.6.3 Análise gráfica dos perfis médio

Para a elaboração da representação gráfica do perfil médio estimado das árvores, foram empregados todos os modelos de afilamento desenvolvidos no estudo. O objectivo dessa abordagem foi utilizar a totalidade dos modelos ajustados para prever o diâmetro em diferentes alturas, ao longo de todo o fuste da árvore.

2.6.4 Validação da função de afilamento

Para a validação dos modelos de afilamento, uma subamostra de 32 indivíduos independentes foi seleccionada aleatoriamente. Estes indivíduos não foram utilizados no processo de ajuste dos modelos, garantindo a imparcialidade da validação. O método empregado para a validação foi o teste Qui-quadrado (χ^2).

O critério de aceitação do modelo é baseado na comparação entre o valor calculado ($\chi^2_{calculado}$) e o valor tabelado ($\chi^2_{crítico}$) a um nível de significância de 5%. Se o $\chi^2_{calculado}$ for menor que o $\chi^2_{crítico}$, conclui-se que não há diferenças significativas entre as relações di/DAP estimadas pelo modelo e os dados observados, e a equação é considerada válida para a região de estudo. Por outro lado, se o $\chi^2_{calculado}$ for maior que o $\chi^2_{crítico}$, a equação deve ser rejeitada por apresentar diferenças significativas, sendo considerada inválida para estimativas de di/DAP (Prodan *et al*., 1997).

Calculou-se o teste de qui-quadrado através da equação 5:

$$X^2 = \sum \frac{\left(\left(\frac{di}{DAP}\right)_{obs} - \left(\frac{di}{DAP}\right)_{est}\right)^2}{\left(\frac{di}{DAP}\right)_{est}} \qquad (5)$$

Onde: X^2= qui-quadrado; $(di/dap)_{obs}$ = relação diâmetro relativo e diâmetro à altura de peito observado; $(di/dap)_{est.}$ = relação diâmetro relativo e diâmetro á altura de peito estimado.

2.6.5 Hipóteses estatísticas

Para avaliar a aderência e a precisão dos modelos na descrição do perfil do tronco de *Pinus taeda* na área de estudo, aplicou-se o teste Qui-Quadrado a um nível de significância de 5%.

- **Hipótese nula:** O modelo ajustado se ajusta com precisão para descrever o perfil do tronco (*taper*) de *Pinus taeda* na área de estudo.

- **Hipótese alternativa:** O modelo ajustado não se ajusta com precisão (ou seja, não tem aderência estatística) para descrever o perfil do tronco (*taper*) de *Pinus taeda* na área de estudo.

2.6.6 Critério de Decisão

Com base nas hipóteses levantadas, as decisões estatísticas foram fundamentadas no valor-p (*p-Value*) do teste:

- Se o valor-p for maior ou igual a 5%, a hipótese nula não pode ser rejeitada.
- Se o valor-p for menor que 5%, a hipótese nula pode ser rejeitada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Ajuste dos modelos para estimativa de diâmetros ao longo do fuste

Estão presentes na tabela 2, as estatísticas de precisão e os coeficientes dos três modelos afilamento ajustados para estimativa do diâmetro para o povoamento de *Pinus taeda* na floresta de Inhamacari. Para o modelo de Hradetzky, foi ajustado com as seguintes potências: 0,005; 0,04; 0,2; 1; 2, 4; 10; 20 e 25.

Tabela 2. Estatísticas de precisão e os coeficientes dos modelos de afilamento

Autor	Modelo	$R^2_{aj\%}$	$Syx_{(\%)}$
Kozak, *et al.*	$\left(\frac{d_i}{d_{1,3}}\right)^2 = 1{,}3162 + -2{,}1810\left(\frac{h_i}{H}\right) + 0{,}8891\left(\frac{h_i}{H}\right)^2 + ei$	95,52	11,50
Schopfer	$\left(\frac{d_i}{d_{1,3}}\right) = 1{,}2432 + -3{,}9509\left(\frac{h_i}{H}\right) + 17{,}7107\left(\frac{h_i}{H}\right)^2 + ...-6517\left(\frac{h_i}{H}\right)^5 + ei$	98,394	7,25
Hradetzky	$\left(\frac{d_i}{d_{1,3}}\right) = -11205{,}78 + 13417{,}48\left(\frac{h_i}{H}\right)^{0{,}005} + -2370{,}81\left(\frac{h_i}{H}\right)^{0.04} + ...-1{,}1596\left(\frac{h_i}{H}\right)^{25} + ei$	99,756	6,94

Onde: di = diâmetro a altura i do solo (cm); d1,3 = diâmetro a altura do peito (cm); H = altura total da árvore (m); hi = altura i onde foi medido o diâmetro di,; ei=erro (4.44%); R2aj% = Coeficiente de determinação ajustado em percentagem; Syx% = Erro – padrão de estimativa percentual.

Os modelos testados, nomeadamente os de Kozak *et al.,* Shoepfer e Hradetzky, apresentaram todos um bom desempenho, mas o modelo de Hradetzky foi o que se ajustou melhor aos dados, com um coeficiente de determinação ajustado de 99,76%, o mais elevado dos três, e um erro-padrão da estimativa de 6,94%, o mais baixo, o que o torna o mais adequado para prever o diâmetro em qualquer ponto do tronco, estimar o volume do povoamento e construir tabelas de volume e sortimento para diferentes limites de dimensões de toras.

Resultados similares foram encontrados noutros estudos, como o de Júnior *et al.* (2011) em plantações de *Pinus taeda*, onde os valores de R²aj variaram entre 88,85% e 98,23% e os de Syx% entre 7,29% e 11,59%.

Teo *et al*. (2013), ao testarem modelos para *Pinus elliottii,* também identificaram o modelo de Hradetzky como o de melhor ajuste, com um Syx% de 10,68% e um R²aj de 0,92.

Kohler *et al.* (2013) ajustaram este mesmo modelo para povoamentos de *Pinus taeda* e obtiveram valores satisfatórios de Syx% (entre 5,4 e 7,6) e R²aj (entre 98% e 99%) em todas as classes de idades, concluindo que ele representa adequadamente a evolução da forma do tronco. Num estudo com eucalipto por Teo *et al.* (2018), o modelo de Hradetzky foi novamente o de maior destaque, com R²aj a variar entre 98,8% e 99,1% e Syx% entre 4,05% e 4,59% em diferentes qualidades de sítio.

3.2 Distribuição de resíduos

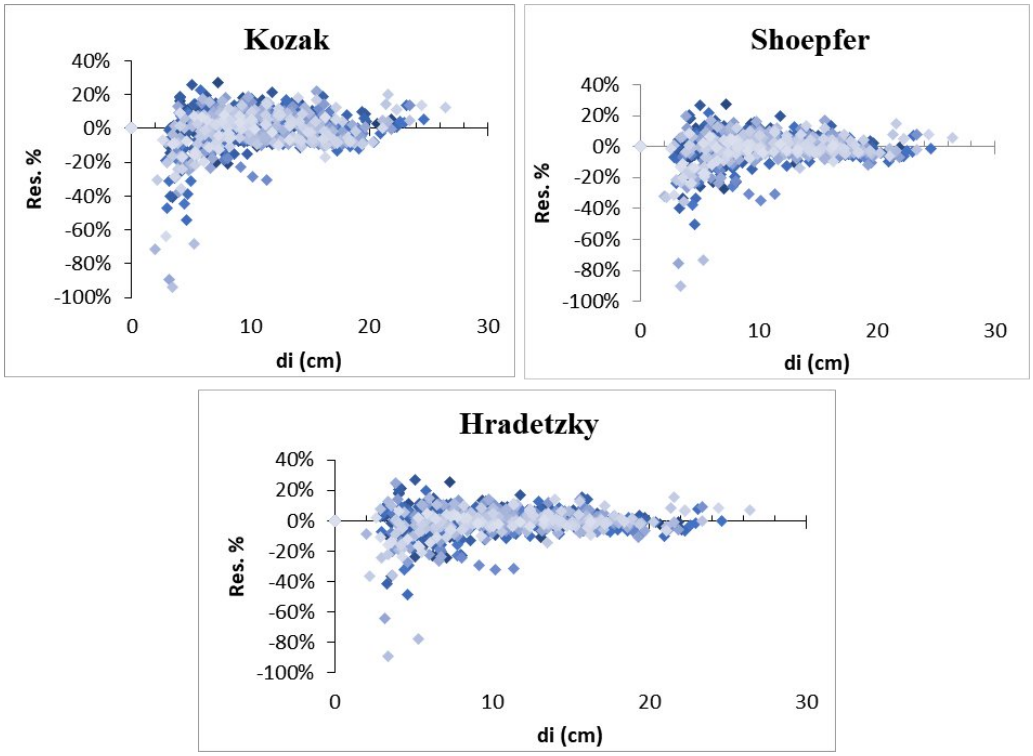
A figura 3, apresenta a distribuição dos resíduos resultantes do ajuste dos modelos de afilamento testados ao longo do fuste das árvores. Os três modelos, Kozak, Shoepfer e Hradetzky, apresentam um comportamento semelhante, subestimando sistematicamente os diâmetros nas classes inferiores a 10 cm. Entre eles, o modelo de Kozak mostra ainda uma ligeira tendência para subestimar os diâmetros na classe de 20 a 30 cm, em comparação com os modelos de Shoepfer e Hradetzky.

Ao analisar especificamente os dois modelos que demonstraram o melhor ajuste geral (Hradetzky e Shoepfer), observa-se que a distribuição dos resíduos ao longo do fuste é uniforme, com os pontos a dispersarem-se de forma equilibrada. Esta uniformidade indica uma boa precisão e consistência entre os valores observados e os estimados.

Em todos os modelos testados, observou-se uma maior dispersão dos resíduos na região mais próxima da base do fuste. De acordo com Souza (2007), este fenómeno ocorre devido à maior deformação na forma do tronco nesta porção, que é onde o afilamento é mais acentuado e a variação do diâmetro é mais brusca.

Apesar desta dispersão, todos os modelos produziram estimativas muito próximas entre si, subestimando consistentemente a região da base, com os erros a apresentarem uma distribuição normal, o que indica uma boa aderência geral dos modelos aos dados, mesmo com a maior variabilidade observada na base das árvores.

Figura 3. Distribuição de resíduos

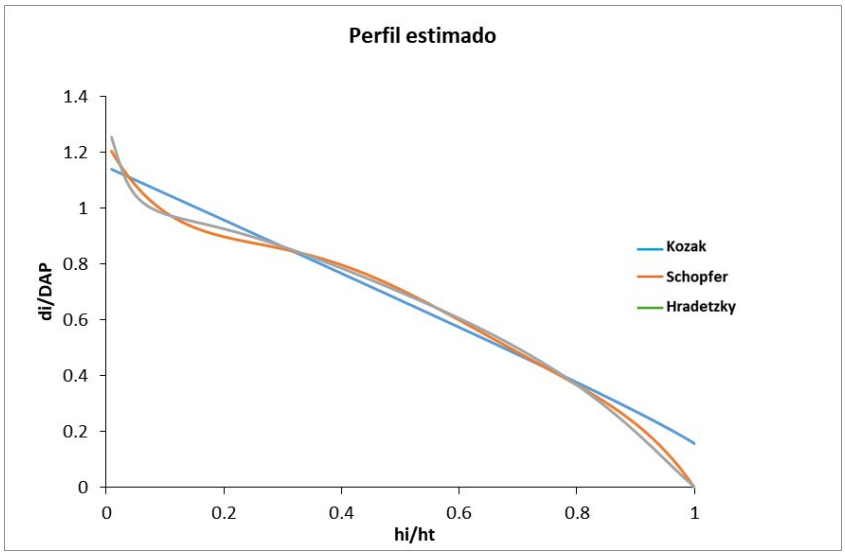


Fonte: Autores (2025), resultados de pesquisa

3.3 Perfil médio dos fustes

A figura 4, que apresenta o perfil médio dos fustes estimados pelos modelos de afilamento para *Pinus taeda*.

Figura 4. Perfil estimado



Fonte: Autores (2025), resultados de pesquisa

Confirma-se visualmente a superioridade do modelo polinomial de Hradetzky, pois este não apresentou tendenciosidade na descrição do perfil, enquanto o modelo de Sho-

epfer demonstrou uma ligeira mas consistente subestimativa nos menores diâmetros e, especificamente, na posição de 0,5 a 0,8 de di/DAP, representou adequadamente o perfil entre 0,30 a 0,70 de hi/ht, voltando a subestimar ligeiramente a partir de 0,8 em diante.

A comparação entre os modelos revela que os de Shoepfer e Hradetzky demonstram uma conformidade superior em relação ao de Kozak. Especificamente, o modelo de Shoepfer representa de forma mais fidedigna o perfil na base da árvore, enquanto o de Hradetzky se destaca na representação do ápice.

O modelo de Kozak *et al*. (1969), por sua vez, apresentou a maior tendenciosidade, subestimando sistematicamente os diâmetros, o que corrobora as conclusões prévias obtidas através das análises estatísticas e da avaliação gráfica dos resíduos.

3.4 Validação dos modelos

No que diz respeito à validação dos modelos, a tabela 5 exibe as estatísticas de validação para o modelo de afilamento de Hradetzky (1976), incluindo os resultados do teste de qui-quadrado (X^2) aplicado ao conjunto completo de dados.

Tabela 5. Estatística de validação dos modelos de afilamento

Modelo	$\chi^2_{calculado}$	$\chi^2_{crítico}$
$\left(\frac{d_i}{d_{1,3}}\right) = \beta_0 + \beta_1\left(\frac{h_i}{h}\right)^x + \beta_2\left(\frac{h_i}{h}\right)^{x2} + \beta_3\left(\frac{h_i}{h}\right)^{x3} + \beta_4\left(\frac{h_i}{h}\right)^{x4} + ...\beta_n\left(\frac{h_i}{h}\right)^{xn} + e$	0,173835024**	15,507

** Não significativo

O teste de qui-quadrado foi realizado com um nível de significância de 5%. O valor calculado de χ^2 (0,173835024) mostrou-se inferior ao valor crítico de χ^2 (15,507), o que permite aceitar a hipótese de que as estimativas de di/DAP geradas pelo modelo de Hradetzky (1976) são representativas e estatisticamente válidas.

De acordo com Sousa (2007), quando o valor calculado é menor que o crítico, conclui-se que não existem diferenças estatisticamente significativas entre os valores observados e os estimados, confirmando assim a precisão e a adequação da equação seleccionada para a estimativa do diâmetro ao longo do fuste.

4.0 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que os modelos polinomiais de Hradetzky (1976) e Shoepfer (1966) proporcionam estimativas precisas do diâmetro ao longo do fuste, apresentando coeficiente de determinação ajustado, erro-padrão da estimativa e análise gráfica de resíduos superiores em comparação com o modelo de Kozak *et al.* (1969). Na validação do modelo de Hradetzky, efectuada a um nível de significância de 5%,

o valor de qui-quadrado calculado ($\chi^2_{calculado}$ = 0,173835024) foi inferior ao valor crítico ($\chi^2_{crítico}$ = 15,507), permitindo concluir que as estimativas de di/DAP obtidas são representativas e estatisticamente válidas. Desta forma, seleccionou-se o modelo de Hradetzky como a melhor equação para a estimativa do afilamento de *Pinus taeda* na área de estudo. Recomenda-se, portanto, a utilização deste modelo para a predição do diâmetro do tronco a diferentes alturas, uma vez que demonstra precisão e robustez nas condições analisadas.

5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Campos, J. C. C., & Leite, H. G. (2009). *Mensuração Florestal, Perguntas e Respostas* (3. ed.). UFV.

Chamba, P., & Rokyta, M. (1994). *Inventario florestal das plantações de Inhamacari*. UEM, F.AEF, DEF.

Ferro, B., & Bouman, D. (1987). *Explanatory Notes to the Hydrogeological Map of Mozambique: Scale 1:1,000,000*. (Project of the Hydrogeological Map of Mozambique, sponsored by UNICEF).

Garcia, S. L. R., Leite, G. H., & Yared, J. A. G. (1993). Análise do perfil do tronco de morototó (*Didymopanax morototonii*) em função do espaçamento. In *Congresso Florestal Panamericano (1.: 1993: Curitiba) e Congresso Florestal Brasileiro (7.: 1993: Curitiba). Anais* (Vol. 2, pp. 485–491). SBS/SBEF.

Hradetzky, J. (1976). *Analysis und interpretation statistisher abränger keiten (Biometrische Beiträge zu aktuellen forschungs projekten)* (Baden - Württemberg Mitteilungen der FVA, Helf 76). FVA.

Husch, B., Miller, C. L., & Beers, T. E. (2003). *Forest mensuration* (3. ed.). J. Willey & Sons.

Júnior, M. Y., Nakajima, N. Y., Arce, J. E., Machado, S. A., Druszcz, J. P., Hosokaw, R. T., & Mello, A. A. (2011). Funções de afilamento para plantios desbastados de *Pinus taeda*. *PR*, *42*(1), 169–176.

Kohler, S. V., Koehler, H. S., Figueiredo Filho, A., Arce, J. E., & Machado, S. A. (2016). Evolution of tree stem taper in *Pinus taeda* stands. *Ciência Rural*, *46*(7), 1185–1191. https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20140021

Kozak, A., Munro, D. D., & Smith, J. H. G. (1969). Taper functions and their application in forest inventory. *The Forestry Chronicle*, *45*(4), 278–283.

Leite, H. G., Gama, J. R. V., Cruz, J. P., & Souza, A. L. (2006). Função de afilamento para *Virola surinamensis* (Roll.) Warb. *Revista Árvore*, *30*(1), 99–106.

Manjate, E. B. (2021). *Avaliação do rendimento da madeira serrada e dos subprodutos gerados no desdobro de toros de Pinus taeda, serração de CEFLOMA* [Monografia]. Instituto Superior Politécnico de Manica.

Ministério da Agricultura (2015). Plantações florestais em Moçambique: Desafios. Maputo

Ministério de Administração Estatal (MAE). (2014). *Perfil do distrito de Manica*.

Mendonça, A. R., Calegario, N., Silva, G. F., Souza, A. L., Trugilho, P. F., Carvalho, S. P. C., & Possato, E. L. (2014). Modelagem da produção de sortimentos em povoamento de Eucalipto. *Cerne*, *20*(4), 587–594.

Prodan, M., Peters, R., Cox, F., & Real, P. (1997). *Mensuração florestal*. GTZ-IICA.

Shoepfer, W. (1966). *Automatisierung des Massem, Sorten und Wertberechnung stenender Waldbestande*. Schriftenreihe Bad. Wurtt-Forstl.

Soares, T. S. (2011). Um modelo alternativo para a quantificação de multiprodutos em árvores individuais. *Revista Árvore*, *28*(6), 875–882.

Sousa, A. M. O. (2007). *Avaliação de modelos de taper não segmentados e segmentados na estimação da altura e volume commercial de fustes de Eucalyptus sp* [Tese de Mestrado em Produção Vegetal]. Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre.

Sousa, A. M. O., Mesquita, P., Gonçalves, A. C., & Silva, J. R. M. (2010). Segmentação e classificação de tipologias florestais a partir de imagens QUICKBIRD IX. *Seminário de Actualização em Sensoriamento*.

Stepka, T. F., Júnior, G. A. Z., Lisboa, G. S., Cerqueira, C. L., Pesck, V. A., & Roik, M. (2017). Modelos volumétricos e funções de afilamento para *Pinus taeda* L. na região Dos Campos Gerais, Paraná, Brasil. *Vol. 38*(21), 26.

Téo, S. J., Miguel, E. P., & Nascimento, R. G. M. (2018). Modelos de afilamento e forma dos fustes de eucalipto, em diferentes qualidades de sítio. *6*(n. especial), 832–841.

Titos, A. A. (2013). *Ajuste e validação de equações de perfil de tronco para espécie Pinus elliottii var. elliottii na Floresta de Inhamacari* [Trabalho de Conclusão de Curso ou Dissertação]. Maputo.

Tuzune, S. M., Rosot, C. N., & Centeno, S. A. J. (2011). Identificação de tipologias florestais em Machipanda, Moçambique, a partir da segmentação de imagens IKONOS.