

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

João Marcos Barbosa Sampaio

**APLICAÇÃO DE RELAÇÕES HIPSOMÉTRICAS E VOLUMETRIA EM
POVOAMENTO SEMINAL DE EUCALIPTO**

São João Evangelista

2022

JOÃO MARCOS BARBOSA SAMPAIO

**APLICAÇÃO DE RELAÇÕES HIPSOMÉTRICAS E VOLUMETRIA EM
POVOAMENTO SEMINAL DE EUCALIPTO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso Bacharelado em Engenharia Florestal do
Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus* São
João Evangelista para obtenção do grau de
bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr Bruno Oliveira Lafetá

São João Evangelista

2022

REDE DE BIBLIOTECAS

FICHA CATALOGRÁFICA PARA TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

FICHA CATALOGRÁFICA

S192a Sampaio, João Marcos Barbosa.

Aplicação de relações hipsométricas e volumetria em povoamento
seminal de eucalipto. / João Marcos Barbosa Sampaio. - 2022.
21 p.:il.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Oliveira Lafetá.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia
Florestal) -Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* São João
Evangelista, 2022.

1. Hipsometria. 2. Regressão. 3. Inteligência artificial. I.InstitutoFederal deMinas
Gerais. II. Título.

CDD 634.9

Catálogo: Rejane Valéria Santos - CRB-6/2907

João Marcos Barbosa Sampaio

**APLICAÇÃO DE RELAÇÕES HIPSOMÉTRICAS E
VOLUMETRIA EMPOVOAMENTO SEMINAL DE
EUCALIPTO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso Bacharelado em Engenharia Florestal do
Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* São
João Evangelista para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Bruno Oliveira Latefá

Aprovado em: 12 / 01 / 2022 pela banca
examinadora:



Prof. Dr. Bruno Oliveira Lafetá - IFMG (Orientador)



Prof. Me. Ivan da Costa Ilhéu Fontan - IFMG



Me. Vitor Augusto Cordeiro Milagres – Santa Maria Soluções Agrofloretais

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por tudo.

Aos meus pais, Marcos e Celiane e toda família pelo incentivo emocional e financeiro.

Aos meus amigos pelos inúmeros momentos de alegria e companheirismo durante a caminhada, em especial a Wesley Chaves.

A todos os professores que fizeram parte desta jornada de aprendizado, em especial ao orientador Prof. Dr. Bruno Oliveira Lafetá pela orientação.

Ao Instituto Federal de Minas Gerais e todos seus colaboradores pelo acolhimento e pela oportunidade de usufruir de um ensino de qualidade.

RESUMO

Investigações científicas sobre a aplicação de relações hipsométricas fornecem subsídios importantes para a quantificação de recursos madeireiros e manejo florestal. O objetivo foi avaliar o efeito de alternativas do uso de relações hipsométricas na altura e volume em um povoamento seminal de eucalipto. O inventário florestal foi realizado aos 60 meses de idade e consistiu na distribuição aleatória de 10 unidades amostrais. Avaliaram-se duas abordagens para a aplicação de relações hipsométricas empregando diferentes métodos de modelagem, uma a qual se estima a altura de todos os fustes inventariados (P1, alturas estimadas) e outra pautada na estimativa de altura apenas daqueles indivíduos que tiveram somente o DAP mensurado (P2, combinação de alturas medidas e estimadas). As relações hipsométricas dos ajustes dos modelos de Curtis (regressão linear), Logístico (regressão não linear) e máquinas vetor de suporte com função Kernel de base radial exibiram as melhores qualidades preditivas. Os volumes calculados não se diferenciam estatisticamente entre as abordagens P1 e P2. Conclui-se que a abordagem de P1 é uma alternativa para a aplicação de relações hipsométricas apropriadamente estabelecidas e não compromete a quantificação volumétrica florestal. A variabilidade biométrica tende a ser menor com a estimativa da altura de todos os fustes inventariados.

Palavras-chave: altura, regressão, inteligência artificial

ABSTRACT

Scientific investigations on the application of hypsometric relationships provide important support for quantification of wood resources and forest management. This research aimed to evaluate the effect of alternatives for the use of hypsometric relationships on height and volume in a seminal eucalypt stand. Forest inventory was carried out at 60 months of age and consisted random distribution of 10 sampling units. Two approaches were evaluated for the application of hypsometric relationships using different modeling methods, one which estimates height of all inventoried stems (P1, estimated heights) and other based on estimating the height of only those individuals who had only DBH measured (P2, combination of measured and estimated heights). Hypsometric relationships of the models fits of Curtis (linear regression), Logistic (non-linear regression) and support vector machines with radial basis Kernel function exhibited the best predictive qualities. Calculated volumes do not differ statistically between approaches P1 and P2. It is concluded that P1 approach is an alternative for application of properly established hypsometric relationships and does not compromise forest volumetric quantification. Biometric variability tends to be smaller with the estimation of the height of all inventoried stems.

Keywords: height, regression, artificial intelligence

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 MATERIAL E MÉTODOS	9
3 RESULTADOS	11
4 DISCUSSÃO	17
5 CONCLUSÕES	19
REFERÊNCIAS	20

1 INTRODUÇÃO

O setor florestal brasileiro se encontra em plena expansão competitiva no mercado mundial. A mensuração florestal assume papel essencial na quantificação da produtividade, fornecendo subsídios para o planejamento e manejo racional dos recursos madeireiros. Informações biométricas acuradas permitem maior assertividade em tomadas de decisão e melhor gestão da cadeia produtiva.

Levantamentos florestais em povoamentos equiâneos são convencionalmente realizados medindo-se o diâmetro de todos os fustes contidos nas unidades amostrais e a altura de apenas uma fração de fustes inventariados. Este procedimento se justifica pelo fato de a medição da altura ser considerada uma atividade onerosa, laboriosa e sujeita a diversos erros não amostrais, que podem ser intensificados diante de condições meteorológicas adversas, como fortes ventos, ou por obstrução visual do operador causada pela inclinação de terrenos, sub-bosque ou sobreposição de copas (SHARMA et al., 2019; BUENO; COSTA, 2020; DANTAS et al., 2020; SOARES et al., 2021). A modelagem biométrica por sua vez, surge como alternativa para a estimativa da altura de fustes e, apesar de ser amplamente pesquisada, persistem dúvidas sobre as estratégias que podem ser adotadas após o estabelecimento de relações hipsométricas.

Relações hipsométricas, simbolizadas por altura em relação ao diâmetro, são definidas a partir do estabelecimento de funções para a estimativa da altura individual de fustes sobre uma variável preditora de mais fácil e rápida medição, o diâmetro (SANQUETTA et al., 2015; MIGUEL et al., 2018). O uso dessas relações reduz o tempo destinado à coleta de dados da altura no campo, tornando os inventários mais rápidos, econômicos e acurados (VIEIRA et al., 2018; NICOLETTI et al., 2020, TÉO; SILVA, 2020; SOARES et al., 2021). Em contrapartida, tais relações nem sempre apresentam uma associação biológica bem definida, podendo apresentar grande variabilidade em altura para um mesmo diâmetro (MARTINS et al., 2021).

A escolha de um método para a modelagem e relação hipsométrica se torna difícil em alguns casos devido à não linearidade entre atributos biométricos envolvidos e restrições biológicas inerentes aos parâmetros de modelo estatísticos (MARTINS et al., 2021). A regressão linear é o método estatístico mais difundido na modelagem hipsométrica, devido à facilidade de ajuste, interpretação e uso das equações. A literatura florestal conta com diversos modelos tradicionais, como Trorey (1932), Henricksen (1950), Stoffels e Soest (1953) e, o mais usual, Curtis (1967).

Avanços em recursos computacionais tem propiciado o uso da regressão não linear e inteligência artificial na modelagem hipsométrica. Modelos de regressão não lineares de característica sigmoideal são bastante utilizados em virtude da fundamentação biológica, que permite uma rápida análise de confiabilidade das estimativas quanto a convergência do algoritmo de parametrização. Por outro lado, o método de Máquinas Vetor de Suporte (MVS), desenvolvido por Vapnik (1995), é um exemplo de inteligência artificial que se baseia em aprendizado supervisionado para a solução de problemas de alta complexidade intrínsecos à classificação de padrões, regressão e/ou identificação de outliers (KUMAR et al., 2019)

É conveniente salientar que as abordagens para a aplicação de relações hipsométricas são passíveis de debate, especialmente, no que se refere às implicações nas estimativas volumétricas (BATISTA et al., 2014). As abordagens de uso das relações hipsométricas podem ser divididas basicamente em duas categorias, a primeira se baseia na estimativa da altura de todos os fustes inventariados e a segunda, frequentemente realizada, que envolve estimativa de altura apenas para aqueles que tiveram somente o diâmetro medido (SCOLFORO et al., 2015; MARTINS et al., 2021; DANTAS et al., 2020; SOARES et al., 2021). Esta última categoria resulta em um vetor hipsométrico que mescla alturas estimadas e medidas em campo.

A aplicação de diferentes métodos estatísticos para a estimativa biométrica se relaciona ao fato de que pequenas melhorias em acurácia representam ganhos significativos na qualidade do gerenciamento de informações florestais (LAFETÁ et al., 2020). Mediante o exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito de alternativas do uso de relações hipsométricas na altura e volume em um povoamento seminal de eucalipto.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido em uma unidade de manejo seminal de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell. no município de Minas Novas-MG, nas coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator) 778.263m E e 8.077.359 N (Datum Sirgas 2000, Zona 23S). O clima da região foi classificado como “Aw” pelo sistema internacional de Köppen, com chuvas de verão e estação seca definida. Conforme normais climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), as médias anuais de temperatura e precipitação são de 23° C (médias variando de 20°C em junho e julho a 25°C em fevereiro e outubro) e 960 mm (médias variando de 2 mm em junho e agosto a 199 mm em dezembro), respectivamente.

A unidade de manejo seminal foi implantada sob arranjo espacial de 6,00 × 1,25 m em dezembro de 2015, totalizando 33,04 ha. O inventário florestal foi realizado aos 60 meses de

idade, sendo distribuídas aleatoriamente 10 parcelas retangulares de 552 m² (18,4 × 30,0 m) sobre relevo plano (intensidade amostral de 1,67%). Foram mensurados o diâmetro com casca à altura do peito (DAP – à altura de 1,30 m do solo, cm) de todos os fustes e a altura total (H, m) daqueles 10 primeiros com auxílio de suta mecânica e hipsômetro eletrônico Haglof, respectivamente.

Foram testados três métodos de modelagem hipsométrica utilizando informações exclusivas de DAP como variável preditora, assim discriminados: regressão linear, regressão não linear e MVS. As análises das regressões linear e não linear foram realizadas através do método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) e o método iterativo de Levenberg-Marquardt, respectivamente. Os modelos hipsométricos testados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Modelos hipsométricos testados para a estimativa da altura em um povoamento seminal de eucalipto aos 60 meses de idade

Id.	Modelos hipsométricos	Autor(es)
----- Lineares -----		
(1)	$H = \beta_0 + \beta_1 \cdot DAP + \varepsilon$	Linear simples
(2)	$H = \beta_0 + \beta_1 \cdot DAP + \beta_2 \cdot DAP^2 + \varepsilon$	Trorey (1932)
(3)	$H = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(DAP) + \varepsilon$	Henricksen (1950)
(4)	$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(DAP) + \varepsilon$	Stoffels e Soest (1953)
(5)	$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 \cdot (1/DAP) + \varepsilon$	Curtis (1967)
----- Não linear -----		
(6)	$H = \frac{\beta_0}{1 + \beta_1 e^{-\beta_2 DAP}} + \varepsilon$	Logístico
(7)	$H = \beta_0 e^{-e^{\beta_1 - \beta_2 DAP}} + \varepsilon$	Gompertz (1825)

Id. = Identificação; ε = erro aleatório; e β_0 , β_1 e β_2 = coeficientes de regressão.

Realizou-se um diagnóstico formal das premissas do método MQO, sendo avaliadas a normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk e homogeneidade de variâncias por Breusch-Pagan. A fim de se avaliar a presença de multicolinearidade do modelo de Trorey (1932), calculou-se o Valor de Inflação da Variância (VIF).

A construção de máquinas de vetores se baseou no processo de aprendizado estatístico descrito em detalhes por Vapnik (1995) e Meyer et al. (2017). As MVS foram implementadas usando o pacote R “e1071” (MEYER et al., 2017) com parâmetro de custo igual a 2, gama de 0,1 e épsilon de 1; parâmetros definidos por análise exploratória, com valores oscilando entre 0,001 e 10. Para a parametrização das MVS, foram analisados quatro tipos de funções Kernel

(linear, base radial, sigmoidal e polinomial). Funções Kernel são algoritmos que ampliam o poder computacional das máquinas de aprendizagem, permitindo a representação de fenômenos complexos.

A seleção de uma relação hipsométricas para representar cada método de modelagem se baseou na significância de parâmetros pelo teste t, Média dos Desvios Absolutos (MDA), Raiz Quadrada do Erro Médio (RQEM), e coeficiente de correlação (r) entre valores observados e estimados. As análises gráficas consistiram na inspeção estatística da dispersão dos resíduos e dos valores observados em relação àqueles estimados. Os pontos que extrapolaram a tendência geral dos dados não foram eliminados das análises estatísticas a fim de se verificar a capacidade das regressões e SVM em lidar com outliers ou ruídos.

Avaliaram-se duas abordagens para a aplicação de relações hipsométricas, uma a qual se estima a altura de todos os fustes inventariados (P1, alturas estimadas) e outra pautada na estimativa de altura apenas daqueles indivíduos que tiveram somente o DAP mensurado (P2, combinação de alturas medidas e estimadas). O volume individual com casca dos fustes (V , $m^3 \text{ ind}^{-1}$) foi calculado empregando a equação abaixo, obtida pelo ajuste do modelo de Spurr (SPURR, 1962).

$$\ln(V) = -10,413796 + 1,032427 \ln(DAP H^2); R^2 = 0,9918.$$

Os dados hipsométricos e volumétricos foram submetidos à análise de Boxplot e cálculos descritivos (média, mediana, coeficiente de variação e, pelo método dos momentos, curtose e assimetria). O teste t não pareado foi realizado para as comparações entre as duas abordagens para a aplicação de relações hipsométricas. Para diagnóstico de efeito estatístico, empregaram-se 1 e 5% de significância em todas as análises. Estas foram efetuadas com auxílio do software R versão 3.5.2 (R CORE TEAM, 2018).

3 RESULTADOS

As regressões lineares apresentaram normalidade de resíduos e variâncias homogêneas. O valor de inflação da variância do modelo de Trorey (1932) ajustado foi de 76, indício de multicolinearidade. Os coeficientes e a qualidade de ajuste dos modelos hipsométricos lineares e não linear testados se encontram na Tabela 2. Todos os coeficientes das equações foram significativos ($p \leq 0,05$), exceto nas equações obtidas com os modelos de Trorey (1932), Henriksen (1950) e Gompertz (1825). Estas três equações foram descartadas das análises

gráficas subsequentes. Em geral, as equações apresentaram poucos desvios (baixos valores de RQEM e MDA) e correlações de Pearson maiores do que 0,76. As equações provenientes dos modelos linear de Curtis (1967) e não linear Logístico exibiram a melhor qualidade de ajuste. Como esperado, a assíntota deste modelo, representada pelo parâmetro “ β_0 ”, foi positiva.

Tabela 2. Coeficientes e qualidade de ajuste dos modelos hipsométricos para fustes contidos em um povoamento seminal de eucalipto aos 60 meses de idade.

Id.	β_0	β_1	β_2	MDA	RQEM	r
----- Regressões lineares -----						
(Linear Simples)	10,803598**	0,522157**	-	0,7937	0,9818	0,7388**
(Trorey (1932))	2,632411 ^{ns}	1,980541**	-0,062712**	0,7375	0,9181	0,7764**
(Henricksen (1950))	2,291767 ^{ns}	5,990708**	-	0,7608	0,9452	0,7609**
(Stoffels e Soest (1953))	1,922618**	0,368971**	-	0,7707	0,9572	0,7543**
(Curtis (1967))	3,173857**	-3,929461**	-	0,7467	0,9341	0,7676**
----- Regressão não linear -----						
(Logístico)	19,221815**	2,809407*	0,270025**	0,7426	0,9254	0,7723**
(Gompertz (1825))	19,441822**	0,587214 ^{ns}	0,228251**	0,7438	0,9272	0,7713**

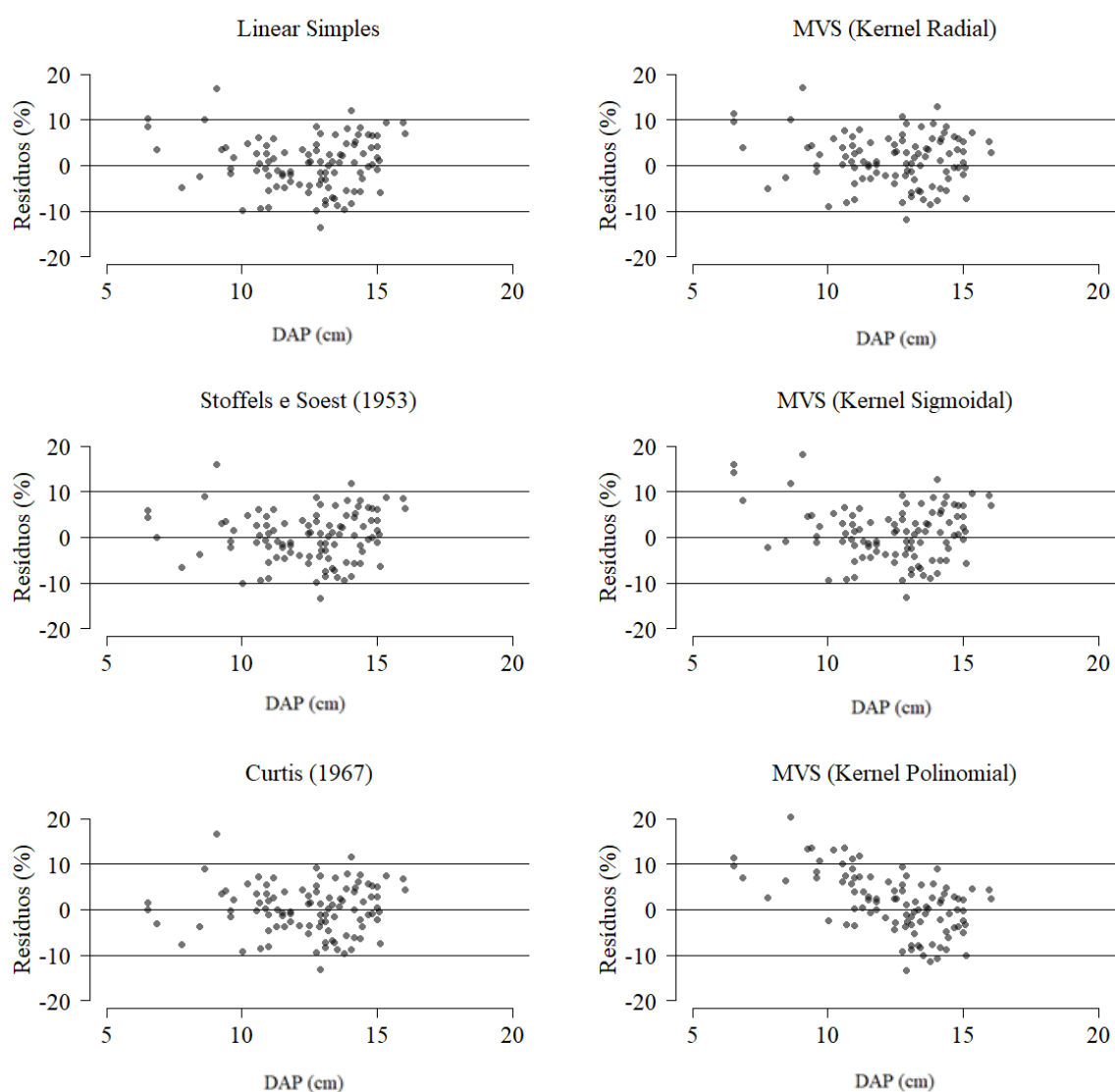
*, ** significativo ao nível de confiança de 99 e 95% de probabilidade pelo teste t. ^{ns} não significativo ao nível de confiança de 95% de probabilidade pelo teste t.

Dentre as funções Kernel, as MVS de base radial tiveram a melhor qualidade de parametrização e desempenho para a estimativa da altura de fustes de eucalipto, além da maior simplicidade expressa pelo reduzido número de vetores (Tabela 3). Em geral, os resíduos percentuais dos métodos modelagem hipsométrica aproximaram visualmente de uma distribuição homocedástica, exceto quando se adotou as máquinas de vetor com função Polinomial (Figura 1). Os resíduos foram mais próximos ao eixo das abcissas nas equações obtidas com os ajustes dos modelos de Curtis (1967) (regressão linear), Logístico (regressão não linear) e MVS com função Kernel de base radial, sendo, portanto, selecionados para a geração de curvas hipsométricas e sua respectiva aplicação.

Tabela 3. Estatísticas das aproximações por máquinas de vetores de suporte construídas para a estimativa da altura de fustes em um povoamento seminal de eucalipto aos 60 meses de idade.

Função Kernel	Número de vetores	MDA	RQEM	r
Radial	14	0,7426	0,9254	0,7723**
Sigmoidal	19	0,7689	0,9411	0,7755**
Polinomial	25	0,8179	1,0110	0,7246**
Linear	19	0,9421	1,1802	0,6487**

** significativo ao nível de confiança de 99% de probabilidade pelo teste t.



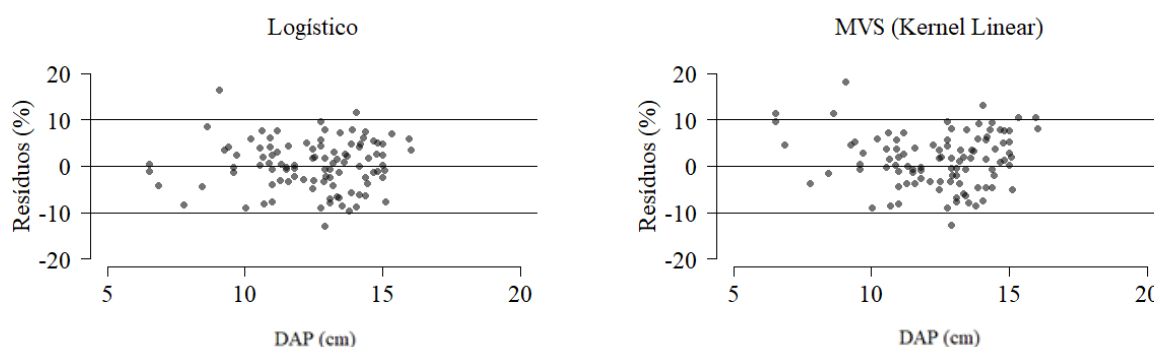


Figura 1. Distribuição de resíduos percentuais da altura (m) e volume ($\text{m}^3 \text{ ind.}^{-1}$) de eucalipto para diferentes métodos de modelagem hipsométrica. MVS = máquinas vetor de suporte.

As curvas hipsométricas obtidas das relações hipsométricas selecionadas para cada método de modelagem se encontram na Figura 2. O clássico comportamento sigmoidal, na forma de S, foi mais evidente na curva hipsométrica com o uso de MVS com função Kernel de base radial, iniciando-se com uma fase de crescimento lento da altura em relação ao diâmetro, seguido de uma intensificação e redução do crescimento.

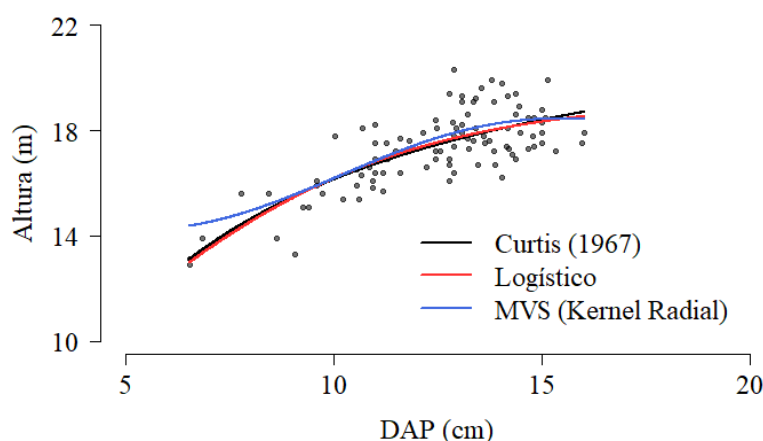


Figura 2. Curvas das equações hipsométricas geradas para um povoamento seminal de eucalipto aos 60 de idade. MVS = máquinas vetor de suporte.

No que se referem a altura e o volume individual dos fustes, as médias não se diferiram estatisticamente ($p > 0,05$) entre as duas abordagens para aplicação de relação hipsométrica. Por outro lado, os coeficientes de variação da altura e volume relacionados à abordagem P2 tenderam a ser um pouco maior que aquela de P1 em todos os métodos de modelagem (Tabela 4). Fato este que pode ser confirmado pela análise de Boxplot, cujo intervalo compreendido

entre limites inferior e superior (calculado com informações do intervalo interquartil) foi menor com aplicação da abordagem P1, estimando a altura de todos fustes inventariados (Figura 3). A distribuição em formato de cume (leptocúrtica) e assimetria negativa foram observadas em todas as abordagens avaliadas.

Tabela 4. Estatística descritiva de altura (m) e volume ($\text{m}^3 \text{ ind.}^{-1}$) para um povoamento seminal de eucalipto aos 60 de idade, empregando diferentes métodos de modelagem e abordagens para aplicação de relações hipsométricas

Abordagem	Relação hipsométrica	Média	Mediana	CV (%)	Curtose	Assimetria
----- Altura -----						
P1	Curtis (1967)	17,2573	17,5735	6,7053	5,0455	-1,4238
	Logístico	17,2738	17,6492	6,7373	5,5696	-1,6205
	MVS (Kernel Radial)	17,4364	17,8435	6,1835	3,3869	-1,1799
P2	Curtis (1967)	17,2607	17,5667	6,9974	4,7155	-1,2134
	Logístico	17,2738	17,6430	7,0222	5,0853	-1,3677
	MVS (Kernel Radial)	17,4128	17,8363	6,5776	3,7157	-1,0677
----- Volume -----						
P1	Curtis (1967)	0,1092	0,1115	37,7360	2,4300	-0,1299
	Logístico	0,1093	0,1120	37,4897	2,4077	-0,1709
	MVS (Kernel Radial)	0,1102	0,1133	37,2528	2,2933	-0,2008
P2	Curtis (1967)	0,1093	0,1115	37,7310	2,4213	-0,1382
	Logístico	0,1093	0,1120	37,5127	2,3974	-0,1754
	MVS (Kernel Radial)	0,1101	0,1130	37,2994	2,2941	-0,2032

P1 = estimativa da altura de todos os fustes inventariados (alturas estimadas). P2 = estimativa de altura apenas daqueles indivíduos que tiveram somente o DAP mensurado (P2, combinação de alturas medidas e estimadas). CV = coeficiente de variação. MVS = máquinas vetor de suporte.

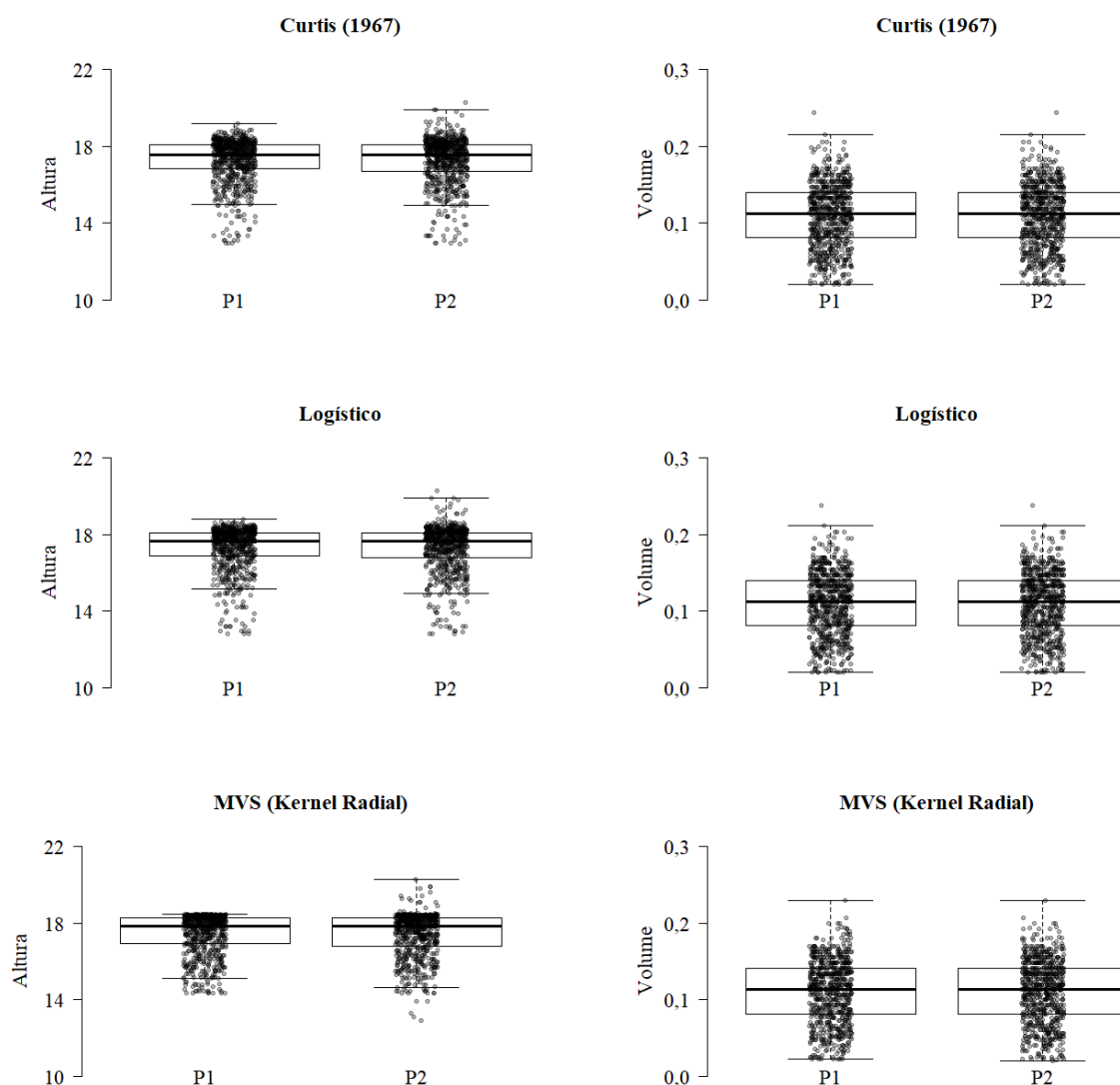


Figura 3. Boxplot de altura (m) e volume (m³) de eucalipto empregando diferentes métodos de modelagem e abordagens para aplicação de relações hipsométricas. MVS = máquinas vetor de suporte.

Os volumes por unidade de área aos 60 meses de idade calculados empregando as regressões linear (Curtis, 1967) e não linear (Logístico) coincidiram entre procedimentos para uso de relação hipsométrica. Os volumes foram de 143,8 m³ ha⁻¹ (CV de P1 = 8,73% e CV de P2 = 9,00%) e 143,9 m³ ha⁻¹ (CV de P1 = 8,70% e CV de P2 = 8,97%) com o ajuste dos modelos de Curtis (1967) e Logístico, respectivamente. Para as MVS (Kernel Radial), os volumes foram de 142,7 m³ ha⁻¹ (CV = 8,65%) no procedimento P1 e de 143,8 m³ ha⁻¹ (CV = 8,73%) no P2.

4 DISCUSSÃO

Relações hipsométricas são imprescindíveis para a otimização da rotina operacional no inventário florestal e compreensão da dinâmica de crescimento florestal. Estabeleceram-se 11 relações funcionais para a estimativa da altura de fustes para o povoamento seminal de eucalipto aos 60 meses de idade (Tabelas 2 e 3), sendo selecionadas aquelas três relações, uma por método de modelagem, de melhor qualidade de ajuste e desempenho preditivo para serem aplicadas na quantificação volumétrica. Em virtude da variabilidade genética existente em povoamentos implantados com mudas produzidas via sementes (GUIMARÃES et al., 2019; ABREU NETO et al., 2021), a qualidade dos ajustes realizados foi considerada satisfatória (Tabela 2 e 3).

A escolha do método de modelagem hipsométrica deve considerar aspectos estatísticos e biológicos para a aquisição de estimativas biométricas não enviesadas e representativas da realidade do sítio (GUJARATI; PORTER, 2011; CAMPOS; LEITE, 2017). O valor de inflação da variância do modelo de Trorey (1932) ajustado foi acima de 10, violando a premissa do método MQO de ausência da multicolinearidade (GUJARATI; PORTER, 2011). Nestas circunstâncias, o parâmetro da regressão deixa de refletir os efeitos inerentes de particular variável independente sobre aquela dependente, refletindo parcialmente seu real efeito.

Do ponto de vista estatístico, as relações hipsométricas relacionadas aos ajustes dos modelos de Curtis (1967). (regressão linear), Logístico (regressão não linear) e MVS com função Kernel de base radial exibiram as melhores qualidades preditivas conforme seu respectivo método de modelagem (Tabelas 2 e 3; Figura 1). As curvas de altura-diâmetro dessas três relações hipsométricas exibiram comportamento ascendente, com crescimento monotônico e tendência assintótica (Figura 2), fato que é o esperado biologicamente para o crescimento vegetal (TAIZ et al., 2017).

No entanto, duas limitações foram observadas nas MVS com função Kernel de base radial, a tendência de superestimativa da altura de fustes com menor DAP e a clara definição do ponto de inflexão (aproximadamente, DAP de 10cm e H de 16m) em sua curva hipsométrica. A superestimativa da altura de fustes empregando tal MVS também refletiu de forma direta no volume médio dos fustes (Tabela 4). Salienta-se que, embora a curva sigmoide seja considerada o modelo teórico mais biologicamente apropriado para relações hipsométricas, o ponto de inflexão ocorre com frequência em fustes de menores dimensões e em idades as quais a altura ainda não foi tomada (BATISTA et al., 2014).

Os dois métodos de regressão geraram estimativas médias de altura e volume próximas entre si, diferenciando-se em termos centesimais para o primeiro atributo biométrico e em

décimos milésimos para o segundo. Embora a facilidade de ajuste favoreça a regressão linear, a mesma possui como desvantagens as diversas premissas intrínsecas ao método MQO (GUJARATI; PORTER, 2011; CAMPOS; LEITE, 2017). Este fato pode, em alguns casos, tornar a modelagem utilizando procedimentos iterativos mais atrativa do ponto de vista estatístico. Para o banco de dados estudado, a equação obtida com o ajuste do modelo Logístico exibiu desempenho preditivo um pouco superior com vistas estatísticas e biológicas em comparação com as demais relações hipsométricas estabelecidas.

Relações hipsométricas podem ser aplicadas com diferentes abordagens. A aplicação das relações hipsométricas com a estimativa da altura de todos os fustes inventariados deve ser vista com bastante cautela, pois a influência da qualidade da modelagem se torna mais evidente na estimativa da altura e do volume. Não obstante, a dispersão de altura dos fustes inventariados foi visualmente maior na ocasião em que se combinou valores hipsométricos estimados e observados (P2), especialmente acima do terceiro quartil (Figura 3). Em termos médios e de variância, não se identificou diferenças estatísticas significativas para altura e volume individual ($p > 0,05$) entre as abordagens para aplicação de relação hipsométrica.

A tendência de aumento da variabilidade do volume individual e por unidade de área diante da combinação de alturas observadas e estimadas em relação ao uso apenas de estimativas hipsométricas foi confirmada. Este fato corrobora com Batista et al. (2014), que descreve a possibilidade da qualidade das estimativas volumétricas se tornar bastante variável ao se misturar valores observados e estimados de altura. Além disso, tem-se a expectativa de que povoamentos implantados com mudas seminais apresentem maior variabilidade biométrica de fustes do que aqueles clonais, o que aumentaria a possibilidade de se incorrer em estimativas volumétricas enviesadas.

Menores variabilidades do volume por unidade de área são importantes para o atendimento aos erros de amostragem previamente estabelecidos em legislações estaduais ou contratos específicos. Enfatiza-se que o erro de amostragem é rotineiramente calculado em inventários florestais convencionais, como declarações de colheita florestal. Portanto, identificou-se, como mais apropriado, a aplicação da relação hipsométrica para a estimativa da altura de todos os fustes inventariados. Batista et al. (2014), também, sugere tal abordagem a fim de se evitar vícios na predição do volume, sobretudo, em talhões comerciais de maior heterogeneidade.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos fornecem subsídios importantes para o desenvolvimento de futuras pesquisas sobre a mensuração florestal e aplicação prática de relações hipsométricas. A escolha adequada do método de modelagem é fundamental para a qualidade preditiva da altura e volume, porém o planejamento da abordagem de sua aplicação se mostrou necessário para minimizar vícios preditivos. A aplicação da relação hipsométrica com a estimativa de altura de todos os fustes inventariados se mostrou promissora para reduzir a variabilidade biométrica e melhor operacionalizar a rotina do analista florestal.

A estimativa da altura de todos os fustes inventariados é uma alternativa para a aplicação de relações hipsométricas apropriadamente estabelecidas e não compromete a quantificação volumétrica florestal. Os volumes calculados a partir da estimativa da altura de todos os fustes inventariados ou da combinação de alturas observadas e estimadas não se diferenciam estatisticamente no sítio em estudo e a modelagem hipsométrica por regressão e máquinas vetor de suporte são adequadas para a estimativa da altura em inventários florestais.

REFERÊNCIAS

- ABREU NETO, R.; ABREU, M. C.; SOARES, A. A. V.; MONTE, M. A.; ARAÚJO, E. J. G.; CURTO, R. A.; MIRANDA, N. A. Describing the structure and relationship of height and diameter in an old unmanaged *Eucalyptus* spp. plantation. **Floresta e Ambiente**, v. 28, n. 3, e20200087, 2021.
- BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. Z.; SILVA FILHO, D. F. **Quantificação de recursos florestais: árvores, arvoredos e florestas**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 384p.
- BUENO, G. F.; COSTA, E. A. comparação preditiva de modelos hipsométricos em plantio de eucalipto: equação de regressão e redes neurais artificiais. **Enciclopédia Biosfera**, v. 17, n. 32, p. 654-664, 2020.
- CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 5. ed. Viçosa, MG: UFV, 2017. 636p.
- CURTIS, R. O. Height, diameter and height diameter age equations for second growth Douglas-fir. **Forest Science**, v. 13, n. 4, p. 365-375, 1967.
- DANTAS, D.; PINTO, L. O. R.; TERRA, M. C. N. S.; CALEGARIO, N.; OLIVEIRA, M. L. R. Reduction of sampling intensity in forest inventories to estimate the total height of eucalyptus trees. **Bosque**, v. 41, n. 3, p. 353-364, 2020.
- GOMPERTZ, B. On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences**. v. 115, p. 513-585, 1825.
- GUIMARÃES, C. C.; SCHUMACHER, M. V.; MOMOLLI, D. R.; SOUZA, H. P.; LUDVICHAK, A. A.; MALHEIROS, A. C. Biomass production and nutritional efficiency in *Eucalyptus* genotypes in the Pampa biome. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 34, n. 6, p. 1-10, 2019.

GUJARATI, D.N.; PORTER, D.C. **Econometria básica**. 5. Ed. Porto Alegre - RS: AMGH Editora Ltda., 2011. 924p.

HENRICKSEN, H. A. Height-diameter curve with logarithmic diameter: brief report on a more reliable method of height determination from height curves, introduced by the State Forest Research Branch. **Dansk Skovforen Tidsskr**, v. 35, p. 193-202, 1950.

KUMAR, V. A.; SOUZA, D.; LINDÉN, R.; LAAKSON, M. Prediction of student final exam performance in an introductory programming course: development and validation of the use of a support vector machine-regression model. **Asian Journal of Education and e-Learning**, v. 7, n. 1, p. 2321-2454, 2019.

LAFETÁ, B. O.; SILVA, F. F.; SANTOS, M. A.; PIMENTA, I. V.; FONTAN, I. C. I.; FONSECA, N. R.; SARTORI, C. J. Modelagem morfométrica de *Licania tomentosa* (Benth.) por regressão logística e máquinas vetor de suporte. **Scientia Plena**, v. 16, n. 6, 060206, 2020.

MARTINS, J. F. C.; SILVA, D. A.; BEHLING, A.; RIBEIRO, R. Modelagem hipsométrica de povoamentos de acácia-negra usando linguagem de programação Julia. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 6, n. 2, p. 133-152, 2021.

MEYER, D.; DIMITRIADOU, E.; HORNIK, K.; WEINGESSEL, A.; LEISCH, F.; CHANG, C.; LIN, C. e1071: Misc Functions of the Department of Statistics, Probability Theory Group (Formerly: E1071), TU Wien. R package version 1.6-8, 2017.

MIGUEL, E. P.; SILVA, L. D. D.; PANIAGO, G. F.; GODINHO, O. L.; ONO, H. A.; PEGORATO, M. L.; LEAL, A. J. F.; PIREZ, J. Hypsometric modeling hybrid clonal *Eucalyptus* stands. **Revista Agrarian**, v. 11, n. 40, p. 159-167, 2018.

NICOLETTI, M. F.; LAMBERT, L.; SOARES, P. R. C.; CRUZ, G. S.; ALMEIDA, B. R. S.; STEPKA, T. F. Equações hipsométricas, volumétricas e funções de afilamento para *Pinus* spp. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v.19, n. 4, p. 474-482, 2020.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. 2018.

- SANQUETTA, M. N. I.; SANQUETTA, C. R.; MOGNON, F.; CORTE, A. P. D.; RODRIGUES, A. L.; MAAS, G. C. B. Ajuste de equações hipsométricas para a estimação da altura total de indivíduos jovens de teca. **Científica**, v. 43, n. 4, p.400-406, 2015.
- SCOLFORO, H. F.; RAIMUNDO, M. R.; SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M.; BATISTA, A. P. B.; BULLOCK, B. Hypsometric approaches to *Eucalyptus* experiments in Brazil. **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 45, p. 4176-4184, 2015.
- SHARMA, R. P.; VACEK, Z.; VACEK, S.; KUČERA, M. Modelling individual tree height–diameter relationships for multi-layered and multi-species forests in central Europe. **Trees Structure and Function**, v. 33, n. 1, p. 103–119, 2019.
- SOARES, G. M.; SILVA, L. D.; HIGA, A. R.; SIMON, A. A.; SÃO JOSÉ, J. F. B. Artificial neural networks (ANN) for height estimation in a mixed-species plantation of *Eucalyptus globulus* Labill and *Acacia mearnsii* de Wild. **Revista Árvore**, v. 45, e4512, 2021.
- SPURR, S. A Measure of point density. **Forest Science**, v. 8, n. 1, p. 85-96, 1962.
- STOFFELS, A., SOEST, J. V. The main problems in sample plots. **Ned Bosbouwtijdschr**, v. 25, p. 190-199, 1953.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. & MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6.ed. Porto Alegre, RS: Artmed, 2017. 888p.
- TÉO, S. J.; SILVA, T. C. General height-diameter equation depending on the stand variables, for *Eucalyptus benthamii*. **Floresta e Ambiente**, v. 27, n. 4, e20180302, 2020.
- TROREY, L. G. A. A mathematical method for construction of diameter-height curves based on site. **Forest Chronicle**, v. 8, n. 2, p. 121-132, 1932.
- VAPNIK, V. N. **The nature of statistical learning theory**. New York: Springer-Verlag, 1995. 188p.

VIEIRA, G. C.; MENDONÇA, A. R.; SILVA, G. F.; ZANETTI, S. S.; SILVA, M. M.; SANTOS, A. R. Prognoses of diameter and height of trees of eucalyptus using artificial intelligence. **Science of the Total Environment**, v. 619-620, p. 1473-1481, 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA DO BRASIL – INMET. Normais Climatológicas (1961/1990). Brasília - DF, 1992.