FATOR DE FORMA E EQUAÇÕES VOLUMÉTRICAS PARA O CLONE I-144 EM JATAÍ, GO

Pedro Sepulveda Neto[1], Thelma Shirlen Soares[1], Edmilson Santos Cruz[1].

[1]Universidade Federal de Jataí, Curso de Engenharia Florestal, Câmpus Jatobá, BR 364, km 195, nº 3800 - 75801-615 - Jataí-GO, Brasil, pedros_neto@hotmail.com, thelmasoares@ufj.edu.br; edmilson_santos_cruz@ufj.edu.br.

Resumo

Este estudo foi realizado em um povoamento de *Eucalyptus* sp. com idade de quatro anos, implantado no espaçamento 3 x 2 m e com o Clone I-144 (urograndis) localizado em Jataí, GO, cujo objetivo foi de gerar equações volumétricas, de simples e de dupla entrada, e fatores de forma médio e por classe diamétrica. Foram cubadas 32 árvores incluídas em quatro classes diamétricas (oito árvores por classe de diâmetro, com amplitude de 3 cm) e ajustados modelos volumétricos lineares e não lineares, de simples e de dupla entrada. A seleção das equações foi baseada no coeficiente de determinação, no erro padrão da estimativa e na análise gráfica dos resíduos percentuais. O fator de forma obtido foi de 0,5159. Todas as equações volumétricas apresentaram bons resultados quanto ao coeficiente de determinação ajustado e ao erro padrão da estimativa, porém com ligeira tendenciosidade na distribuição gráfica dos resíduos para algumas equações. Foram selecionadas as equações de simples entrada de Berkhout e de dupla entrada de Ogaya com melhores resultados para estimativa do volume do Clone I-144.

Palavras-chave: *Eucalyptus* sp. Cubagem. Volumetria.

Área do Conhecimento: Engenharia Agronômica.

Introdução

A grande diversidade de espécies madeireiras tem permitido ao ser humano manejá- las, utilizando aquelas com propriedades desejáveis para diferentes finalidades, com considerável impacto econômico dos produtos madeireiros. Como forma de continuar utilizando os produtos e subprodutos da madeira sem afetar diretamente as florestas nativas, têm-se dado ênfase aos materiais oriundos de reflorestamentos, sendo *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp. as principais culturas utilizadas no Brasil, que são espécies de rápido crescimento, alta adaptabilidade e desenvolvimento em diferentes condições edafoclimáticas, tornando-as rentáveis e suprindo a demanda em larga escala.

De acordo com relatório da Indústria Brasileira de Árvores (IBA, 2023), a área ocupada com árvores plantadas no Brasil atingiu 9,94 milhões de hectares em 2022. Deste total, 76% e 19%, respectivamente, correspondem aos plantios com *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp., sendo os 5% restantes plantados com outras espécies, principalmente seringueira, teca e acácia. O destino da madeira oriunda dos plantios em 2022 incluiu os segmentos de celulose e papel (28%), carvão vegetal (11%), pisos e painéis de madeira (4%), madeira serrada e produtos sólidos (3%), produtos florestais independentes (46%), além das áreas de investidores institucionais (8%).

Especificamente para a cultura de *Eucalyptus* spp. no Estado de Goiás, ocorreu um crescimento na área plantada no período 2012-2022, passando de 131.999 ha para 181.962 ha (IBA, 2023). Em Goiás, o eucalipto tem atendido parcialmente os segmentos consumidores de madeira para energia (alimentos, frigoríficos, cerâmica e outros), constituindo um mercado ainda considerado incipiente e sazonal, embora algumas ações estejam fazendo com que a silvicultura possa vislumbrar possibilidades potenciais de desenvolvimento.

O Estado de Goiás apresenta potencial para crescimento do setor de florestas plantadas em várias de suas regiões e, principalmente, demanda por produtos de base florestal (serrarias, construção civil, embalagens entre outros), além da expansão do agronegócio, que necessita de plantios florestais para produção de energia (REIS et al., 2015).

O cenário atual e a projeção para os próximos anos da oferta e demanda de madeira advinda de reflorestamentos apontam para um excesso na demanda em diversos setores consumidores, exceto o setor de celulose e papel, que se mantêm autossuficiente. Este fato é comprovado pelo aumento gradativo do preço da maioria dos produtos advindos de florestas plantadas nos últimos anos, tornando ainda mais atrativa a silvicultura com eucalipto e outras espécies, no Brasil e em Goiás, como alternativa ao uso de florestas nativas e possibilidade de atender o mercado (VITAL, 2009).

Então, para assegurar o manejo florestal sustentável, é imprescindível conhecer a produtividade das florestas para as mais variadas variáveis dendrométricas, sendo o volume uma das mais utilizadas, tanto para populações plantadas quanto nativas, podendo ser obtido para a árvore toda (volume total) ou partes dela (tronco, raízes, galhos), com ou sem casca. Em inventários florestais, a estimativa do volume das árvores individuais é realizado por meio de equações volumétricas ou fatores de forma, sendo que a cubagem constitui uma atividade essencial e corriqueira para gerar tais estimativas.

Em Goiás, ainda são escassos os estudos relacionados à cubagem, ao ajuste de modelos volumétricos e à obtenção de fatores de forma e de empilhamento para as florestas de *Eucalyptus* sp. Dada a necessidade de ampliar os estudos relacionados à quantificação da produtividade volumétrica das florestas de eucalipto em Goiás, associado ao potencial de crescimento desta cultura no referido estado, desenvolveu este estudo com o objetivo de gerar e indicar equações volumétricas, de simples e de dupla entrada, e fator de forma para um povoamento de *Eucalyptus* sp. com quatro anos de idade, implantado no espaçamento 3 x 2 m e localizado em Jataí, GO.

Metodologia

A área de estudo está localizada no município de Jataí, GO, com coordenadas de 51°35'0,732"O e 17°52'30,203"S, pertencente à Microrregião do Sudoeste de Goiás.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen atualizada por Alvares et al. (2014), é do tipo Aw, definido por duas estações bem definidas, com inverno seco e verão chuvoso. A temperatura média anual é de 22,5°C e a precipitação total anual de 1.623,7 mm (OLIVEIRA, 2021). O solo predominante é o Latossolo Vermelho distroférrico (EMBRAPA, 2018).

Especificamente, a área de estudo é uma população de 2,7171 ha de Eucalyptus sp. com quatro anos de idade, implantada no espaçamento 3 x 2 m com a finalidade de produzir madeira para energia, composta pelo Clone I-144 (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*).

Por meio do inventário florestal, foi obtida a distribuição de frequência por classe diamétrica da população. Foi utilizada uma amplitude de classe de 3 cm e considerado o limite inferior da primeira classe correspondente ao diâmetro mínimo de inclusão, isto é, 5 cm (método empírico), obtendo-se quatro classes diamétricas. A amostragem da cubagem incluiu 32 árvores, sendo oito árvores por classe diamétrica.

As árvores selecionadas para compor a amostra tiveram a circunferência à 1,30 m em relação ao nível do solo (CAP) medida com fita métrica. Posteriormente, as árvores foram derrubadas e a cubagem foi realizada até 3 cm de diâmetro com casca, em seções de 2 m de comprimento, medidas com trena, e dois diâmetros ortogonais, com suta, nas extremidades de cada seção. Além disso, também foram levantadas, com trena, a altura total, a altura comercial (até 3 cm de diâmetro com casca) e a altura do toco. A porção da árvore com diâmetro inferior a 3 cm foi considerada com resíduo.

A quantificação do volume total das árvores correspondeu à soma do volume do toco, volume do resíduo (ponta ou cone) e volume comercial. No cálculo do volume comercial, os volumes das seções foram calculados de acordo com o método de Smalian.

Para cada árvore, o fator de forma (f) foi obtido pela relação entre o volume sólido e o volume do cilindro.

Com o volume total (variável dependente) das 32 árvores, obtidos pela cubagem de acordo com o método de Smalian, foram ajustados os modelos volumétricos lineares e não lineares de simples entrada, que consideram apenas o DAP como variável independente (Tabela 1), e de dupla entrada, que consideram o DAP e a altura total como variáveis independentes (Tabela 2).

Tabela 1 - Modelos volumétricos de simples entrada ajustados para o Clone I-144 em Jataí, GO.

Autores do modelo	Modelo matemático
Kopezky-Gehrardt	$V = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \varepsilon$
Dissescu-Meyer	$V = \beta_1 d + \beta_2 d^2 + \varepsilon$
Hohenadl-Krenm	$V = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 + \varepsilon$
Berkhout	$V = \beta_0 d^{\beta_1} + \varepsilon$
Husch	$\ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \ln(d) + \ln(\varepsilon)$
Brenac	$\ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \ln(d) + \beta_2 \ln(1/d) + \ln(\varepsilon)$

Em que : V = volume total (m³); d = diâmetro à 1,30 m (DAP); ln = logaritmo natural; β_0, β_1, β_2 = parâmetros a serem estimados; ε = erro. Fonte: SCHNEIDER (1998); SCOLFORO (2005).

Tabela 2 - Modelos volumétricos de dupla entrada ajustados para o Clone I-144, em Jataí, GO.

Autores do modelo	Modelo matemático
Spurr	$V = \beta_0 + \beta_1 d^2 h + \varepsilon$
Schumacher e Hall	$V = \beta_0 d^{\beta_1} h^{\beta_2} + \varepsilon$
Honner	$V = d^2/[\beta_0 + \beta_1(1/h)] + \varepsilon$
Ogaya	$V = d^2(\beta_0 + \beta_1/h) + \varepsilon$
Stoate	$V = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 d^2 h + \beta_3 h + \varepsilon$
Naslund	$V = \beta_1 d^2 + \beta_2 d^2 h + \beta_3 d h^2 + \beta_4 h^2 + \varepsilon$
Takata	$V = (d^2 h)/(\beta_0 + \beta_1 d) + \varepsilon$
Spurr (linear)	$\ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \ln(d^2 h) + \ln(\varepsilon)$
Schumacher e Hall (linear)	$\ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \ln(d) + \beta_2 \ln(h) + \ln(\varepsilon)$
Meyer	$V = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 + \beta_3 dh + \beta_4 d^2 h + \beta_5 h + \varepsilon$

Em que: V = volume total (m³); d = diâmetro à 1,30 m (DAP); h = altura total (m); ln = logaritmo natural; β_0, β_1, β_2, β_3, β_4, β_5 = parâmetros a serem estimados; ε = erro. Fonte: SCHNEIDER (1998); SCOLFORO (2005).

Após o ajuste dos modelos, foi selecionada a melhor equação de simples e de dupla. Esta seleção baseou-se nos seguintes critérios: distribuição gráfica dos resíduos, erro padrão da estimativa e coeficiente de determinação ajustado.

Para as equações volumétricas cuja variável dependente foi transformada para escala logarítmica, foi realizada a correção multiplicando-se a variável estimada pelo fator de correção de Meyer (FM), conforme metodologia aplicada por Machado et al. (2008).

Resultados

O fator de forma médio obtido foi de 0,5159. Na Tabela 3 são apresentados os fatores de forma por classe diamétrica. houve diferença significativa (α=0,05) entre os fatores de forma por classe diamétrica, em que o fator de forma da primeira classe diamétrica (6,5 cm) foi estatisticamente diferente das demais classes diamétricas (9,5 cm; 12,5 cm; 15,5 cm), sendo estas estatisticamente iguais entre si.

Tabela 3 - Fatores de forma por classe diamétrica para o Clone I-144 em Jataí, GO.

Classe diamétrica (cm)	Fator de forma
5,0 |- 8,0	0,55 a
8,0 |- 11,0	0,50 b
11,0 |- 14,0	0,51 b
14,0 |- 17,0	0,48 b

Em que: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste t com 95% de probabilidade de confiança.

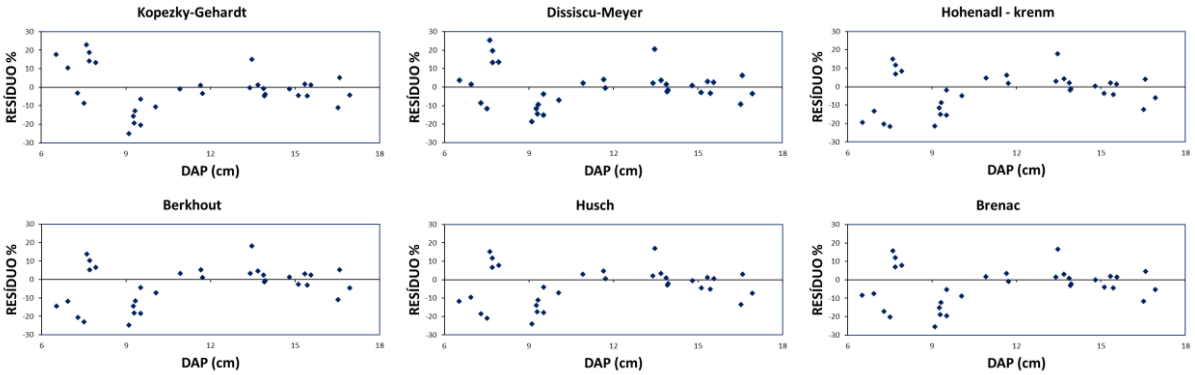
Na Tabela 4 estão os resultados do ajuste dos seis modelos de simples entrada, enquanto na Figura 1 estão apresentadas as distribuições gráficas dos resíduos percentuais para cada uma das equações geradas.

Tabela 4 - Equações volumétricas de simples entrada para a estimativa do volume total com casca para o Clone I-144, Jataí, GO.

Autores da equação	Coeficientes da equação			S_{yx} (m^3)	S_{yx} (%)	R^2_{aj} (%)
	β_0	β_1	β_2			
Kopezky-Gehrhardt	-0,01940	-0,00082		0,0080	8,21	98,48
Dissescu-Meyer	-	-0,00339	0,00010	0,0080	8,21	96,22
Hohenadl-Krenm	-0,00917	-0,00173	0,00089	0,0081	8,31	98,44
Berkhout	0,00024	2,40577		0,0021	2,17	98,38
Husch	-8,59690	2,51170		0,0089	9,01	96,28
Brenac	-8,43850	2,46450	-0,49060	0,0089	9,09	98,22

Em que: S_{yx} = erro padrão da estimativa absoluto (m^3) e relativo (%); R^2aj (%) = coeficiente de determinação ajustado, em percentagem.

Figura 1 - Distribuição gráfica dos resíduos percentuais em função do DAP para seis equações volumétricas de simples entrada para o Clone I-144, Jataí, GO.



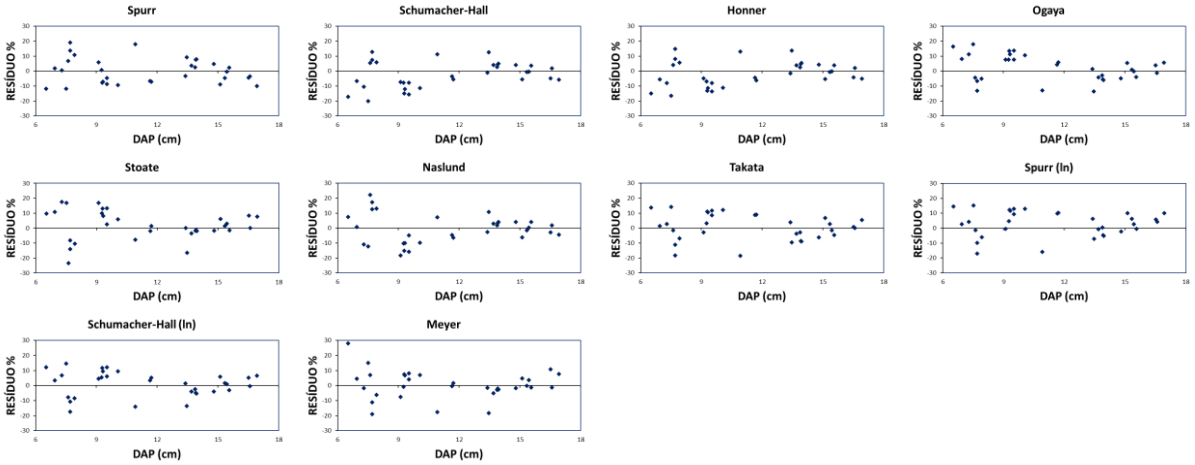
Os resultados do ajuste dos modelos de dupla entrada encontram-se na Tabela 5, cuja distribuição gráfica dos resíduos percentuais podem ser vistos na Figura 2.

Tabela 5 - Equações volumétricas de dupla entrada para a estimativa do volume total com casca para o Clone I-144, Jataí, GO.

Autores da equação	Coeficientes da equação						S_{yx} (m^3)	S_{yx} (%)	R^2_{aj} (%)
	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5			
Spurr	0,0055	0,0000						7,79	98,63
Schumacher e Hall	0,0000	2,0355	0,6153				0,0076	1,38	98,97
Honner	508,24	16249,49					0,0013	1,36	98,98
Ogaya	0,0002	0,0000					0,0013	1,42	98,94
Stoate	-0,0191	0,0004	-0,00002	0,0010			0,0014	17,62	93,37
Naslund	-	0,0006	-0,00002	0,00003	-0,0002	-	0,0172	6,77	96,12
Takata	20134,56	388,64					0,0066	1,63	98,79
Spurr (ln)	-9,7151	0,9466					0,0016	8,63	98,69
Schumacher e Hall (ln)	-9,3654	2,1017	0,6374				0,0085	7,36	98,78
Meyer	0,1641	-0,0299	0,0016	-0,0022	-0,0001	-0,0127	0,0072	6,70	98,99

Em que: S_{yx} = erro padrão da estimativa absoluto (m^3) e relativo (%); R^2aj (%) = coeficiente de determinação ajustado, em percentagem.

Figura 2 - Distribuição gráfica dos resíduos percentuais em função do DAP para 10 equações volumétricas de dupla entrada para o Clone I-144, Jataí, GO.



Discussão

Miguel et al. (2010) obtiveram fator de forma de 0,47 para uma população de *E*. *grandis* em Rio Verde, GO (localizado a 90 km de Jataí), cujo valor foi menor do que o encontrado para o Clone I-144 do presente estudo.

Franco et al. (1997) obtiveram fator de forma igual a 0,4285 para um plantio de *E*. *camaldulensis* localizado em João Pinheiro, MG, a partir da cubagem de 128 árvores com idade variando de 28 a 76 meses. Estes mesmos autores concluíram que o fator de forma fornece estimativas confiáveis desde que sejam controlados os fatores idade, espaçamento e sítio.

Dependendo da forma do tronco dos eucaliptos, o fator de forma pode variar de 0,4 a 0,6 (DUTRA; AGUIAR, 2014). No presente estudo, a faixa de variação dos fatores de forma obtidos por classe diamétrica para o Clone I-144 esteve de acordo com estes autores.

As equações apresentaram coeficientes de determinação ajustado variando de 96,12% a 98,99%; erro padrão da estimativa de 0,0013 m^3 a 0,0172 m^3, ou de 1,36% a 17,62%.

A equação de Berkhout apresentou um dos maiores valores no coeficiente de determinação ajustado, igual a 98,38%, semelhante aos estudos realizados por Miguel (2009) e Miguel et al. (2010), que também encontraram valores de coeficiente de determinação ajustado superior a 98% para o modelo de Berkhout ajustado para florestas de eucalipto em Goiás. Os bons resultados do modelo de Berkhout também apareceram no erro padrão da estimativa (0,0021 m^3 ou 2,17%).

Já as equações obtidas pelo ajuste dos modelos de Husch e Brenac apresentaram resultados bastante inferiores aos das demais equações obtidas.

Pela análise da distribuição gráfica dos resíduos percentuais (Figura 1), notou-se que, para todos os modelos, houve uma tendência de subestimativa do volume para as árvores das menores classes diamétricas.

Após análise da distribuição gráfica dos resíduos, associada às estatísticas apresentadas na Tabela 4, a equação de simples entrada de Berkhout apresentou os melhores resultados para a estimativa do volume total com casca.

Conforme apresentado na Tabela 5, as equações de Schumacher e Hall, Honner, Ogaya, Takata e Spurr (ln) apresentaram altos valores para o coeficiente de determinação ajustado, superiores a 98%. Silva (2008) encontrou resultados semelhantes para modelos de dupla entrada ajustados para uma população de *E*. *urophylla* na região norte de Goiás, tendo sido selecionado por este autor a equação de Schumacher e Hall para estimar o volume total com casca.

O menor erro padrão da estimativa foi encontrado para a equação de Honner (0,0013 m^3 ou 1,32%). Os resultados inferiores foram encontrados para a equação de Stoate.

Por meio da análise gráfica dos resíduos percentuais das equações de dupla entrada, juntamente com as estatísticas da Tabela 5, foi selecionada a equação de Ogaya como a mais adequada para estimar o volume total com casca em função do DAP e da altura total.

Conclusão

O fator de forma médio obtido para o Clone I-144 foi de 0,5159. Para obter estimativas do volume total com casca em função do DAP (equação de simples entrada), foi selecionada a equação de Berkhout. E para estimativas do volume total com casca em função do DAP e da altura total (equação de dupla entrada), selecionou-se a equação de Ogaya.

Referências

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil, Gebruder Borntraeger. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, 711–728, 2014.

DUTRA, P. J.; AGUIAR, R. **Inventário florestal em floresta de eucalipto em Pompéia - SP.** Pompéia: FATEC, 2014. 29 f. (Graduação em Tecnologia em Mecanização em Agricultura de Precisão) - Faculdade de Tecnologia "Shunji Nishimura", Pompéia, SP, 2014.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5 ed. Brasília: EMBRAPA-SPI, 2018.

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

IBÁ – Indústria Brasileira de Produtores de Árvores. **Relatório IBÁ 2023 ano base 2022.** Brasília: IBÁ, 2023.

MACHADO, S. A.; NASCIMENTO, R. G. M.; AUGUSTYNCZIK, A. L. D.; SILVA, L. C. R.; FIGURA, M. A.; PEREIRA, E. M.; TÉO, S. J. Comportamento da relação hipsométrica de *Araucaria angustifolia* no capão da Engenharia Florestal da UFPR. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n. 56, p. 5-16, 2008.

MIGUEL, E. P. **Avaliação biométrica e prognose de produção de *Eucalyptus urophylla* (S. T. Blake) na região norte do estado de Goiás.** Curitiba: UFPR, 2009. 161 f. (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

MIGUEL, E. P.; CANZI, L. F.; RUFINO, R. F.; SANTOS, G. A. dos Ajuste de modelo volumétrico e desenvolvimento de fator de forma para plantios de *Eucalyptus grandis* localizados no município de Rio Verde - GO. **Enciclopédia Biosfera**, v. 6, n. 11, p. 1-13, 2010.

OLIVEIRA, J. A. M. Balanço hídrico climatológico e classificação climática para o município de Jataí-GO. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 17, n. 3, p. 119-124, 2021.

REIS, C. F.; MORAES, A. C.; PEREIRA, A. V.; AGUIAR, A. V.; SOUSA, V. A.; BORGES, H. M. D. **Diagnóstico do setor de florestas plantadas no Estado de Goiás**. Brasília: Embrapa, 2015.

SCHNEIDER, P. R. **Análise de regressão aplicada à Engenharia Florestal.** 2. ed. Santa Maria: UFSM/CEPEF, 1998.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal**: Parte I - modelos de regressão linear e não linear, Parte II - Modelos para relação hipsométrica, volume afilamento e peso de matéria seca. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005.

SILVA, W. F. **Ajuste de modelos volumétricos e de afilamento para plantios de (*Eucalyptus urophylla*) no município de Niquelândia, GO.** Mineiros: FIMES, 2008. 27f. (Graduação em Engenharia Florestal) - Fundação Integrada Municipal de Ensino Superior, Mineiros, GO, 2008.

VITAL, M. H. F. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 29 , p. 77-130, 2009.