

Revista Árvore



Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado. Fonte:

[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-67622016000100107&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622016000100107&lng=en&nrm=iso). Acesso em: 12 mar. 2018.

#### REFERÊNCIA

CASTRO, Renato Vinícius Oliveira et al. Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de eucalyptus em nível de distribuição diamétrica utilizando índice de local. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 40, n. 1, p. 107-116, jan./fev. 2016. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-67622016000100107&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622016000100107&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 12 mar. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622016000100012>.

# MODELAGEM DO CRESCIMENTO E DA PRODUÇÃO DE POVOAMENTOS DE *Eucalyptus* EM NÍVEL DE DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA UTILIZANDO ÍNDICE DE LOCAL<sup>1</sup>

Renato Vinícius Oliveira Castro<sup>2\*</sup>, Raika Anairã Alves Araújo<sup>3</sup>, Helio Garcia Leite<sup>4</sup>, Ana Flávia Neves Mendes Castro<sup>5</sup>, Antoniomar Silva<sup>6</sup>, Reginaldo Sérgio Pereira<sup>7</sup> e Fabrício Assis Leal<sup>8</sup>

<sup>1</sup> Recebido em 24.10.2014 aceito para publicação em 20.11.2015.

<sup>2</sup> Universidade Federal de São João Del-Rei, Departamento de Ciências Agrárias, Sete Lagoas, MG - Brasil. E-mail: <castrorvo@ymail.com>.

<sup>3</sup> Universidade de Brasília, Graduada em Engenharia Florestal, Brasília, DF - Brasil. E-mail: <raikita@gmail.com>.

<sup>4</sup> Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Florestal, Viçosa, MG - Brasil. E-mail <hgleite@gmail.com>.

<sup>5</sup> Universidade Federal de São João Del-Rei, Departamento de Ciências Agrárias, Sete Lagoas, MG - Brasil. E-mail: <anaflaviacastro@ufsj.edu.br>.

<sup>6</sup> Cenibra, Belo Oriente, MG - Brasil. E-mail: <antonilmar.silva@cenibra.com.br>.

<sup>7</sup> Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal, Brasília, DF - Brasil. E-mail: <rpereira@unb.br>.

<sup>8</sup> Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal, Brasília, DF - Brasil. E-mail: <fabricioassisleall@gmail.com>.

\*Autor para correspondência.

**RESUMO** – A predição da produção de povoamentos florestais por classe diamétrica é de suma importância quando se tem por objetivo gerar multiprodutos da madeira. Assim, objetivou-se, neste trabalho, estimar a produção de um povoamento de clones do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* por classe diamétrica, utilizando a variável índice de local (*S*). A classificação da capacidade produtiva de cada parcela foi feita por meio de curvas de índices de local, empregando-se os métodos da curva-guia e da equação das diferenças. Em seguida, ajustou-se a função densidade de probabilidade (f.d.p.) Weibull de dois parâmetros pelo método da máxima verossimilhança. Para a projeção dos parâmetros da f.d.p., utilizou-se um sistema de equações com inclusão da variável *S*. A avaliação do ajuste desse sistema foi feita por meio da análise dos gráficos de resíduos e das estatísticas de precisão: coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajust}$ ) e erro-padrão da média relativo ( $S_{yx\%}$ ). O ajuste foi realizado utilizando 80% das parcelas e as 20% restantes, utilizadas para validação. A classificação da capacidade produtiva por meio de índices de local foi eficiente pelos dois métodos avaliados, sendo selecionado o método da curva-guia devido à sua simplicidade e facilidade de aplicação. O sistema de equações com inclusão da variável índice de local (*S*) foi preciso na modelagem da distribuição diamétrica do povoamento analisado. A aplicabilidade do sistema de equações se mostrou bastante eficiente para três prognoses consecutivas.

Palavras-chave: Manejo florestal; Classificação da capacidade produtiva; Validação de modelos.

## MODELING OF GROWTH AND YIELD OF *Eucalyptus* STANDS IN LEVEL OF DIAMETER DISTRIBUTION USING SITE INDEX

**ABSTRACT** – The prediction of the production of forest stands by diameter class has great importance when it aims to generate timber multiproduct. Keeping this in view, this study aimed to estimate the production of a stand of clones of hybrid *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* by diameter class using the variable site index (*S*). The classification of the productive capacity of each plot was taken by site index curves using the methods of the guide curve and the difference equation. Then the Weibull probability density function (p.d.f.) of two parameters was adjusted by the maximum likelihood method. To project the parameters of the p.d.f., a system of equations was used with the inclusion of the variable *S*. The rating of system adjustment



was made by analyzing the residual graphs, and accuracy statistics: adjusted coefficient of determination ( $R^2_{adjust}$ ) and relative standard error of the mean ( $S_{yx\%}$ ). The adjustment was performed using 80% of the plots and the remaining 20% were used for validation. The classification of productive capacity through site index was efficient by the two evaluated methods, but the guide-curve method was selected due to its simplicity and ease of application. The system of equations with inclusion of local index variable ( $S$ ) was necessary for modeling the diameter distribution of the analyzed stand. The applicability of the equation system proved quite effective for three consecutive prognoses.

*Keyword: Forest management; Classification of the productive capacity; Validation of models.*

## 1. INTRODUÇÃO

No Brasil, os plantios comerciais de *Eucalyptus* têm avançado significativamente ao longo dos últimos anos em termos de área plantada e de produtividade, porém poucas empresas têm investido adequadamente em técnicas ou métodos de predição de sua produção. Nesse contexto, é fundamental fazer uso da modelagem do crescimento e produção para dar suporte ao gerenciamento da produção florestal.

Os projetos florestais, em especial aqueles referentes a plantios comerciais, são caracterizados pelo longo período de tempo entre os investimentos iniciais e os recebimentos futuros. Assim, a predição do crescimento e da produção dos povoamentos florestais é essencial para definir a quantidade de produtos que serão produzidos pela floresta, bem como para subsidiar as análises técnicas e econômicas dos projetos florestais (GUIMARÃES, 1994).

A avaliação do potencial de produção de um local é utilizada como base para a predição do crescimento de povoamentos manejados, especialmente florestas plantadas, para que se faça o planejamento do investimento e da produção (DIAS et al., 2005b). Segundo Campos e Leite (2013), pode-se definir qualidade do local, ou capacidade produtiva do local, como o potencial para a produção de madeira (ou outro produto), em dada área, para determinada espécie ou clone. Essa capacidade pode ser expressa de modo empírico em alta, média e baixa produtividades ou por meio de índices quantitativos, como o índice de local ( $S$ ).

Para quantificar a capacidade produtiva de povoamentos equiâneos, o método mais usual em manejo florestal é a estimativa de índices de local, calculados em função de dados médios de alturas dominantes e idade das árvores. Esse método tem-se tornado popular, principalmente, porque quantifica a capacidade produtiva do local por meio de uma expressão numérica e não

apenas o descreve de forma qualitativa e, portanto, subjetiva (DIAS et al., 2005b; CAMPOS; LEITE, 2013). De acordo com Campos e Leite (2013), as principais alternativas de construção de curvas de índices de local são: método da curva-guia; método de atribuição preliminar de índices de local; método da equação das diferenças; método de Hammer; e método de predição de parâmetros. O método da curva-guia tem sido amplamente utilizado nos estudos referentes à quantificação da capacidade produtiva de povoamentos florestais de *Eucalyptus*. No entanto, poucos estudos têm sido realizados utilizando os outros métodos (DIAS et al., 2005b).

Em mensuração florestal, a prognose da produção é obtida por meio de modelos. Na modelagem, busca-se descrever uma realidade com maior nível de precisão (CARVALHO et al., 2011). Os modelos de crescimento e produção florestal permitem simular a dinâmica natural de um povoamento e prever a sua produção ao longo do tempo, em diferentes possibilidades de exploração (VANCLAY, 1994).

Para isso, existem diversos tipos de modelos consagrados na literatura que, de acordo com o nível de detalhamento, podem ser subdivididos em nível de povoamento total, distribuição diamétrica e árvores individuais (CAMPOS; LEITE, 2013; CASTRO et al., 2013). Esses dois últimos modelos possibilitam a avaliação do crescimento da floresta, visando produzir multiprodutos da madeira, visto que diferenciam a produção em relação à classe de tamanho das árvores (NOGUEIRA, 2003; ARAÚJOJÚNIOR et al., 2012; CASTRO et al., 2013). Os modelos em nível de distribuição diamétrica se baseiam em funções densidade de probabilidade (f.d.p.), que estimam a frequência de árvores nas diferentes classes de diâmetros. Das f.d.p., destaca-se a função Weibull, por sua relativa simplicidade de ajuste e flexibilidade para representar diferentes comportamentos de distribuição diamétrica (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2010).

A função Weibull ainda tem a vantagem de os seus parâmetros serem facilmente correlacionados com variáveis do povoamento (ARAÚJOJÚNIOR et al., 2010; CAMPOS; LEITE, 2013). Existem vários métodos para se ajustar uma função densidade de probabilidade, porém, tratando-se da função Weibull, sugere-se o método da máxima verossimilhança (CAMPOS; LEITE, 2013).

Não é comum a utilização da variável índice de local como variável explanatória nos modelos de crescimento e produção florestal em nível de distribuição diamétrica utilizados no Brasil. A estratégia para essa modelagem muitas vezes se restringe à estratificação dos modelos por estratos de classes de produtividade (geração de um modelo por estrato), o que aumenta substancialmente o número de modelos ou aplicação do modelo apenas para pequenas áreas (homogêneas).

Diante do exposto, o objetivo deste artigo foi estimar a produção de um povoamento de clones do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* por classe diamétrica utilizando a variável índice de local. Mais especificamente, busca-se classificar a capacidade produtiva de plantios comerciais de *Eucalyptus* por meio de índices de local, utilizando dois métodos: curva-guia e equação das diferenças e selecionar um método; ajustar um modelo (sistema de equações) em nível de distribuição diamétrica com inclusão da variável índice de local; e verificar a eficiência e aplicabilidade do modelo em nível de distribuição diamétrica em plantios de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, a partir de testes de validação de modelos.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos de um inventário florestal contínuo de clones do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* realizado entre os anos 2001 e 2006. O povoamento possuía 4.162 ha e estava inserido na região de Santa Bárbara, Estado de Minas Gerais. O espaçamento do povoamento não era regular, sendo a média dele de 3,0 x 2,0 m. A produtividade média de madeira do povoamento variava entre 26 e 44 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>. Os solos predominantes na região eram do tipo Latossolo. As temperaturas mínima e máxima eram de 17 e 27 °C, respectivamente, com umidade relativa média de 65% e precipitação média anual de 1.440 mm (LEITE et al., 2011).

Foram utilizados dados provenientes de 428 parcelas permanentes com formato retangular e dimensão média de 295 m<sup>2</sup>, as quais foram mensuradas em idades variando de 25 a 122 meses, sendo cada parcela medida, no mínimo, em três ocasiões. Em cada ocasião, foram mensurados o diâmetro dos indivíduos a 1,30 m de altura (*dap*, em cm), considerando o nível de inclusão de 4 cm, com o auxílio de uma suta; e a altura total (*Ht*, em m) das 10 primeiras árvores de cada parcela utilizando o clinômetro digital.

Além disso, mensurou-se a altura das árvores dominantes de cada parcela de acordo com sua área, seguindo o conceito de Assmann (1970 *apud* BILA, 2010), que diz respeito à altura média das 100 árvores mais grossas por hectare, que em outras palavras se refere à altura de uma árvore dominante a cada 100 m<sup>2</sup>. As árvores foram identificadas como dominantes na primeira ocasião da medição das parcelas. Os critérios utilizados para a qualificação dessa dominância foram características de sanidade, ausência de bifurcação, tortuosidade e danos e copa situada no dossel superior recebendo radiação solar direta.

A fim de realizar a modelagem da produção com a inclusão da variável *site* (*S*), primeiramente foi feita a classificação da capacidade produtiva de cada parcela, por meio de curvas de índices de local, que foram construídas empregando dois métodos: a) o método da curva-guia (CLUTTER et al., 1983); e b) o método das equações das diferenças (CAMPOS; LEITE, 2013), ambos assumindo como idade-índice a idade técnica de corte média do povoamento obtida a partir da predição da produção, por meio do modelo logístico e do cálculo do IMM (Incremento Médio Mensal).

Foram utilizadas equações lineares, ajustadas pelo método dos mínimos quadrados ordinários (MQO) para estimar a altura das árvores dominantes (aproximadamente 1.200 árvores dominantes remedidas). Para o método da curva-guia, foi utilizado o modelo  $\text{Ln}(Hd) = \beta_0 + \beta_1 \cdot I^{-1} + \varepsilon$ , e para o método da equação das diferenças, o modelo  $\text{Ln}(Hd_2) - \text{Ln}(Hd_1) = \beta_1(I_2^{-1} - I_1^{-1}) + \varepsilon$ , em que *Hd* é a média da altura dominante em metros, *I* é a idade em meses, os subscritos 1 e 2 referem-se às variáveis nas idades atuais e futuras, respectivamente,  $\beta_1$  são os parâmetros do modelo e  $\varepsilon$ , o erro aleatório.

A sequência para ajuste do modelo de distribuição diamétrica foi a seguinte: a) obtenção de dados de parcelas permanentes, de maneira representativa; b)

ajuste de uma função densidade de probabilidade para cada parcela, em cada medição; c) obtenção de equações de regressão para estimar os parâmetros da f.d.p. na idade futura, utilizando como variáveis independentes características do povoamento (incluindo o  $S$ ); e d) avaliação e validação (aplicação) da equação, conforme sugerido por Campos e Leite (2013).

As árvores de cada parcela e em cada idade foram agrupadas em classes com amplitude de 2,0 cm de diâmetro, conforme sugerido por Araújo Júnior et al. (2010), sendo o limite inferior da primeira classe definido com base no diâmetro mínimo. Para descrever a distribuição diamétrica de cada parcela em cada idade, ajustou-se a função densidade de probabilidade Weibull de dois parâmetros (eq. 1) pelo método da máxima verossimilhança, empregando o algoritmo desenvolvido por Gove e Fair wheater (1989), por meio do *software Weibull Trunc*.

$$f(X) = \frac{\gamma}{\beta} \left(\frac{X}{\beta}\right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{X}{\beta}\right)^{\gamma}} \quad (\text{Eq. 1})$$

em que  $f(X)$  = frequência de árvores na classe de  $dap$   $X$ ;  $X$  = centro de classe de diâmetro, em cm;  $\beta$  = parâmetro de escala; e  $\gamma$  = parâmetro de forma.

A qualidade dos ajustes foi avaliada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ( $\alpha = 0,01$ ), também por meio do *software Weibull Trunc*, a fim de verificar a aderência da função Weibull aos dados. Esse teste consiste no cálculo da máxima diferença entre a frequência acumulada observada e a frequência acumulada estimada e, em seguida, na comparação desse valor calculado com o valor tabelado em nível de significância de 1% (SOKAL, 1969).

A seguir é apresentado o sistema de equações utilizado para projetar os parâmetros da f.d.p. Weibull, baseado nos sistemas propostos por Nogueira (2003) e Binoti et al. (2010), com adaptações e inclusão da variável  $S$ . O ajuste dos modelos que compõem o sistema foi realizado por meio do *software Excel 2010*.

$$d_{\max_2} = c_0 + c_1 \left(\frac{I_1}{I_2}\right) d_{\max_1} + c_2 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) S \quad (\text{Md. 1})$$

$$\beta_2 = c_3 \left(\frac{I_1}{I_2}\right) \beta_1 + c_4 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) d_{\max_2} + c_5 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) S \quad (\text{Md. 2})$$

$$\gamma_2 = c_6 \left(\frac{I_1}{I_2}\right) \gamma_1 + c_7 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) S \quad (\text{Md. 3})$$

$$N_2 = c_8 + c_9 .N_1 + c_{10} .S + c_{11} .I_2 \quad (\text{Md. 4})$$

em que:  $d_{\max_1}$  e  $d_{\max_2}$  = diâmetros máximos nas idades atual (1) e futura (2), em cm;  $I_1$  e  $I_2$  = idades atual e futura, em meses;  $\beta_1$  e  $\beta_2$  = parâmetros de escala da função Weibull nas idades atual e futura;  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$  = parâmetros de forma da função Weibull nas idades atual e futura;  $N_1$  e  $N_2$  são as frequências de árvores por hectare nas idades atual e futura;  $S$  o índice de local e  $c_i$  = parâmetros dos modelos.

Antes, porém, de efetuar o ajuste do modelo (sistema de equações) de distribuição diamétrica, foram selecionadas ao acaso 80% das parcelas para serem ajustadas, sendo as demais (20%) separadas para validação.

Para identificar possíveis tendências nas estimativas das variáveis, além da distribuição gráfica dos resíduos, foram obtidas as estatísticas coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{\text{ajust}}$ ) e erro-padrão relativo da média ( $S_{y,x\%}$ ), definidos por:

$$R^2_{\text{ajust}} = 1 - \left( \frac{n-1}{n-p-1} \right) \left( \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \right) \quad (\text{Eq. 2})$$

$$S_{y,x\%} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p-1}} \times 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

em que  $n$  = número de observações;  $y_i$  = valores observados para as variáveis;  $\hat{y}_i$  = valores estimados para as variáveis;  $\bar{y}$  = valor médio observado para as variáveis; e  $n-p-1$  = grau de liberdade dos resíduos da equação.

A validação foi feita aplicando o sistema de equações aos 20% das parcelas separadas para isso. Para tanto, a partir dos dados de medição realizada em uma primeira ocasião, fez-se a projeção para a idade seguinte e, assim, sucessivamente até a última idade de cada parcela. Em seguida, os valores estimados foram comparados com os valores observados por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov ( $\alpha = 0,01$ ).

### 3. RESULTADOS

A idade técnica de corte utilizada tanto no método da curva-guia quanto no método da equação das

diferenças foi de 71 meses, sendo considerada a idade-índice do povoamento, em que foi observado o maior incremento médio mensal em volume.

A seguir são apresentadas as equações resultantes para calcular os índices de local pelo método da curva-guia e pelo método da equação das diferenças. De acordo com as estatísticas, é possível verificar que o método da equação das diferenças apresentou maior coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajust}$ ), porém o método da curva-guia exibiu menor erro-padrão da média relativo ( $S_{y,x\%}$ ).

Método	Equações	Estatísticas
Curva-guia	$Ln(\hat{Hd}) = 3,766275 - 34,6636 \left(\frac{1}{I}\right)$	$R^2_{ajust} = 0,674$ $S_{y,x\%} = 3,827\%$
Equação das diferenças	$\left[Ln(\hat{Hd}_2) - Ln(\hat{Hd}_1)\right] = -38,3054 \left(\frac{1}{I_2} - \frac{1}{I_1}\right)$	$R^2_{ajust} = 0,892$ $S_{y,x\%} = 3,876\%$

A partir do conceito de índice de local (Site é igual à altura dominante quando a idade do povoamento for igual à idade-índice), foram obtidas as equações 4 e 5, correspondentes aos dois métodos, curva-guia e equação das diferenças, respectivamente.

$$Ln(\hat{Hd}) = Ln(S) - 34,6636 \left[ \left(\frac{1}{I}\right) - \left(\frac{1}{71}\right) \right] \quad (Eq. 4)$$

$$Ln(\hat{Hd}) = Ln(S) - 38,3054 \left[ \left(\frac{1}{I}\right) - \left(\frac{1}{71}\right) \right] \quad (Eq. 5)$$

Utilizando essas equações, foram gerados os feixes de curvas de índices de local ilustrados na Figura 1, sendo os valores atribuídos a  $S$  baseados na variação da altura dominante observada. Em ambos os métodos, foram definidas três classes de qualidade de local: alta ( $S = 35, 33$  e  $31$ ), média ( $S = 29, 27$  e  $25$ ) e baixa ( $S = 23, 21$  e  $19$ ).

Pela Figura 1, observa-se que as curvas geradas por ambos os métodos foram eficientes na estimativa da altura dominante observada, o que significa que graficamente não houve diferença entre os dois métodos.

A Tabela 1 confirma a informação de que ambos os métodos resultaram em estimativas semelhantes. Observando ainda a Tabela 1, na diagonal principal

é possível abstrair que 96% das classificações realizadas pelos dois métodos coincidem.

Ao determinar as classes de produtividade obtidas com os índices de local nos dados do inventário florestal, foi possível verificar a heterogeneidade do sítio no qual o povoamento foi instalado, que apresenta variáveis como volume, área basal, diâmetro à altura do peito, altura dominante e total com grandes amplitudes de diferença (Tabela 2). Tendo em vista essa variabilidade, cabe dizer que a inserção da variável  $S$  é indicada para realizar a prognose de qualquer característica do povoamento.

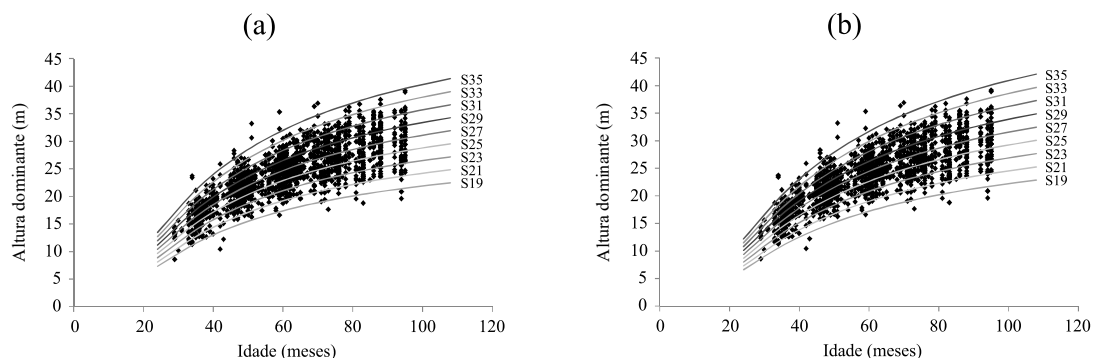
Para cada parcela, em cada idade, foi estimada a frequência de árvores por classe de diâmetro por meio do ajuste da f.d.p. Weibull de dois parâmetros pelo método da máxima verossimilhança, totalizando 981 ajustes. A avaliação dos ajustes foi feita pelo teste de Kolmogorov-Smirnov a 1% de significância, que resultou em 95% de não significância, ou seja, 95% das parcelas em cada ocasião aderiram à distribuição de Weibull.

A seguir é apresentado o resultado do ajuste do sistema de equações com as variáveis do povoamento para projetar os parâmetros beta ( $\beta$ ) e gama ( $\gamma$ ), diâmetro máximo ( $d_{max}$ ) e frequência por hectare ( $N$ ).

Equações ajustadas	Estatísticas
$d_{\max 2} = 1,081018 + 1,011134 \left(\frac{I_1}{I_2}\right) d_{\max 1} + 0,914558 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) S$	$R^2_{ajust} = 0,915$ $S_{y,x\%} = 6,105\%$
$\hat{\beta}_2 = 0,956625 \left(\frac{I_1}{I_2}\right) \beta_1 + 0,539768 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) d_{\max 2} + 0,16596 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) S$	$R^2_{ajust} = 0,989$ $S_{y,x\%} = 10,683\%$
$\hat{\gamma}_2 = 0,942819 \left(\frac{I_1}{I_2}\right) \gamma_1 + 0,094781 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) S$	$R^2_{ajust} = 0,984$ $S_{y,x\%} = 12,675\%$
$\hat{N}_2 = 127,4935 + 0,987187.N_1 - 2,33551.S - 0,71179.I_2$	$R^2_{ajust} = 0,986$ $S_{y,x\%} = 3,114\%$

Todas as equações apresentaram coeficientes significativos pelo teste t ( $p < 0,01$ ) e geraram coeficientes de determinação ajustados ( $R^2_{ajust}$ ) altos, com valores acima de 0,90. O erro-padrão relativo da média ( $S_{y,x\%}$ ) para cada uma das equações foi baixo – valores inferiores a 13% –, o que significa que houve pouca variação entre os dados observados e os estimados.





**Figura 1** – Curvas de índice de local geradas pelo método da curva-guia (a) e pelo método da equação das diferenças (b).  
**Figure 1** – Site index curves generated by the guide curve method (a) and by the differences equation method (b).

**Tabela 1** – Comparação quantitativa da equivalência da classificação dos métodos da curva-guia e da equação das diferenças.  
**Table 1** – Comparison of quantitative equivalence of the classification of methods of guide curve and the difference equation.

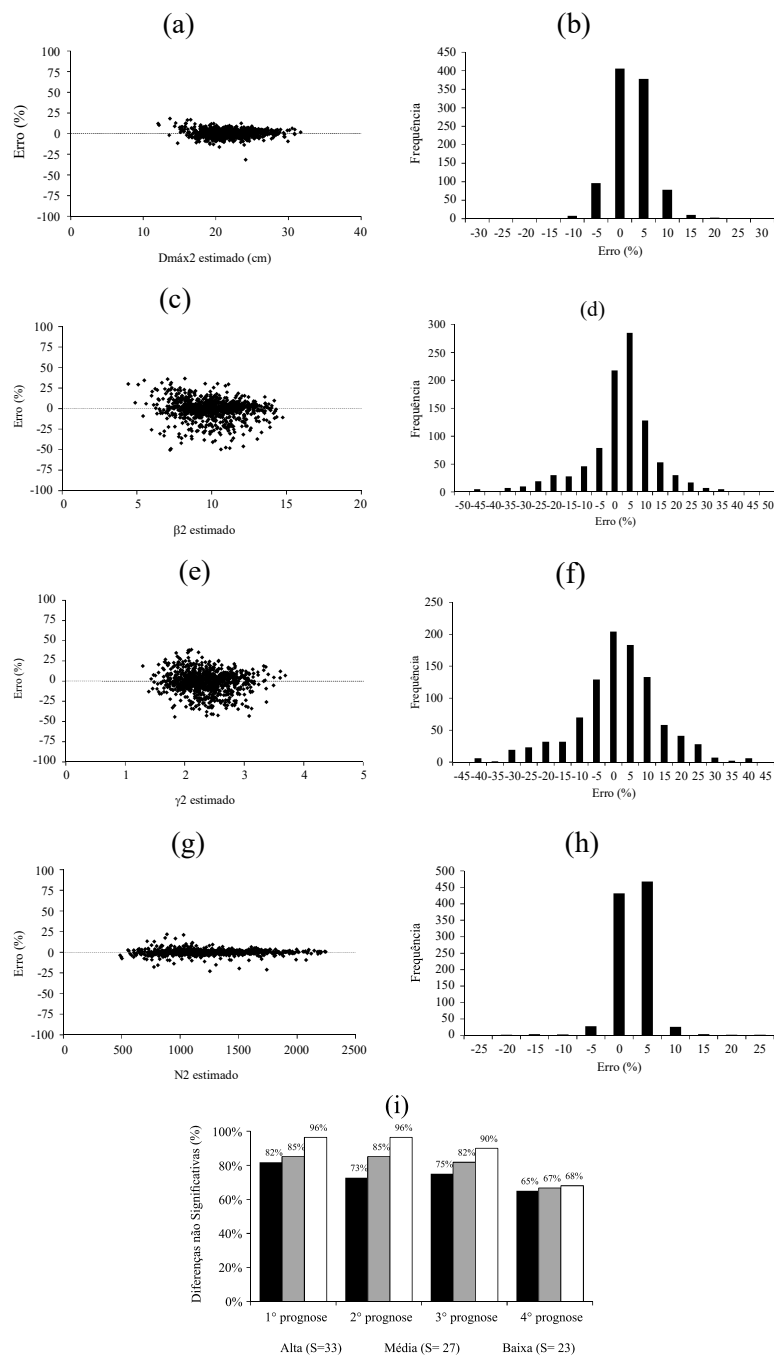
Métodos	Curva-guia				
	Classe	Alta	Média	Baixa	Total
Eq. Diferenças	Alta	84	2	-	86
	Média	4	255	1	260
	Baixa	-	8	74	82
	Total	88	265	75	428

**Tabela 2** – Sumário dos dados do inventário florestal de povoamentos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em três classes de produtividade e classes de idade.  
**Table 2** – Summary of data from the forest inventory of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* at three productivity classes and age classes.

Classe de produtividade	Idade (meses)	Volume (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	Área basal (m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> )	HD (m)	dap (cm)	Ht (m)
Alta (S = 33)	30	104,36 ± 29,20	12,87 ± 2,08	19,41 ± 2,32	12,64 ± 1,54	17,06 ± 2,01
	42	160,06 ± 47,93	16,67 ± 3,33	22,65 ± 2,69	14,54 ± 1,89	20,14 ± 2,43
	54	253,32 ± 60,86	22,02 ± 3,46	27,37 ± 2,33	14,84 ± 1,69	22,88 ± 1,72
	66	297,10 ± 69,66	23,61 ± 4,35	29,88 ± 2,41	15,71 ± 2,20	24,81 ± 2,30
	78	355,66 ± 57,68	26,39 ± 3,56	32,34 ± 1,95	15,79 ± 2,18	25,89 ± 2,04
	90	424,81 ± 51,07	29,05 ± 2,83	35,06 ± 2,26	16,27 ± 1,39	27,59 ± 1,68
Média (S = 27)	30	58,40 ± 17,07	9,28 ± 1,97	15,44 ± 1,49	10,55 ± 1,19	13,62 ± 1,38
	42	112,24 ± 35,75	13,95 ± 3,02	19,35 ± 2,28	12,73 ± 1,45	16,99 ± 1,96
	54	170,48 ± 34,85	17,85 ± 2,74	23,00 ± 1,87	13,15 ± 1,74	19,52 ± 1,70
	66	231,55 ± 44,54	20,91 ± 3,03	26,48 ± 2,14	14,34 ± 1,78	22,06 ± 1,89
	78	274,71 ± 51,92	23,12 ± 3,34	28,48 ± 2,37	14,53 ± 1,88	23,21 ± 2,13
	90	321,48 ± 59,44	24,73 ± 3,67	31,09 ± 2,37	15,30 ± 1,71	25,00 ± 2,14
Baixa (S = 21)	30	35,46 ± 10,20	7,11 ± 1,59	12,58 ± 1,30	9,14 ± 0,81	11,03 ± 1,14
	42	72,43 ± 27,53	10,75 ± 2,84	16,28 ± 2,39	11,11 ± 1,33	14,23 ± 2,05
	54	121,92 ± 28,39	14,95 ± 2,45	19,87 ± 1,95	11,99 ± 1,72	16,95 ± 1,83
	66	157,94 ± 39,52	17,07 ± 3,26	22,28 ± 1,73	12,55 ± 1,67	18,76 ± 1,79
	78	185,00 ± 43,02	18,59 ± 3,32	24,05 ± 2,06	12,97 ± 1,66	19,83 ± 1,93
	90	242,77 ± 84,94	21,99 ± 6,42	26,48 ± 2,44	13,91 ± 1,78	21,66 ± 2,23

O sistema de equações com inclusão da variável *S* (índice de local) se ajustou bem aos dados. Isso é comprovado por meio da análise dos gráficos de dispersão e histogramas da distribuição dos resíduos

(Figura 2), que demonstram erros percentuais com valores próximos a zero. A interpretação desses gráficos permite verificar que a distribuição do erro é normal e há ausência de tendenciosidade nas estimativas.



**Figura 2** – Gráficos de dispersão e histogramas da distribuição de resíduos para estimativas do diâmetro máximo (a, b), parâmetro  $\beta$  (c, d), parâmetro  $\gamma$  (e, f) e frequência de árvores por ha (g, h) e porcentagem de parcelas em que a projeção não diferiu significativamente dos valores observados, em quatro períodos de projeção e separados por classes de produtividade (i).

**Figure 2** – Dispersion graphs and histograms of the distribution of residue to estimate the maximum diameter (a, b) parameter  $\beta$  (c, d), parameter  $\gamma$  (e, f) and the frequency of trees per hectare (g, h) and percentage of plots in which the projection did not differ significantly from the observed values for four periods of projection and separated by productivity classes (i).



As prognoses foram feitas a partir da primeira medição de cada parcela selecionada para a validação nas idades futuras que foram remeidas. Observando a Figura 2i, é possível verificar que prognoses para até três períodos (3 anos) apresentam alta precisão, pois não apresentaram diferença significativa em relação às distribuições observadas. Já a quarta prognose (prognose para 4 anos adiante) apresentou porcentagens de não significância pelo teste de Kolmogorov-Smirnov a 1% de probabilidade, considerados não adequados.

Ainda analisando a comparação entre as prognoses da validação e os valores observados, verificou-se que as parcelas localizadas em áreas de baixa produtividade tiveram estimativas muito mais próximas da realidade, seguidas das parcelas em sítios de média e de alta produtividade.

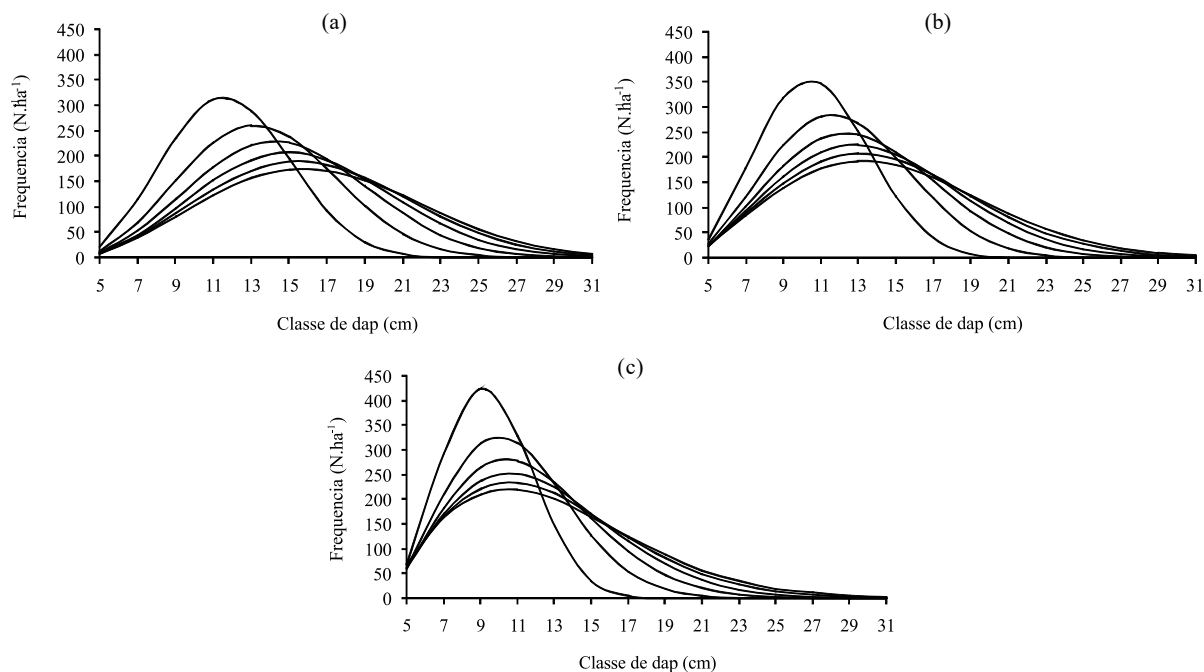
O mais provável é que esse resultado seja o fato de as parcelas de alta produtividade terem maior amplitude de classes de *dap* entre as menores e as maiores idades observadas, quando comparadas com as parcelas de média e baixa produtividades. Isso significa

que há maior facilidade em estimar valores mais próximos do que valores que possuem entre si maior variância.

A Figura 3 mostra o resultado das projeções médias das classes de produtividades alta, média e baixa. Pode-se observar que a distribuição dos diâmetros variou de acordo com a classe de índice de local. Ainda analisando a Figura 3, verifica-se que locais com alta capacidade produtiva apresentam maior frequência de árvores nas classes de maior *dap* em relação aos locais de baixa capacidade produtiva, como se esperava. A distribuição por classe de diâmetro se desloca para a direita com o aumento da idade – o que significa que as árvores aumentam seu *dap* com o tempo – e essas curvas também se tornam mais achatadas à medida que a idade vai avançando, o que faz que a quantidade de classes englobadas pelas curvas seja maior, conforme reportado por Araújo Júnior et al. (2012).

#### 4. DISCUSSÃO

Ainda que o coeficiente de determinação ajustado da equação das diferenças tenha sido mais elevado



**Figura 3** – Simulação do crescimento médio em nível de distribuição diamétrica das classes de alta ( $S = 33$ ) (a), média ( $S = 27$ ) (b) e baixa produtividades ( $S = 21$ ) (c). A sequência das curvas refere-se às idades de 30, 42, 54, 66, 78 e 90 meses, respectivamente.

**Figure 3** – Simulation of the average growth level of diameter distribution for the classes of high ( $S = 33$ ) (a), medium ( $S = 27$ ) (b) and low productivity ( $S = 21$ ) (c). The sequence of bends refers to the ages of 30, 42, 54, 66, 78 and 90 months, respectively.

em relação ao da curva-guia, é oportuno ressaltar que essa estatística, embora muito usada, é pobre para avaliar um modelo de crescimento, servindo apenas como indicador relativo do grau de ajustamento (CAMPOS; LEITE, 2013).

Nesse caso, a escolha de um método em detrimento do outro se deu pelo menor erro-padrão da média relativo encontrado e pela facilidade de cálculo e de construção das curvas de índices de local. O método escolhido para fazer essa classificação foi o da curva-guia, que é também o mais difundido no setor florestal brasileiro.

Dias et al. (2005b) consideraram o método da curva-guia como o mais adequado para a construção das curvas de índices de local de povoamentos de eucalipto submetidos a desbaste pelos resultados estatísticos obtidos e por ser um método de uso frequente e com resultados satisfatórios em estudos desta natureza.

As estatísticas encontradas na avaliação do ajuste do sistema de equações foram superiores às encontradas por Binoti et al. (2010), com exceção da variável frequência de árvores por hectare, que apresentou um coeficiente de correlação de 0,993 e da variável diâmetro máximo, que gerou um  $R^2_{ajust}$  de 0,959. As variáveis  $\ln\beta_2$  e  $\ln\gamma_2$  encontradas por Binoti et al. (2010) foram 0,700 de  $R^2_{ajust}$  e 0,931 de correlação, respectivamente. Nogueira (2003) encontrou valores das estatísticas bem semelhantes e até superiores aos observados neste estudo. Porém, o banco de dados por ele utilizado veio de um experimento de desbastes cujo povoamento era bastante homogêneo. Assim, o sistema de equações aqui utilizado demonstrou ter qualidade de ajuste superior em relação aos trabalhos dos autores citados, mesmo tratando-se de equações lineares comparadas a equações não lineares. Isso se deve à introdução da variável índice de local ( $S$ ).

## 5. CONCLUSÕES

A classificação da capacidade produtiva por meio de índices de local foi eficiente pelos dois métodos avaliados, sendo selecionado o método da curva-guia devido à sua simplicidade e facilidade de aplicação. O sistema de equações com inclusão da variável índice de local ( $S$ ) foi altamente preciso para a modelagem da distribuição diamétrica de povoamentos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. A aplicabilidade do sistema de equações se mostrou bastante eficiente para três prognoses consecutivas. Áreas com baixa capacidade produtiva foram as que obtiveram

melhores estimativas, ou seja, menores diferenças significativas, em comparação com os dados observados.

## 6. REFERÊNCIAS

ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; LEITE, H. G.; BINOTI, D. H. B.; CASTRO, R. V. O.; BINOTI, M. L. M. S.; MARCATTI, G. E. Uso da função Weibull para descrever a área basal por classe de diâmetro de um povoamento de eucalipto. *Scientia Forestalis*, v.40, n.95, p.401-406, 2012.

ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; NOGUEIRA, G. S.; DE OLIVEIRA, M. L. R.; DE MIRANDA, R. O. V.; CASTRO, R. V. O.; PELLI, E. Projeção da distribuição diamétrica de povoamentos de *Eucalyptus* em diferentes amplitudes de classe. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.45, n.11, p.1275-1281, 2010.

BILA, J.M. **Classificação de sítios com base em fatores edáficos para *Pinus caribaea* var. *hondurensis* na região de Prata, Minas Gerais**. 2010. 77f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

BINOTI, D. H. B., LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; DA SILVA, M. L. M.; GARCIA, S. L. R.; DA CRUZ, J. P. Uso da função Weibull de três parâmetros em um modelo de distribuição diamétrica para plantios de eucalipto submetidos a desbaste. *Revista Árvore*, v.34, n.1, p.147-156, 2010.

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 4.ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2013. 605p.

CARVALHO, S. P. C.; CALEGARIO, N.; FONSECA E SILVA, F.; BORGES, L. A. C.; DE MENDONÇA, A. R.; DE LIMA, M. P. Modelos não lineares generalizados aplicados na predição da área basal e volume de *Eucalyptus* clonal. *Cerne*, v.17, n.4, p.541-548, 2011.

CASTRO, R. V. O.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, F. B.; LEITE, H. G. Crescimento e produção de plantios comerciais de eucalipto estimados por duas categorias de modelos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.48, n.3, p.287-295, 2013.

CLUTTER, J.C.; PIENAAR, L.V.; BRISTER, G.H. et al. **Timber management: a quantitative**

*Revista Árvore*, Viçosa-MG, v.40, n.1, p.107-116, 2016



approach. 3.ed. New York: Jonh Willey, 1983. 333p.

DEMOLINARI, R. A.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; DE SOUZA, A. L. Crescimento de plantios clonais de eucalipto não desbastados na região de Monte Dourado (PA). **Revista Árvore**, v.31, n.3, p.503-512, 2007.

DIAS, A. N.; LEITE, H. G.; CAMPOS, J. C. C.; COUTO, L.; DE CARVALHO, A. F. Emprego de um modelo de crescimento e produção em povoamentos desbastados de eucalipto. **Revista Árvore**, v.29, n.5, p.731-739, 2005a.

DIAS, A. N.; LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; RODRIGUES, F. L. Avaliação de métodos de ajuste de curvas de índices de locais povoamentos de eucalipto desbastados. **Revista Árvore**, Viçosa, v.29, n.5, p.741-747, 2005b.

GOVE, J.H.; FAIRWEATHER, S.E. Maximum-likelihood estimation of Weibull function parameters using a general interactive optimizer and grouped data. **Forest Ecology and Management**, v.28, n.1, p.61-99, 1989.

GUIMARÃES, D.P. **Desenvolvimento de um modelo de distribuição diamétrica de passo invariante para prognose e projeção da estrutura de povoamentos de eucalipto**. 1994. 160f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1994.

LEITE, H. G.; CASTRO, R. V. O.; SILVA, A.; ARAUJO JÚNIOR, C. A.; BINOTI, D. H. B.; CASTRO, A. F. N. M.; BINOTI, M. L. M. S. Classificação da capacidade produtiva de povoamentos de eucalipto utilizando diâmetro dominante. **Silva Lusitana**, v.19, n.2, p.181-195, 2011.

MURPHY, P.A.; STERNITZKE, H.S. **Growth and yield estimation for loblolly pine**

**in the West Gulf**. New Orleans: USDA, 1979. 8p. (Research Paper, SO-154).

NOGUEIRA, G.S. **Determinação da idade técnica de desbaste em plantações de eucalipto**. 1999. 62f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1999.

NOGUEIRA, G.S. **Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de *Eucalyptus* e de *Tectona grandis* submetidos a desbaste**. 2003. 132f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

SELLE, G.L.; SCHNEIDER, P.R.; FINGER, C.A.G. Classificação de sítio para *Pinus taeda*, através da altura dominante, para a região de Cambará do Sul, RS, Brasil. **Ciência Florestal**, v.4, n.1, p.77-95, 1994.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **As florestas plantadas**. Serviço Florestal Brasileiro. Brasília/DF. Disponível em: <http://www.florestal.gov.br/snif/recursos-florestais/as-florestas-plantadas>. Acesso em: 30 set. 2013.

SIIPILEHTO, J.A. A comparison of two parameter prediction methods for stand structure in Finland. **Silva Fennica**, v.34, p.331-349, 2001.

SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; DE OLIVEIRA, M. L. R.; CARVALHO, A. Especificação de um modelo de crescimento e produção florestal. **Revista Árvore**, v.28, n.6, p.831-837, 2004.

SOKAL, R.R.; ROHLF, F.J. **Biometry: the principles and practice of statistics in biological research**. San Francisco: Freeman and Company, 1969. 776p.

VANCLAY, J.K. **Modeling forest growth and yield: applications to mixed tropical forest**. Wallingford: CAB International, 1994. 312p.