

Intensidade Amostral Ótima para a Cubagem Rigorosa de Árvores de Eucalipto

Optimal Sampling Intensity for Rigorous Cubage of Eucalyptus Trees

Emanuel José Gomes de Araújo^{*a}; Jéssica Chaves Cardoso^a; Pedro Vaz da Rocha^a; Danilo Henrique dos Santos Ataíde^a; Marco Antonio Monte^a; Rafaella De Angeli Curto^a; Mateus dos Reis^a; Eduardo Vinícius da Silva^a

^aUniversidade Federal Rural do Rio de Janeiro. RJ, Brasil.

*E-mail: ejgaraujo@gmail.com

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo determinar a intensidade amostral ótima de árvores a serem cubadas rigorosamente, por classe de diâmetro, em plantios de Eucalipto. Foram utilizados dados da cubagem de 4.414 árvores, provenientes de três clones do gênero *Eucalyptus*, em plantios localizados em 16 fazendas, abrangendo quatro regiões administrativas de Minas Gerais. As árvores foram distribuídas em 25 estratos formados com base na região, fazenda e clone. Em cada estrato, foram realizadas amostragens com intensidades de 1 a 10 árvores por classe de diâmetro (*dap*) com amplitude de 2,5 cm. A amostragem das árvores foi realizada por meio de sorteio sem reposição. Para os volumes de cada amostra gerada por estrato, realizou-se uma análise descritiva. A determinação do número ótimo de árvores cubadas, por classe de diâmetro, foi realizada com base no Método da Máxima Curvatura Modificado, no qual foi utilizado o modelo definido por Lessman e Atkins (1963). Os pontos de máxima curvatura correspondentes as intensidades amostrais das árvores foram determinadas, utilizando os modelos definidos por Méier e Lessman (1971) e por Chaves (1985). Verificou-se grande variabilidade do volume das árvores, sendo este reduzido com o aumento do número de árvores cubadas. As intensidades amostrais dos estratos obtidas pelos dois modelos, estiveram no intervalo de 3 a 6 árvores por classe diamétrica, sendo este intervalo a intensidade amostral ótima de árvores a serem cubadas rigorosamente em plantios do gênero *Eucalyptus*, considerando as condições deste estudo.

Palavras-chave: Volume. Estratificação. Método da Máxima Curvatura Codificado. Amostra.

Abstract

The objective of this work was to determine the optimum sampling intensity of trees to be accurately cubed, by diameter class, in Eucalyptus plantations. Data were collected from 4,414 trees from three clones of the genus Eucalyptus, in plantations located on 16 farms, covering four administrative regions of Minas Gerais. The trees were distributed in 25 strata formed based on the region, farm and clone. In each stratum, samples with intensity of 1 to 10 trees were performed per diameter class (dbh) with amplitude of 2.5 cm. Sampling of the trees was done by lot without replacement. For the volumes of each sample generated by stratum, a descriptive analysis was performed. The determination of the optimal number of cubed trees, by diameter class, was performed based on the Modified Maximum Curvature Method, in which the model defined by Lessman and Atkins (1963) was used. The maximum curvature points corresponding to the sample intensities of the trees were determined using the models defined by Meier and Lessman (1971) and Chaves (1985). There was a great variability of the volume of the trees, being reduced with the increase of the number of trees cubed. The sampling intensities of the strata obtained by the two models were in the range of 3 to 6 trees per diameter class, and this interval was the optimum sampling intensity of trees to be accurately covered in plantations of the genus Eucalyptus, considering the conditions of this study.

Keywords: Volume. Stratification. Modified Maximum Curvature Method. Sample.

1 Introdução

A estimativa do volume de árvores é essencial para o planejamento e monitoramento de plantios, principalmente em estudos de crescimento e produtividade, bem como para quantificação de multiprodutos (Leal *et al.*, 2015), sendo tal estimativa considerada a principal finalidade dos levantamentos florestais, principalmente, quando se trata de povoamentos destinados para fins comerciais (Machado; Figueiredo Filho, 2009).

O volume das árvores em uma unidade amostral é quase sempre estimado indiretamente por meio de fator de forma, equações de volume ou funções de afilamento. Para viabilizar a aplicação de qualquer uma dessas técnicas, exige-se que

algumas árvores sejam amostradas com o intuito de obter seus volumes reais, sendo geralmente obtidos pelo método de cubagem rigorosa, absoluto ou relativo, com o abatimento das árvores (Machado; Figueiredo Filho, 2009).

A amostragem como subsídio na tomada de decisão é uma prática comum na Engenharia Florestal, uma vez que as populações florestais são geralmente extensas, de difícil acesso e o tempo disponível para a realização dos levantamentos quase sempre é escasso (Péllico Netto; Brena, 1997). Assim, a amostragem consiste na mensuração de variáveis de um conjunto de indivíduos e suas informações são utilizadas para estimar os parâmetros da população por meio de procedimentos estatísticos (Kershaw JR *et al.*, 2017).

Em todo processo de amostragem a precisão e o custo são duas variáveis que se apresentam altamente relacionadas, onde a alteração em uma resulta automaticamente em uma resposta da outra. Deste modo, a intensidade amostral necessária para estimativas de parâmetros de maneira a atender a um erro amostral preestabelecido, será tanto maior quanto mais heterogênea for a população em relação à variável de interesse e, conseqüentemente, maiores serão os custos. Assim, se uma população for dividida em estratos onde a variável de interesse seja menos dispersa, pode-se obter estimativas mais precisas com amostras menores (Péllico Netto; Brena, 1997). Sendo assim, é imprescindível determinar a intensidade amostral de árvores a serem cubadas, mantendo a precisão das equações de volume com o menor custo.

Uma maneira de reduzir o número de árvores na cubagem, sem comprometer a precisão dos modelos volumétricos, seria por meio da estratificação das florestas (Scolforo; Thiersch, 2004). O objetivo da estratificação é reduzir a variabilidade dentro de subpopulações e, assim, aumentar a precisão nas estimativas da população (Péllico Netto; Brena, 1997). Porém, em muitas situações surgem dúvidas sobre como deve ser realizada a estratificação de uma floresta visando a cubagem rigorosa.

Para a definição do tamanho ideal que a amostra deve ter para ser efetivamente representativa da população, torna-se necessário o conhecimento dos fatores que interferem na variabilidade da floresta, uma vez que quanto mais heterogênea for, maior será o seu coeficiente de variação, e conseqüentemente maior deverá ser a intensidade amostral. Isso porque de acordo com Campos e Leite (2013) o volume de uma árvore é totalmente dependente de sua forma, e árvores com mesmo diâmetro e altura podem apresentar volumes distintos dependendo da forma de cada uma. Assim, esta variabilidade é um desafio na busca de acurácia de ajuste de modelos (Costa *et al.*, 2016).

Dentre os diferentes fatores que influenciam na variabilidade em florestas plantadas, deve-se sempre considerar na cubagem as variações das classes diamétricas, afim de garantir melhor representatividade da variação de diâmetro e da forma das árvores, podendo-se também considerar a espécie, idade, espaçamento, qualidade do sítio, dentre outros (Scolforo; Thiersch, 2004; Campos; Leite, 2013), de modo que tais fatores ao serem considerados na estratificação da população visam homogeneizar a variável de interesse.

No entanto, para a amostra abranger todas as classes de diâmetro, é necessário definir o número de árvores representativos para cada classe, em que se sugere que as árvores pertencentes a amostra, devem preferencialmente apresentar mesma frequência por classe (Scolforo; Thiersch, 2004; Campos; Leite, 2013; Leal *et al.*, 2015). Entretanto, ainda surge a necessidade da aplicação de métodos estatísticos que possibilitem a determinação da intensidade amostral

ótima.

O método da máxima curvatura modificado proposto por Lessman e Atkins (1963) foi utilizado por vários autores para determinar, principalmente, o tamanho ótimo de unidades amostrais, para culturas agrícolas (Paranaíba; Ferreira; Morais, 2009; Brito *et al.*, 2012; Morais *et al.*, 2014; Sousa *et al.*, 2015), e na área florestal (Silva *et al.*, 2003; Oliveira *et al.*, 2011; Péllico Netto; Tello; Wandresen, 2014). Deste modo, o referido método surge como alternativa para obtenção da intensidade amostral de árvores na cubagem rigorosa, uma vez que permite que o ponto que corresponde a intensidade amostral ótima de árvores seja determinado algebricamente, pela representação da relação entre o coeficiente de variação e a intensidade amostral, dando maior precisão aos resultados obtidos.

O objetivo deste estudo foi determinar a intensidade amostral ótima de árvores a serem cubadas rigorosamente, por classes de diâmetro, em plantios de Eucalipto, pelo método da máxima curvatura.

2 Material e Métodos

2.1 Caracterização dos dados e cubagem rigorosa

Para o desenvolvimento do presente estudo, foram utilizados dados fornecidos por uma empresa do setor florestal, localizada no estado de Minas Gerais, sendo provenientes da cubagem rigorosa de 4.414 árvores de três clones do gênero *Eucalyptus*, em plantios localizados em 16 fazendas, abrangendo quatro regiões administrativas de Minas Gerais. O sistema de manejo é de alto fuste, com idades entre 1,5 a 9,5 anos, com espaçamento médio de 3,00 x 2,50 m, diâmetro a 1,30 m do solo (*dap*) variando de 2,86 a 19,99 cm e altura total entre 4 a 34,7 m.

Foi realizada a cubagem rigorosa pelo método de Smalian, utilizando-se o comprimento das seções relativo à 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85 e 95% da altura total de cada árvore. O volume do toco e da ponta foram desconsiderados. O volume total comercial de cada árvore foi obtido a partir do somatório dos volumes das seções, considerando o diâmetro mínimo da última seção até 3 cm.

2.2 Estratificação e amostras

As árvores cubadas foram distribuídas em 25 estratos formados com base na região, fazenda e clone (Quadro 1). Em cada estrato, foi utilizada intensidade amostral de 1 a 10 árvores por classe de diâmetro, em sete classes com amplitude de 2,5 cm. A amostragem das árvores foi realizada por meio do sorteio sem reposição. Para os volumes de cada intensidade amostral gerada por estrato, realizou-se uma análise descritiva, sendo obtidas a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação em porcentagem.

Quadro 1 - Número de árvores observadas em cada estrato por classe diamétrica

Estratos*	Região*	Fazenda*	Clone*	Centro de Classe de <i>dap</i> (cm)							
				3,75	6,25	8,75	11,25	13,75	16,25	18,75	Total
1	1	1	1	16	21	20	25	21	11	12	126
2	2	2	2	12	16	21	14	14	11	14	102
3	2	2	3	12	13	18	16	13	12	14	98
4	2	3	1	17	28	29	22	30	19	13	158
5	2	3	2	24	41	42	38	26	13	13	197
6	2	3	3	23	40	40	43	25	15	16	202
7	2	4	1	20	27	28	32	29	18	11	165
8	2	4	3	12	15	21	16	23	11	17	115
9	2	5	1	27	32	36	41	34	26	15	211
10	2	5	3	28	40	52	68	54	27	22	291
11	2	6	2	10	17	21	22	13	13	13	109
12	3	7	3	10	15	25	24	18	28	24	144
13	3	8	2	11	27	25	32	23	18	13	149
14	3	9	2	11	21	32	37	25	26	40	192
15	3	9	3	19	27	33	40	32	16	19	186
16	3	10	2	16	35	43	55	42	46	39	276
17	3	11	3	11	21	21	19	13	10	11	106
18	3	12	2	12	23	29	29	25	32	31	181
19	3	12	3	17	28	36	50	39	67	61	298
20	4	13	1	20	20	22	26	19	18	10	135
21	4	13	2	11	26	34	35	50	40	19	215
22	4	13	3	12	22	27	29	24	27	11	152
23	4	14	3	14	25	32	39	19	21	18	168
24	4	15	2	13	20	30	27	16	21	13	140
25	4	15	3	20	30	51	59	75	48	15	298
Total				398	630	768	838	702	594	484	4.414

Legenda: *Numeração utilizada para a identificação da região, fazenda e clone.

Fonte: dados da pesquisa.

2.3 Número Ótimo de Árvores Cubadas

Em cada estrato, com seus respectivos valores de coeficiente de variação em função da intensidade amostral, foi determinado o número ótimo de árvores cubadas, por classe de diâmetro, com base no Método da Máxima Curvatura Modificado, definido por Lessman e Atkins (1963), conforme segue:

$$CV_x = a/X^b \tag{01}$$

em que: o coeficiente de variação; o número de árvores; são os parâmetros a serem estimados.

Os parâmetros *a* e *b* foram estimados, sendo verificadas as suas significâncias pelo teste *t* com 95% de probabilidade. Utilizou-se o erro padrão da estimativa percentual [(%)] como medida de precisão para as equações ajustadas.

Os pontos de máxima curvatura correspondentes ao número ótimo de árvores foram determinados, utilizando os

modelos definidos por Méier e Lessman (1971) (Equação 02) e por Chaves (1985) (Equação 03), conforme segue:

$$X_0 = \{[a^2 b^2 (2b + 1)] / (b + 2)\}^{1/(2b+2)} \tag{02}$$

$$X_0 = \{[a^2 b^2 (2b - 1)] / (b - 2)\}^{1/(2-2b)} \tag{03}$$

em que, para ambos os modelos, tem-se: o ponto da curvatura correspondente ao tamanho estimado da amostra; são parâmetros estimados do modelo de Lessman e Atkins (1963).

3 Resultados e Discussão

As estatísticas descritivas para a variável volume, nas intensidades amostrais (n) de 1 a 5, e nas intensidades de 6 a 10, simuladas em cada estrato, estão apresentadas no Quadros 2 e 3, respectivamente. Nota-se, de modo geral, que em cada estrato há redução do coeficiente de variação a medida que a intensidade amostral (nº de árvores) aumenta.

Quadro 2 - Estatísticas descritivas calculadas para intensidade amostral variando de 1 a 5 dentro de cada estrato

Estr.	n = 1			n = 2			n = 3			n = 4			n = 5		
	\bar{x}	<i>s</i>	CV%	\bar{x}	<i>s</i>	CV%	\bar{x}	<i>s</i>	CV%	\bar{x}	<i>s</i>	CV%	\bar{x}	<i>s</i>	CV%
1	0,10	0,10	108,20	0,09	0,08	94,93	0,09	0,08	90,26	0,09	0,08	86,86	0,09	0,07	84,73
2	0,13	0,14	102,41	0,14	0,14	98,66	0,14	0,14	99,75	0,14	0,14	98,00	0,14	0,13	97,39

Estr.	n = 1			n = 2			n = 3			n = 4			n = 5		
	\bar{x}	s	CV%	\bar{x}	s	CV%	\bar{x}	s	CV%	\bar{x}	s	CV%	\bar{x}	s	CV%
3	0,09	0,08	89,69	0,09	0,08	82,52	0,10	0,08	85,63	0,10	0,08	83,05	0,10	0,08	83,42
4	0,14	0,14	103,11	0,13	0,14	106,11	0,12	0,12	100,73	0,13	0,13	99,71	0,12	0,12	97,58
5	0,13	0,15	118,57	0,13	0,14	113,28	0,13	0,14	107,73	0,13	0,13	105,46	0,12	0,14	109,85
6	0,14	0,17	117,53	0,13	0,15	114,72	0,13	0,14	111,49	0,12	0,13	111,30	0,12	0,13	109,94
7	0,10	0,09	91,26	0,10	0,09	89,50	0,10	0,10	95,36	0,10	0,10	93,94	0,10	0,10	91,92
8	0,10	0,11	104,80	0,10	0,11	103,14	0,11	0,11	97,35	0,11	0,11	99,06	0,11	0,11	96,70
9	0,13	0,13	97,70	0,15	0,14	96,93	0,14	0,14	94,90	0,14	0,14	97,22	0,14	0,14	95,66
10	0,10	0,10	102,07	0,10	0,10	98,72	0,10	0,10	97,94	0,10	0,10	97,50	0,11	0,10	96,23
11	0,12	0,12	101,04	0,11	0,11	101,62	0,11	0,11	96,74	0,11	0,11	96,08	0,12	0,11	94,03
12	0,12	0,12	105,87	0,11	0,11	97,29	0,11	0,11	92,86	0,11	0,10	89,27	0,11	0,10	91,78
13	0,15	0,16	110,12	0,13	0,13	103,00	0,13	0,13	104,50	0,13	0,14	108,07	0,13	0,14	103,96
14	0,14	0,16	118,25	0,14	0,15	108,65	0,14	0,14	104,49	0,13	0,14	104,18	0,14	0,14	100,74
15	0,11	0,10	96,98	0,11	0,10	93,02	0,11	0,10	90,19	0,11	0,09	89,78	0,11	0,10	90,23
16	0,13	0,15	113,48	0,13	0,13	102,92	0,13	0,13	104,59	0,13	0,13	100,38	0,13	0,13	99,46
17	0,12	0,13	111,58	0,11	0,11	101,29	0,11	0,12	101,62	0,12	0,11	97,48	0,11	0,11	96,40
18	0,15	0,17	112,83	0,15	0,16	106,06	0,14	0,15	106,20	0,15	0,15	102,30	0,14	0,14	100,00
19	0,14	0,16	117,66	0,13	0,14	107,71	0,13	0,14	110,02	0,13	0,14	105,83	0,13	0,13	103,59
20	0,11	0,11	100,23	0,11	0,11	97,02	0,12	0,11	95,14	0,12	0,11	93,83	0,12	0,11	92,17
21	0,12	0,15	128,12	0,12	0,14	115,91	0,12	0,13	107,30	0,12	0,12	104,84	0,12	0,12	100,71
22	0,09	0,08	91,43	0,10	0,10	95,85	0,10	0,09	92,83	0,10	0,09	90,53	0,10	0,09	88,50
23	0,11	0,12	109,72	0,11	0,11	103,07	0,11	0,10	98,32	0,11	0,10	95,52	0,11	0,10	93,71
24	0,12	0,13	103,56	0,12	0,12	97,06	0,12	0,12	97,68	0,12	0,12	101,92	0,12	0,12	98,99
25	0,10	0,11	108,26	0,10	0,09	94,15	0,10	0,09	87,53	0,10	0,09	87,26	0,10	0,09	87,76

Legenda: Estr. = estrato; n = número de árvores cubadas/intensidade amostral; média aritmética da variável de interesse, volume (m³); desvio padrão da variável de interesse, volume (m³); coeficiente de variação em porcentagem.

Fonte: dados da pesquisa.

Quadro 3 - Estatísticas descritivas calculadas para intensidade amostral variando de 6 a 10 dentro de cada estrato

Estr.	n = 6			n = 7			n = 8			n = 9			n = 10		
	\bar{x}	s	CV%	\bar{x}	s	CV%	\bar{x}	s	CV%	\bar{x}	s	CV%	\bar{x}	s	CV%
1	0,09	0,08	88,01	0,09	0,08	89,32	0,09	0,08	89,21	0,10	0,09	90,30	0,10	0,09	91,39
2	0,14	0,13	96,54	0,13	0,13	97,45	0,13	0,13	97,07	0,13	0,13	97,58	0,13	0,13	97,15
3	0,10	0,08	84,09	0,10	0,08	83,84	0,10	0,08	83,85	0,10	0,08	83,81	0,10	0,08	84,28
4	0,12	0,12	95,81	0,12	0,11	95,64	0,12	0,12	96,69	0,12	0,11	94,86	0,12	0,11	93,30
5	0,12	0,13	106,81	0,12	0,13	105,42	0,12	0,13	104,51	0,12	0,13	103,84	0,13	0,13	102,51
6	0,11	0,12	110,73	0,11	0,12	108,47	0,11	0,12	107,62	0,11	0,12	106,79	0,11	0,12	106,10
7	0,11	0,09	89,33	0,11	0,09	89,37	0,11	0,09	88,18	0,11	0,10	90,08	0,11	0,10	90,63
8	0,11	0,10	96,23	0,11	0,10	96,25	0,11	0,10	96,73	0,11	0,10	95,95	0,11	0,10	95,22
9	0,14	0,13	96,80	0,13	0,13	95,74	0,13	0,13	95,17	0,13	0,13	94,30	0,13	0,13	94,73
10	0,11	0,10	94,40	0,11	0,10	93,38	0,11	0,10	93,26	0,11	0,10	92,74	0,11	0,10	92,40
11	0,12	0,11	92,99	0,12	0,12	93,96	0,12	0,12	94,33	0,12	0,12	94,00	0,13	0,12	94,43
12	0,11	0,11	92,44	0,11	0,10	90,55	0,11	0,10	90,40	0,12	0,10	91,08	0,11	0,10	90,48
13	0,13	0,13	102,05	0,14	0,14	100,11	0,14	0,13	99,46	0,14	0,13	99,41	0,13	0,13	99,01
14	0,14	0,14	100,55	0,14	0,14	100,85	0,14	0,14	99,89	0,14	0,14	99,98	0,14	0,14	99,63
15	0,11	0,10	90,39	0,11	0,10	91,48	0,11	0,10	91,19	0,11	0,10	90,21	0,11	0,10	91,99
16	0,13	0,13	99,06	0,13	0,13	97,92	0,13	0,13	99,32	0,13	0,13	99,31	0,13	0,13	98,50
17	0,12	0,11	97,03	0,12	0,11	96,23	0,12	0,11	95,44	0,12	0,11	94,60	0,12	0,14	95,05
18	0,14	0,14	99,19	0,14	0,14	99,40	0,14	0,14	96,52	0,15	0,14	96,58	0,15	0,14	97,20
19	0,12	0,13	103,54	0,12	0,12	102,94	0,12	0,13	103,71	0,12	0,13	103,38	0,12	0,12	102,50
20	0,12	0,11	92,31	0,12	0,11	93,76	0,12	0,11	93,52	0,12	0,11	93,54	0,11	0,11	94,45
21	0,12	0,12	101,56	0,12	0,12	99,34	0,12	0,12	98,64	0,12	0,12	98,13	0,12	0,12	97,76
22	0,10	0,09	88,87	0,10	0,09	89,08	0,10	0,09	87,87	0,10	0,09	87,38	0,10	0,09	86,98
23	0,11	0,10	92,99	0,11	0,10	94,46	0,11	0,10	93,44	0,11	0,10	93,44	0,11	0,10	93,31
24	0,12	0,12	99,15	0,12	0,12	98,10	0,12	0,12	97,08	0,12	0,11	96,67	0,12	0,11	96,74
25	0,10	0,09	86,78	0,10	0,09	86,35	0,10	0,09	86,25	0,10	0,08	85,74	0,10	0,08	85,13

Legenda: Estr. = estrato; n = número de árvores cubadas/intensidade amostral; média aritmética da variável de interesse, volume (m³); desvio padrão da variável de interesse, volume (m³); coeficiente de variação em porcentagem.

Fonte: dados da pesquisa.

Os valores obtidos para os coeficientes de variação são considerados elevados (Quadro 2 e 3), retratando a alta variabilidade do volume, que ocorre devido as diferentes idades que compõem a amostra, que compreende árvores nas menores (árvores jovens) e maiores (árvores adultas) classes de diâmetro. A medida que o número de árvores amostradas por classe de diâmetro aumenta, ocorre a redução do coeficiente de variação.

A tendência de redução do coeficiente de variação com o aumento da intensidade amostral é esperada, uma vez que o aumento da amostra tem influência direta no desvio padrão, o qual dá origem ao coeficiente de variação. Esse comportamento foi descrito inicialmente pela lei empírica de Smith (1938) e desde então encontrado em muitos trabalhos de determinação de tamanho ótimo de parcelas experimentais (Paranaíba; Ferreira; Morais, 2009; Oliveira *et al.*, 2011; Morais *et al.*, 2014; Péllico Netto; Tello; Wandresen, 2014), em que embora se considere que quanto maior a intensidade amostral, maior a precisão, devido a redução do erro, essa relação não é linear. Com isso, o aumento da intensidade amostral, inicialmente, leva a uma diminuição do erro até um determinado ponto, a partir do qual o ganho em precisão é inexpressivo (Ramalho; Ferreira; Oliveira, 2012; Sousa *et al.*, 2015), de modo a não compensar os custos. Quanto ao tamanho ótimo de parcela experimental em testes clonais de Eucalipto, por exemplo, verificou-se que o aumento no número de plantas na parcela promove ganho significativo na precisão experimental, visto que o vértice da curva do coeficiente de variação experimental tende a ocorrer sempre na região das pequenas parcelas (Silva *et al.*, 2003). Deste modo, ressalta-se a importância da aplicação de métodos para a determinação do tamanho ótimo da amostra, mesmo que os trabalhos mais comuns neste tema abordem métodos para determinar o tamanho ótimo de unidades amostrais, não havendo trabalhos aplicados para a cubagem de árvores em plantios florestais.

No Quadro 4 estão apresentados os parâmetros estimados do modelo de Lessman e Atkins (1963), o erro padrão da estimativa (%) percentual e as intensidades amostrais de árvores obtidas pelos modelos de Méier e Lessman (1971) e de Chaves (1985). Observa-se, de modo geral, que o modelo proposto por Lessman e Atkins (1963) apresenta qualidade satisfatória de ajuste da regressão, com baixos valores de erro padrão da estimativa em percentagem (%). Com isso, pode-se dizer que o modelo retrata a tendência média do coeficiente de variação em função da intensidade amostral, justificando assim seu uso para estimativas de número de árvores a serem cubadas na estratificação.

Quadro 4 - Parâmetros estimados do modelo de Lessman e Atkins (1963) para cada estrato, o erro padrão da estimativa e as intensidades amostrais de árvores obtidas pelo modelo de Méier e Lessman (1971) e o modelo definido por Chaves (1985) para cada estrato

	a	b	(%)		
1	101,8900*	0,0734 ^{NS}	4,9734	5	6
2	101,3940*	0,0213*	0,8680	2	2
3	86,9785*	0,0198*	2,0234	1	1
4	105,8860*	0,0492*	1,8762	4	4
5	117,4770*	0,0575 ^{NS}	1,6632	5	5
6	117,7690*	0,0427*	0,6689	3	4
7	92,4917*	0,0111*	2,4652	1	1
8	104,5150*	0,0419*	1,2415	3	3
9	97,6700*	0,0120*	0,8983	1	1
10	102,3550*	0,0437*	0,6572	3	3
11	101,6270*	0,0385*	1,4959	3	3
12	102,4820*	0,0635*	2,6770	4	5
13	109,6000*	0,0416*	2,1382	3	3
14	115,6150*	0,0727*	1,7051	6	6
15	94,6983*	0,0225*	1,7840	2	1
16	110,4930*	0,0568 ^{NS}	2,0260	4	5
17	108,9670*	0,0664 ^{NS}	1,7444	5	5
18	112,5350*	0,0682 ^{NS}	1,0389	5	6
19	115,3130*	0,0557 ^{NS}	1,7479	4	5
20	98,8375*	0,0292*	1,4697	2	2
21	125,8050*	0,1207 ^{NS}	1,9583	9	13
22	94,4360*	0,0325*	2,0334	2	2
23	107,9510*	0,0731 ^{NS}	1,8240	5	6
24	101,8310*	0,0208*	1,9108	2	1
25	103,1510*	0,0954 ^{NS}	3,6159	6	8

Legenda: *a* e *b* = parâmetros estimados do modelo de Lessman e Atkins (1963); (%) = erro padrão da estimativa em percentagem; = intensidade amostral obtida pelo modelo definido por Méier e Lessman (1971); = intensidade amostral obtida pelo modelo definido por Chaves (1985); *significância para o teste t a 95%; NS = não significância para o teste t a 95% de probabilidade.

Fonte: dados da pesquisa.

Os dois modelos, Meier e Lessman (1971) e de Chaves (1985), em oito estratos (2, 3, 7, 9, 15, 20, 22 e 24) estimaram a intensidade amostral ótima de 1 a 2 árvores. Estes valores estão abaixo do que normalmente é aplicado por empresas florestais e recomendados na literatura (Scolforo; Thiersch, 2004), pois não refletem intensidade amostral confiável de árvores a serem cubadas. As demais intensidades amostrais ótimas obtidas pelo método da máxima curvatura a partir do modelo de Meier e Lessman (1971) variaram de 3 a 6 árvores. Já para o modelo de Chaves (1985) a intensidade amostral mostrou-se maior, em que o ganho em precisão é mais significativo.

Sousa *et al.* (2015) utilizando o método de Meier e Lessman (1971), ao determinar o tamanho adequado de parcela para avaliação do rendimento de grãos do girassol, verificaram que o maior valor do coeficiente de variação foi obtido no menor tamanho de parcela. Além disso, ocorreu uma redução contínua não linear deste coeficiente de variação com o aumento do tamanho da parcela. Sendo assim, o ganho

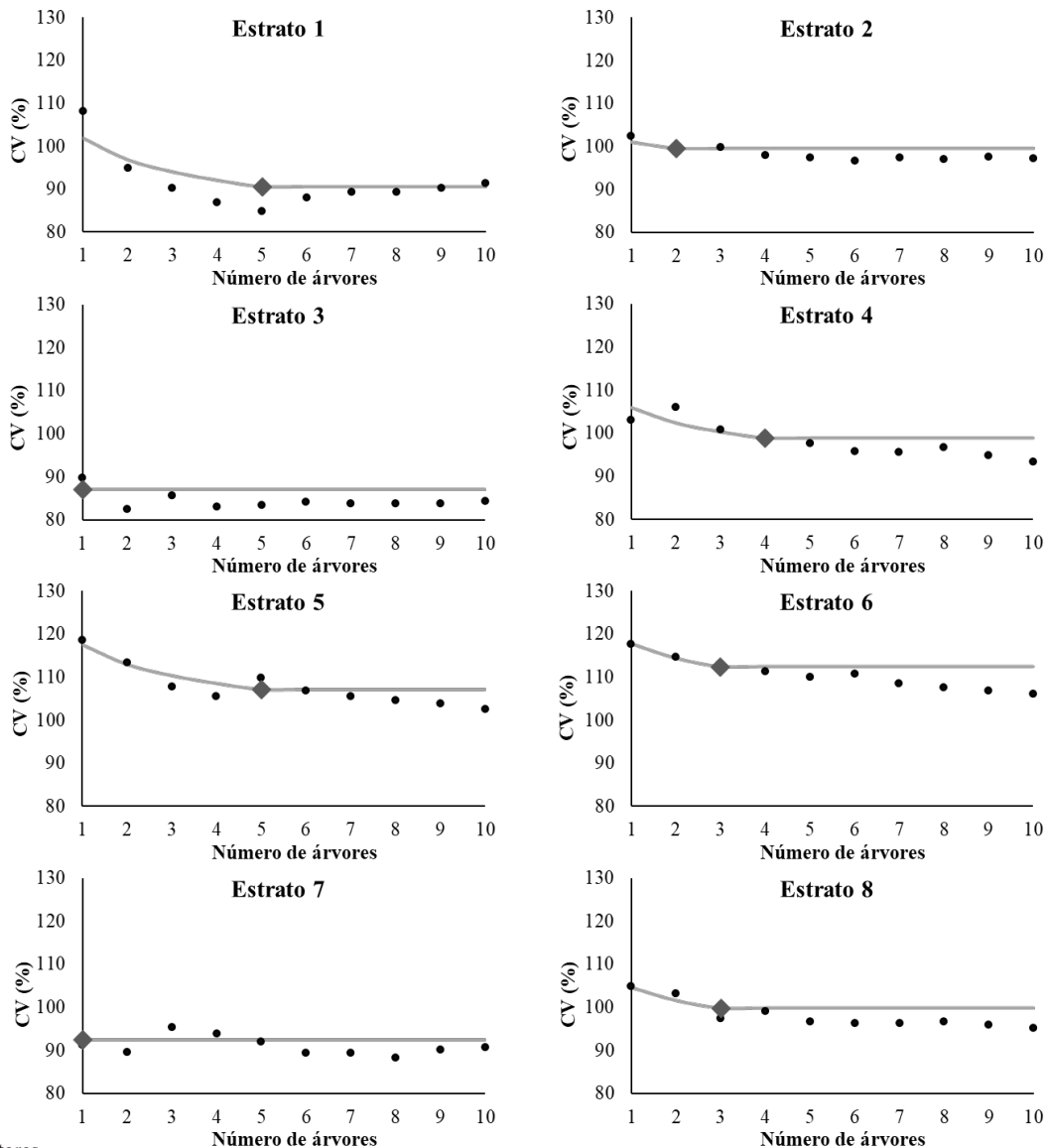
de precisão pela adição de mais uma área é significativa quando o tamanho da parcela é pequeno, mas depois que esta atinge o tamanho adequado, ganha-se pouco em precisão pelo aumento do tamanho da parcela com o incremento de mais área na parcela.

Silva *et al.* (2003) ressaltam que o método de Meier e Lessman (1971), por eles utilizado, possui a propriedade de determinar o ponto de máxima curvatura, de forma algébrica, considerando a máxima curvatura e o vértice da curva, mas não ponto de estabilização do coeficiente de variação experimental. Sendo assim, este método tende a subestimar o número ótimo de plantas por parcela, interferindo na análise e na predição do desempenho dos clones. Outros trabalhos demonstraram problemas de subestimação ao utilizar o método de Meier e Lessman (1971), pois este determinou tamanho de parcelas julgados inconsistentes e que não refletem tamanhos sensatos de parcelas experimentais (Henriques Neto *et al.*, 2009; Oliveira *et al.*, 2011).

O mesmo pode ser observado no presente trabalho (Quadro 4), no qual os estratos 3, 7 e 9 apresentaram intensidade amostral igual a uma árvore, em que tal número é de pouca aplicação prática, não podendo ser tomado como representativo, já que não possui repetição. Além disso, dentro de uma mesma classe diamétrica pode haver variação de forma e altura das árvores, resultando em volumes distintos (Campos; Leite, 2013).

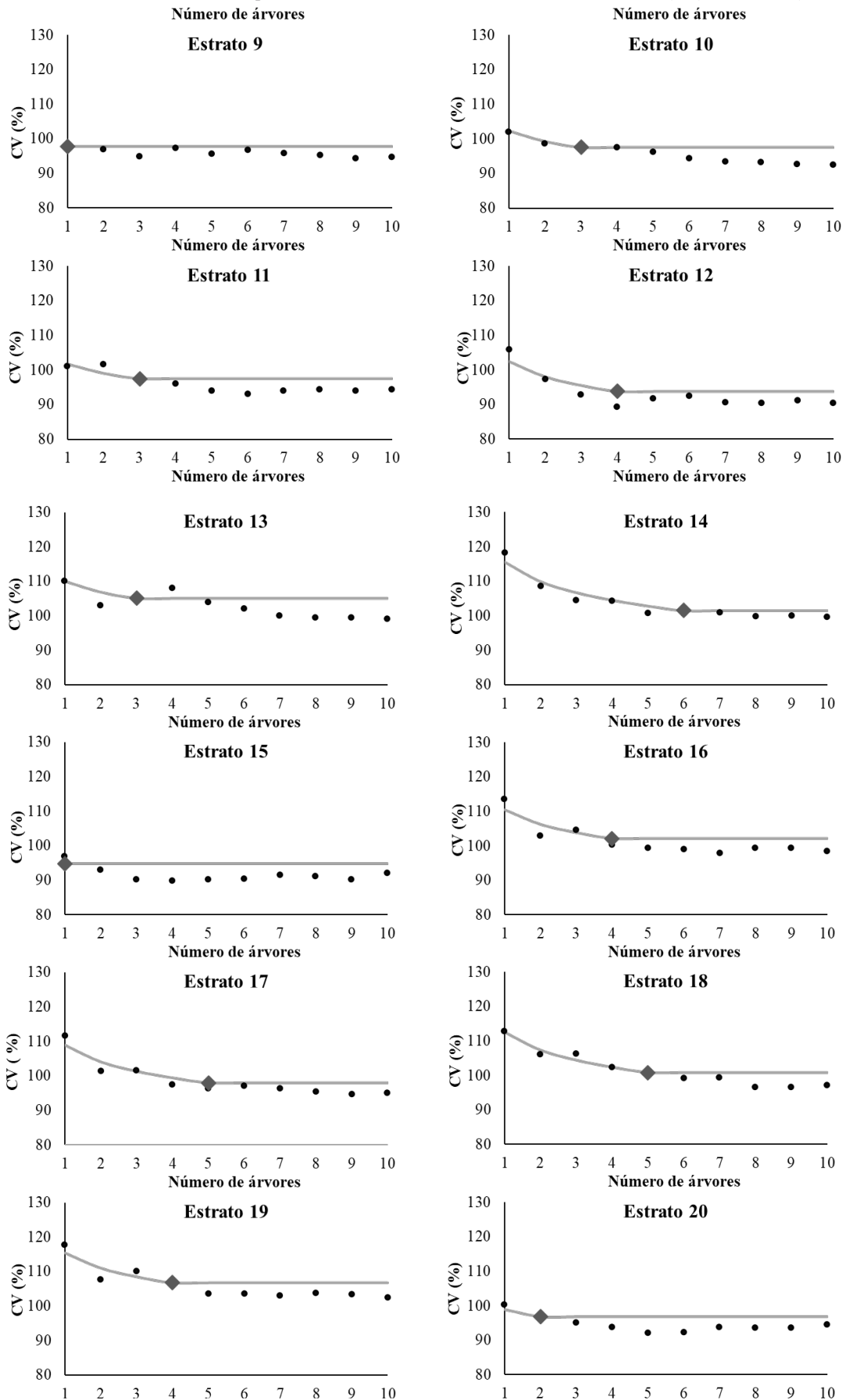
Na Figura 1 estão apresentados os valores observados, estimados e ponto de máxima curvatura do coeficiente de variação do volume para cada estrato avaliado. A medida que a amostragem inicial aumenta até uma intensidade amostral entre 3 e 6 árvores, na maioria dos estratos, o coeficiente de variação tende a reduzir ou estabilizar, o que pode ser observado pelo ponto de máxima curvatura. Isso mostra que, em média, a partir de 4 ou 5 árvores cubadas, o aumento da intensidade amostral não gera ganhos significativos de precisão.

Figura 1 - Valores observados, estimados e ponto de máxima curvatura do coeficiente de variação (CV) do volume (1 a 8)



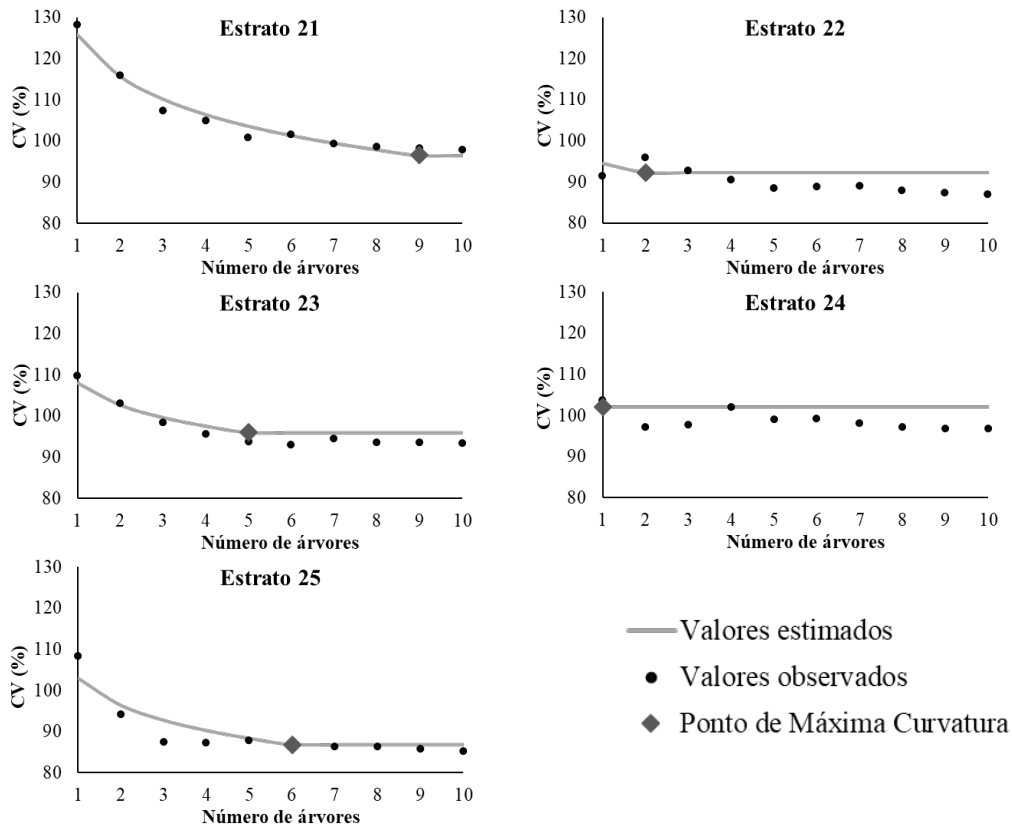
Fonte: os autores.

Figura 1 - Valores observados, estimados e ponto de máxima curvatura do coeficiente de variação (CV) do volume (9 ao 20)



Fonte: os autores.

Figura 1 - Valores observados, estimados e ponto de máxima curvatura do coeficiente de variação (CV) do volume (21 ao



Fonte: dados da pesquisa.

A interpretação da subestimação encontra apoio no trabalho de Lessman e Atkins (1963), em que os autores, ao propor tal método, utilizaram a notação referindo-se a um valor crítico, indicando que os valores obtidos por tal procedimento devem ser considerados como o limite mínimo de tamanho da unidade amostral, e não como ótimo. Baseado nesta interpretação, Chaves (1985) propôs um novo modelo para corrigir o problema da subestimação do método de Meier e Lessman (1971). Oliveira *et al.* (2011) ao estimar o tamanho da unidade amostral em experimentos com *Eremanthus erythropappus* (candeia) pelo método de Chaves (1985), encontraram tamanhos coerentes para a espécie estudada, de modo que o método permitiu resultados consistentes para a estimativa das variáveis analisadas, diâmetro, altura e volume.

Dos 25 estratos avaliados, a maioria resultou em intensidades amostrais de árvores estimadas pelo modelo de Chaves (1985) iguais ou superiores aos estimados pelo modelo de Méier e Lessman (1971), a exceção dos estratos 15 e 24. Nove estratos (1, 6, 12, 16, 18, 19, 21, 23 e 25) apresentaram intensidade amostral pelo modelo de Chaves (1985) superiores aos obtidos pelo modelo de Méier e Lessman (1971), em que o aumento da intensidade de um método para o outro variou entre estratos, chegando a ser de quatro árvores. Oliveira *et al.* (2011), também obtiveram valores superiores ao utilizar o método de Chaves (1985) para obter o tamanho ótimo da unidade amostral para avaliação das principais características dendrométricas em plantios experimentais de candeia, em que para as variáveis diâmetro e volume foi obtida intensidade

amostral pelo menos o dobro da recomendada pelo método de Méier e Lessman (1971).

Porém, de modo geral, ambos os métodos apresentaram resultados consistentes para a estimativa da intensidade amostral de árvores a serem cubadas, de modo que o fator limitante para a definição do número de árvores a ser cubada passa a ser o custo, já que o ganho em precisão pode não compensar o acréscimo de custos.

Considerando um custo médio de R\$ 23,28 por árvore de eucalipto (BINOTI *et al.*, 2013), apenas referente a coleta de dados para cubagem e fazendo a correção desse valor considerando 8,32% de inflação (BCB, 2016), têm-se o valor de R\$ 29,58 por árvore. Assim, dependendo do estrato, a cubagem pelo número ótimo obtido por Chaves (1985), resulta em um aumento de até R\$ 118,32 por classe diamétrica nos custos referente a coleta de dados. E considerando o aumento de apenas uma árvore para a cubagem pelo número ótimo obtido por Chaves (1985), ao aumentar tal intensidade amostral em todas as classes diamétricas, verifica-se um acréscimo de R\$ 207,06 por estrato. Tais informações fortalecem a importância da redução da intensidade amostral de forma a garantir o menor custo sem deixar de atingir precisão aceitável da estimativa das equações de volume.

Em ambos os modelos, as intensidades amostrais ótimas de árvores estiveram no intervalo de 3 a 6 árvores por estrato, a exceção de dois estratos (21 e 25) que apresentaram necessidade de intensidade amostral maior (Quadro 4 e Figura 1). Sendo assim, a fim de reduzir erros na amostragem

de árvores de *Eucalyptus* sp. a serem cubadas, independente do estrato, recomenda-se no mínimo 3 árvores por classe diamétrica, considerando uma amplitude 2,5 cm. Leal *et al.* (2015) ao sugerirem a divisão por classe diamétrica com amplitude de 2 cm para a estimativa do volume das árvores de *Eucalyptus urophylla*, verificaram a necessidade de esforço amostral de oito árvores por classe diamétrica, como necessário para gerar as estimativas, sendo muito superior ao obtido no presente trabalho.

De acordo com Scolforo e Thiersch (2004), para plantações florestais pode-se definir um número mínimo de 30 árvores por idade, por grupo de idades ou por estrato. Porém, o número de árvores amostradas em cada classe dependerá da amplitude das mesmas. Assim, quanto maior a variabilidade do diâmetro ou a diferença entre o maior e o menor diâmetro, maior o número de árvores a serem cubadas. Os autores recomendam um número mínimo de árvores a serem cubadas, de acordo com a amplitude das classes diamétricas, sendo de 4 a 5 árvores, caso seja utilizada amplitude de classe de 2,0 cm, de 5 a 7 árvores, se a amplitude for de 3,0 cm e, de 8 a 10 árvores por classe de diâmetro, se a amplitude for 5,0 cm, porém os autores não apontam os estudos sobre a obtenção destas intensidades.

Já Campos e Leite (2013) sugerem para o ajuste de modelos volumétricos para pinus e eucalipto um valor entre 100 e 150 árvores com mesma frequência nas classes diamétricas e com árvores colhidas em toda a população, de maneira que esta seja bem representada. Diante das recomendações difundidas na área florestal com relação a intensidade amostral ótima de árvores para a cubagem rigorosa, com vias a reduzir os custos de inventário, o método de máxima curvatura modificado fornece resultados satisfatórios, pois estabelece uma equação de regressão para explicar a relação entre os coeficientes de variação e as respectivas intensidades amostrais.

4 Conclusão

A estratificação da floresta possibilita a redução da intensidade amostral da cubagem rigorosa.

O método da máxima curvatura modificado é eficiente e pode ser utilizado para determinar a intensidade amostral ótima na cubagem rigorosa.

O número ótimo de árvores a serem cubadas rigorosamente em plantios de Eucalipto, é de três a seis árvores por classe de diâmetro com amplitude de 2,5 cm, considerando as condições deste estudo.

Referências

BANCO CENTRAL DO BRASIL. *Histórico de Metas para a Inflação no Brasil*. Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/Pec/metas/TabelaMetaseResultados.pdf>>. Acesso em: 23 set. 2023.

BINOTI, D. H. B. *et al.* Redução dos custos em inventário de povoamentos equiâneos. *Rev Bras. Ciênc. Agrár.*, v.8, n.1, p.125-129, 2013. doi: 10.5039/agraria.v8i1a2209

BRITO, M. C. M. *et al.* Estimação do tamanho ótimo de parcela via regressão antitônica. *Revista Brasileira de Biometria*, v. 30, p. 353-366, 2012.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. *Mensuração Florestal: Perguntas e Respostas*. Viçosa: UFV, 2013..

CHAVES, Lázaro José. *Tamanho da parcela para seleção de progênies de milho (Zea mays L.)*. Piracicaba: São Paulo, 1985.

COSTA, E. A. *et al.* Função de afilamento e sortimentos de madeira para *Araucaria angustifolia*. *Ciênc. Florestal*, v.26, n.2, p.523-533, 2016. doi: 10.5902/1980509822753

HENRIQUES NETO, D. *et al.* Tamanho de parcela para avaliação da produção em trigo irrigado, sob dois sistemas de plantio. *Rev Ciênc. Agron.*, v.40, n.1, p.86-93, 2009.

KERSHAW, JR. J.A *et al.* *Forest Mensuration*. Chichester; Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2017.

LEAL, F.A. *et al.* Amostragem de árvores de *Eucalyptus* na cubagem rigorosa para estimativa de modelos volumétricos. *Rev Bras. Biometria*, v. 33, n. 1, p. 91-103, 2015.

LESSMAN, K.J.; ATKINS, R.E. Optimum plot size and relative efficiency of lattice designs for grain sorghum yield test. *Crop Science*, v. 3, n. 6, p. 477-481, 1963. doi: 10.2135/cropsci1963.0011183X000300060006x

MACHADO, S.A.; FIGUEIREDO FILHO, A. *Dendrometria*. Guarapuava: UNICENTRO, 2009..

MEIER, V.D.; LESSMAN, K.J. Estimation of optimum field plot shape and size for testing yield in *Crambe abyssinica* Hochst. *Crop Sci.*, v.11, n.5, p.648-650, 1971. doi: 10.2135/cropsci1971.0011183X001100050013x

MORAIS, A. R. *et al.* Estimação do tamanho de parcela para experimento com cultura de tecidos em videira. *Semina Ciênc. Agrárias*, v.35, n.1, p.113-124, 2014. doi: 10.5433/1679-0359.2014v35n1p113

OLIVEIRA, G. M. V *et al.* Tamanho e forma de parcelas experimentais para *Eremanthus erythropappus*. *Cerne*, v.17, n.3, p.327-338, 2011. doi: 10.1590/S0104-77602011000300006

PARANAÍBA, P.F.; FERREIRA, D.F.; MORAIS, A.R. Tamanho ótimo de parcelas experimentais, proposição de métodos de estimação. *Rev Bras. Biom.a*, v.27, n.2, p.255-268, 2009.

PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D.A. *Inventário florestal*. Curitiba: Os Autores, 1997.

PÉLLICO NETTO, S.; TELLO, J.C.R.; WANDRESEN, R.R. Size and Shape of Sample Units in Native Forests and Plantations. *Open J. Forestr.*, v.4, n.4, p.379-389, 2014. doi: 10.4236/oj.2014.44043

RAMALHO, M.A.P.; FERREIRA, D.F.; OLIVEIRA, A.C. *Experimentação em genética e melhoramento de plantas*. Lavras: UFLA, 2012.

SCOLFORO, J.R.S.; THIERSCH, R. *Biometria florestal: medição, volumetria e gravimetria*. Lavras: UFLA, 2004.

SILVA, R.L. *et al.* Determinação do tamanho ótimo da parcela experimental pelos métodos da máxima curvatura modificado, do coeficiente de correlação intraclasse e da análise visual em testes clonais de eucalipto. *Rev Arvore*, v.27, n.5, p.669-676, 2003. doi: 10.1590/S0100-67622003000500009

SMITH, H.F. An empirical law describing heterogeneity in the yields of agricultural crops. *J. Agricul. Sci.*, v.28, p.1-23, 1938. doi: 10.1017/S0021859600050516

SOUSA, R.P. *et al.* Tamanho ótimo de parcela para avaliação do rendimento de grãos do girassol. *Revi Bras. Eng. Agríc. Amb.*, v. 9, n.1, p.21-26, 2015. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v19n1p21-26