



AVALIAÇÃO DO USO DE ÍNDICES DE UNIFORMIDADE EM MODELOS DE CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DE PLANTIOS CLONAIIS DE *Eucalyptus* spp.

BARRETO, Bruno Rodrigues de Lima¹; SAITO, Atny Miho²; BERNARDI, Lucas Kröhling³;
PAULA-SANTOS, Maria Inês Corrêa de⁴; THIERSCH, Cláudio Roberto⁵

RESUMO (AVALIAÇÃO DO USO DE ÍNDICES DE UNIFORMIDADE EM MODELOS DE CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DE PLANTIOS CLONAIIS DE *Eucalyptus* spp.) – Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da uniformidade silvicultural na produtividade quando analisada em conjunto com modelos de predição volumétrica. A uniformidade do plantio foi mensurada a partir do volume (m³/ha) total com casca através de quatro índices: CUA, CUD, CUB e PV50. Nos modelos ajustados, todos os parâmetros foram altamente significativos e quanto melhor a qualidade do sítio analisada, maior a influência que a uniformidade exerce sobre a produtividade. Espera-se que os índices selecionados possam ser utilizados como indicadores e possam auxiliar manejadores florestais no processo de tomada de decisão de maneira simples e sem custos adicionais.

Palavras-chave: PV50; qualidade de sítio; produtividade.

ABSTRACT (ASSESSMENT OF UNIFORMITY INDICES USED IN GROWTH AND PRODUCTION MODELS OF CLONAL *Eucalyptus* spp. PLANTATION.) – This study had as a purpose to evaluate the influence of silvicultural uniformity on productivity when analyzed with volumetric prediction models. The uniformity of the planting was measured from the total volume (m³/ha) with bark through four indexes: CUA, CUD, CUB and PV50. In the adjusted models, all parameters were highly significant and the better the quality of the analyzed site, the greater the influence that uniformity exerts on productivity. It is expected that the selected indexes can be used as indicators and can assist forest managers in the decision-making process in a simple way and without additional costs.

Keywords: PV50; site quality; productivity.

¹ Eng. Florestal – Centro de Ciências e Tecnologias Para a Sustentabilidade, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, 18052-780, Sorocaba, SP, Brasil. b_limabarreto@hotmail.com

² Eng. Florestal – Centro de Ciências e Tecnologias Para a Sustentabilidade, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, 18052-780, Sorocaba, SP, Brasil. atnysaito@gmail.com

³ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, 18052-780, Sorocaba, SP, Brasil. bernardilucas93@gmail.com

⁴ Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, 18052-780, Sorocaba, SP, Brasil. micpsant@gmail.com

⁵ Docente do Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis, Departamento de Ciências Ambientais, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, 18052-780, Sorocaba, SP, Brasil. crthiersch@ufscar.br

1. INTRODUÇÃO

A dinâmica florestal é constantemente influenciada por fatores naturais e antrópicos como condições edafoclimáticas, qualidade e intensidade de tratos silviculturais e características genéticas da árvore que interferem diretamente na uniformidade e produtividade dos povoamentos. Nesse sentido, o inventário florestal é uma ferramenta fundamental para estimar as características qualitativas e quantitativas de florestas, ocupando papel central no planejamento dos plantios e no processo de tomada de decisão.

Diversos autores já propuseram o uso de diferentes metodologias que auxiliam o inventário florestal, com o intuito de se obter estimativas das variáveis dendrométricas com o menor erro possível, dentre eles: Carvalho (2013) que utilizou a tecnologia LiDAR para estimativa volumétrica, Mello (2004) com o uso de geoestatística e Moreno et al. (2019) com o emprego de redes neurais artificiais. No entanto, poucos trabalhos propõem maneiras de avaliar a qualidade de florestas plantadas, principalmente em plantios de 2 a 3 anos de idade. Assim, um método que possibilite a avaliação qualitativa de plantios combinado com a estimativa da produção volumétrica, seria uma ferramenta de planejamento de grande

utilidade para manejadores florestais, permitindo a comparação de áreas e estimativas de variação de volume. Nesse contexto, o uso de índices de uniformidade combinado com modelos de produção volumétrica, podem auxiliar na elaboração de tal ferramenta.

A uniformidade de plantios é diretamente afetada pelo fornecimento parcial ou heterogêneo de fatores bióticos e/ou abióticos e da qualidade das operações silviculturais. Segundo Hakamada (2012), a seleção de índices de uniformidade depende das seguintes características como requisitos: capacidade de contemplar diferenças na distribuição dos indivíduos em diferentes classes da variável dendrométrica de interesse; sensibilidade às variações de grandeza da variável de interesse; e possuir limites, que facilitem a interpretação do índice quando o objetivo é a elaboração de intervalos fixos.

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência da uniformidade silvicultural (mensurada através de índices de uniformidade) quando utilizada em conjunto com os modelos de crescimento e produção, com a finalidade de se obterem indicadores no inventário florestal que norteiem os tomadores de decisão quanto à produtividade do povoamento associado à sua uniformidade.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Material e métodos

Localização

A região de estudo encontra-se na região nordeste do Estado de São Paulo, com predominância de latossolo vermelho escuro e clima Aw, segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, o local tem como uso da terra mais expressivo o plantio de eucalipto comercial.

Coleta e processamento de dados

Foram utilizadas 105 parcelas circulares de 400 m² distribuídas sistematicamente em uma área total de 850,52 hectares de floresta implantada no primeiro trimestre de 2011. As mensurações foram realizadas aos 28, 37, 49 e 59 meses após o plantio. Os dados coletados foram: DAP (diâmetro a 1,30m da altura do solo), material genético, número de fustes por hectare, situação do fuste e altura total de aproximadamente 20% das árvores e altura das árvores dominantes segundo o conceito de Assman. Foram cubadas algumas árvores fora da parcela, e o volume foi calculado através do método de Smalian, posteriormente sendo aplicado o modelo de Schumacher & Hall na sua forma logarítmica para a estimativa do volume total para o povoamento:

$$\ln(vtcc) = \beta_0 + \beta_1 \times (\ln DAP) + \beta_2 \times (\ln(Ht_{est})) + \varepsilon \quad 01$$

Em que:

ln: Logaritmo natural;

vtcc: Volume (m³/hectare);

β_i : Parâmetros a serem ajustados;

DAP: Diâmetro à altura do peito (1,30 m acima do solo);

Ht_{est}: Altura (m) estimada;

ε : Erro aleatório.

Para estimar a altura das árvores foi utilizado o seguinte modelo hipsométrico:

$$H = \exp\left(\beta_0 + \beta_1 \times \left(\frac{1}{DAP}\right) + \beta_2 \times \ln(H_{dom})\right) + \varepsilon \quad 02$$

Em que:

ln: Logaritmo natural;

H: Altura (m);

β_i : Parâmetros a serem estimados;

DAP: Diâmetro à altura do peito (1,30 m acima do solo);

H_{dom}: altura dominante

ε : Erro aleatório.

As parcelas tiveram seu índice de sítio calculado de acordo com o modelo de Bailey-Clutter em sua forma anamórfica:

$$Hd_2 = \frac{Hd_1}{\exp^{\beta_1 \times (id_1^{\beta_2} - id_2^{\beta_2})}} + \varepsilon \quad 03$$

Em que:

Hd_2 : Altura dominante estimada;

Hd_1 : Altura dominante na primeira medição;

β_i : Parâmetros a serem ajustados do modelo estatístico;

Id_1 : idade presente;

Id_2 : Idade futura; e

ε : Erro aleatório.

Uniformidade Silvicultural

A uniformidade silvicultura do povoamento foi calculada com os dados da primeira medição, aos 28 meses de idade, através de quatro índices de uniformidade:

$$Cud = \frac{Q25}{Qm} \quad 04$$

$$Cua = \left(\frac{Q25}{Qm} + \frac{Qm}{Q12} \right) \quad 05$$

$$Cub = \frac{Q50}{Qm} \quad 06$$

$$Pv50 = \frac{\sum_{k=1}^{n/2} V_{ij}}{\sum_{k=1}^n V_{ij}} \quad 07$$

Em que:

Cud : Coeficiente de distribuição;

Cua : Coeficiente de distribuição absoluto;

Cub : Coeficiente de distribuição básico;

$Pv50$: Índice pv50;

Qm : Volume médio (m³/ha);

$Q25$: Média de volumes iguais ou inferiores ao volume da posição 25%;

$Q12$: Média de volumes iguais ou inferiores ao volume da posição 12,5%; e

$Q50$: Média de volumes iguais ou inferiores ao volume da posição 50%.

Os índices CUD e CUA foram adaptados de índices utilizados corriqueiramente na área de Irrigação e Drenagem, sendo a variável vazão simplesmente substituída pela variável volume. Já o índice Pv50, é um índice de uniformidade proposto por Stape, Rocha e Donatti (2006) e utilizado por Hakamada (2012), o qual representa a porcentagem acumulada do volume de 50% das menores árvores.

Predição da área basal

Para seleção do índice de uniformidade, foi utilizado como critério de seleção aquele que proporcionou o melhor ajuste do modelo de área basal. Adotou-se como critério de seleção do melhor ajuste a visualização gráfica da distribuição dos resíduos e o valor do erro padrão residual. Na expressão (8) pode-se observar que o modelo utilizado expressa a variação da área basal em função do índice de sítio, do índice de uniformidade e da idade:

$$\ln(ab) = \alpha_0 + \frac{\alpha_1}{S} + \alpha_2 \times \text{índice} \times \exp^{\beta_1 \times \frac{1}{id^{\beta_2}}} + \varepsilon \quad 08$$

Em que:

$\ln(ab)$: Logaritmo natural da Área basal (m²/ha);

α, β : Parâmetros da regressão;

S: índice de sítio (referente à altura dominante, em m);

id : idade futura;

índice : Índice de uniformidade;

ε : Erro aleatório.

Predição volumétrica

Para a predição volumétrica foi utilizado o modelo apresentado na expressão 9:

$$\ln(vtcc) = \beta_0 + \frac{\beta_1}{S} + \beta_2 \times \left(\frac{1}{id_2}\right) + \beta_3 \times \ln(ab) + \varepsilon \quad 09$$

Em que:

$\ln(vtcc)$: Logaritmo natural do Volume (m³/ha);

β_i : Parâmetros da regressão;

$\ln(ab)$: Logaritmo natural de Área basal (m²/ha);

S: índice de sítio (referente à altura dominante, em m);

ε : Erro aleatório.

Análise de sensibilidade

Visando analisar a influência da uniformidade em termos de produtividade, os modelos de crescimento e produção foram aplicados considerando diferentes valores do índice de uniformidade previamente selecionado.

2.2. Resultados e Discussão

Uniformidade Silvicultural

Os índices representam a uniformidade do povoamento de diferentes maneiras, com exceção dos índices CUB e Pv50, que apresentam um gráfico com comportamento semelhante, formando uma curva assimétrica à esquerda (Figura 1). O CUD retrata com maior ênfase as parcelas que contém falhas, apresentando de forma visual, nesse caso, uma indicação precisa de que a área em questão foi submetida a algum processo que diminuiu muito a uniformidade do povoamento, podendo estar associado a deficiências nas práticas de manejo, como a diminuição da qualidade do manejo silvicultural (controle de formigas, aplicação de herbicidas, adubação). Na mensuração da uniformidade através do CUA, a maioria das parcelas tem sua uniformidade variando de 0,2 a 0,9 (sendo 1 o valor máximo).

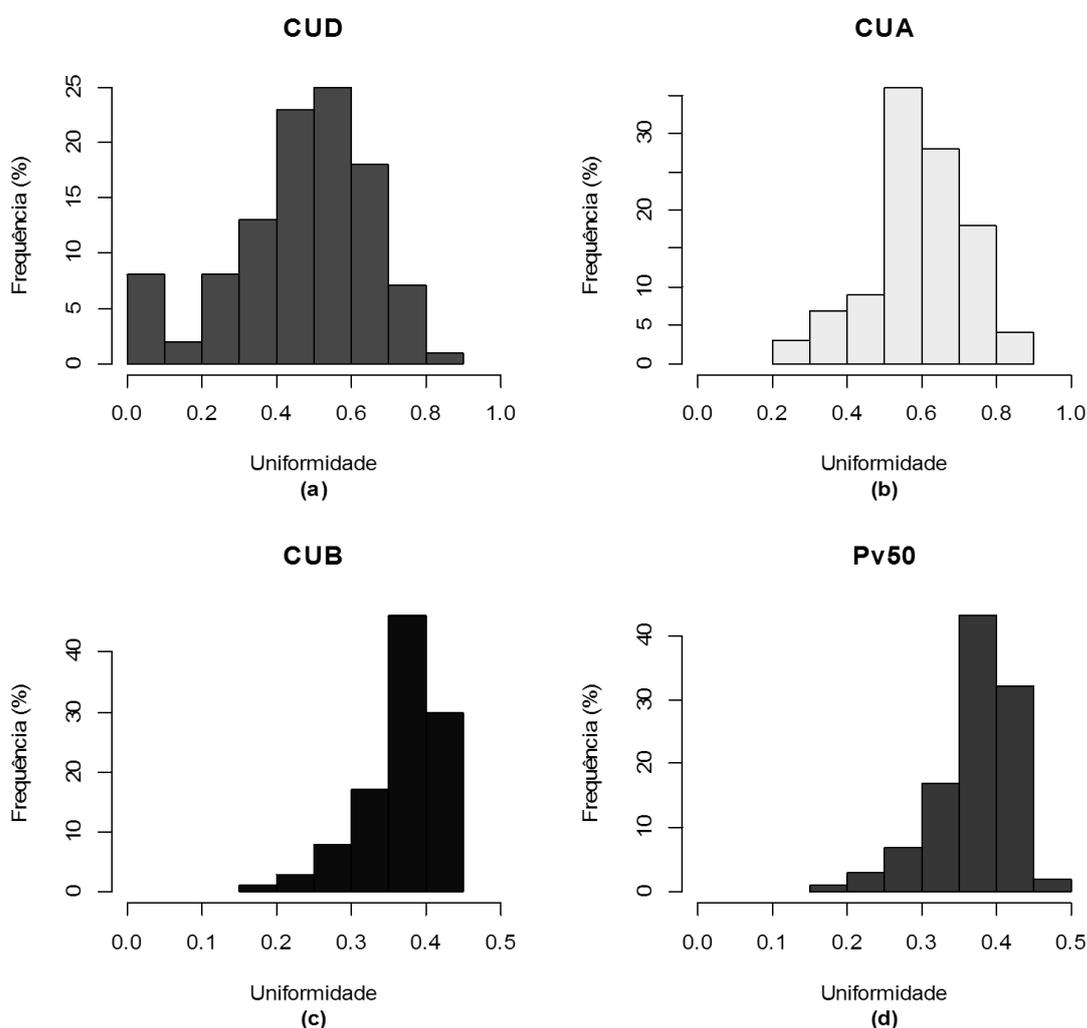


Figura 1. Uniformidade por parcela (a) CUA, (b) CUD, (c) CUB e (d) PV50.

Para a mensuração através dos índices CUB e Pv50, nota-se que há um grande número de parcelas que têm uniformidade variando de 0,35 a 0,45, sendo 0,5 o máximo atingível. A média de uniformidade de volume das parcelas mensuradas através do índice pv50 foi de 0,3687. Hakamada (2012) encontrou valores médios de 0,42 de uniformidade do

pv50 para plantios implantados em 2009 em plantios do nordeste de São Paulo.

No entanto, essas informações não permitem análises ou conclusões detalhadas a respeito da qualidade silvicultural do povoamento, visto que é possível ter uma grande uniformidade se a maioria das árvores for alta, ou se a maioria das árvores for baixa.

Predição de área basal

O resultado das estatísticas do modelo de área basal aplicado para os índices analisados pode ser observado na Tabela 1.

O índice CUD foi desconsiderado das etapas seguintes por não ter apresentado parâmetros estatísticos significantes. O valor de erro padrão residual obtido para cada um dos índices foi condizente com valores encontrados na literatura. Santana *et al.* (2005) encontrou um valor de erro

residual de 3,9% ao projetar a área basal pelo modelo de Clutter. No entanto, Castro *et al.* (2015) encontraram um valor de 9,3% quando analisaram a eficiência da aplicabilidade da capacidade produtiva pelo índice de sítio, tanto pelo método da Curva Guia quanto pelo Método da Equação das Diferenças e consideraram o modelo adotado como eficiente, mesmo com o valor encontrado.

Tabela 1. Parâmetros do modelo quando cada índice é adicionado como uma variável do modelo

Parâmetros	CUA	CUB	PV50	Modelo sem índices
α_0	3,8156862*	3,74558*	3,74893*	2.44*
α_1	-20,0279234*	-20,55972*	-30,20966*	0.027878*
α_2	0,2113215*	0,58110*	0,54553*	-
β_1	-32,4316465	-32,51229	-32,48925	-32,394943
β_2	1,5015477*	1,50243*	1,50219*	1,501235*
Erro padrão residual (m²/ha)	1,250	1,240	1,246	1,307
Erro padrão residual (%)	7,34	7,28	7,32	7,68

*Parâmetro demonstrou ser significativo.

Na Figura 2 pode-se observar que quando a variável índice de uniformidade, mensurada através do CUB é adicionada, a distribuição dos resíduos do modelo não apresenta tendenciosidade. Como todos os índices apresentaram gráfico de distribuição de resíduos com comportamento semelhante, o erro padrão

residual foi utilizado como critério definidor do melhor índice de uniformidade. O índice CUB foi o que apresentou melhor desempenho nesse estudo dentre os quatro índices estudados. Dessa forma, para a predição do volume, o CUB foi o único índice considerado.

Predição de área basal

A Tabela 2 apresenta os parâmetros estatísticos do modelo de predição volumétrica utilizado.

O valor do índice de Furnival percentual encontrado é semelhante ao valor de 3,82% encontrado por SCHNEIDER, COELHO, et al., (1997) os quais analisaram diferentes equações de volume total com casca em plantios de *Eucalyptus dunii* Maiden no Rio Grande do Sul em espaçamento 3x2m. O índice de Furnival permite a comparação de modelos florestais cujos erros padrão residuais estejam em escalas logarítmica e aritmética (GOMES e GARCIA, 1993). Berger (2000), obteve valores de 0,7, e 1,1 ao utilizar diferentes modelos de predição de volume ao analisar o efeito do espaçamento e adubação sobre o crescimento e qualidade da madeira em um clone de *Eucalyptus saligna* Smith.

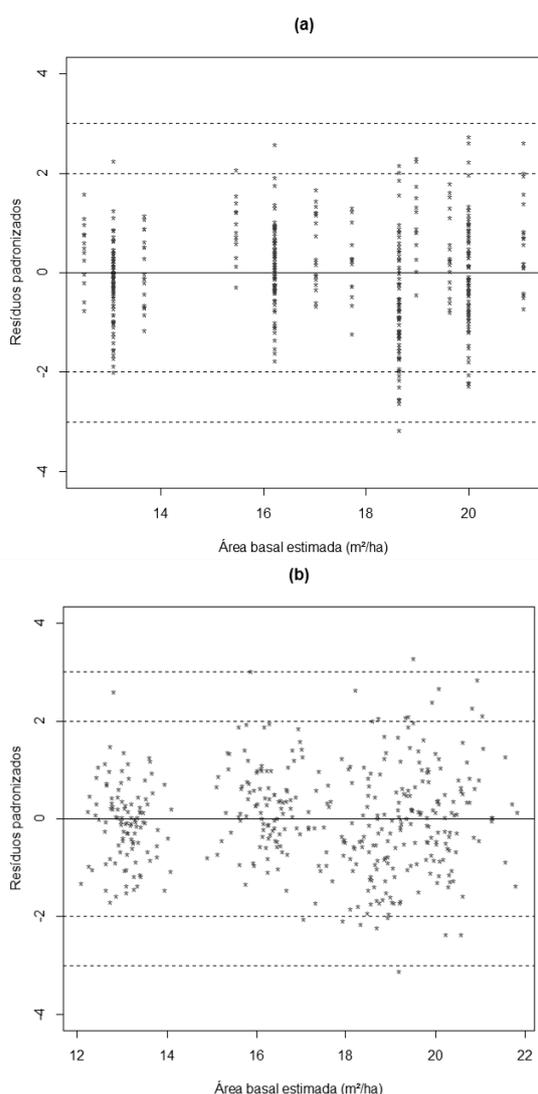


Figura 2. Distribuição dos resíduos padronizados do modelo de predição de área basal, sem (a) e com (b) a adição do índice de uniformidade.

Tabela 2. Parâmetros e medidas de precisão do modelo de predição volumétrica

Parâmetros do Modelo	Índice de Furnival (m³/ha)	Índice de Furnival (%)
β_0	2,97433*	
β_1	-18,90736*	
β_2	-19,52433*	6,11
β_3	1,13432*	3,9

*Parâmetro demonstrou ser significativo.

É de primordial importância que as estimativas de produção estejam dentro de um valor aceitável de erro, visto que estimativas imprecisas acarretam em um mau planejamento do ciclo florestal e consequentemente prejudica o processo de tomada de decisão, trazendo prejuízos econômicos (MIRANDA, JUNIOR e GOUVEIA, 2015).

Análise de sensibilidade

A Figura 3 mostra a produção de volume estimado da floresta aos 7 anos de idade (idade de colheita) nos quartis 25%,

50% e 75% para cada classe de sítio do povoamento. Os resultados mostram que à medida que a uniformidade mensurada através do CUB aumenta, há um maior valor de volume estimado, mostrando que para a base de dados da região estudada, com os modelos e índice de uniformidade selecionado, a uniformidade explica de maneira altamente significativa e com uma relação direta de que quanto maior a uniformidade mensurada através do CUB, maior o volume estimado, consequentemente, maior a produtividade da floresta.

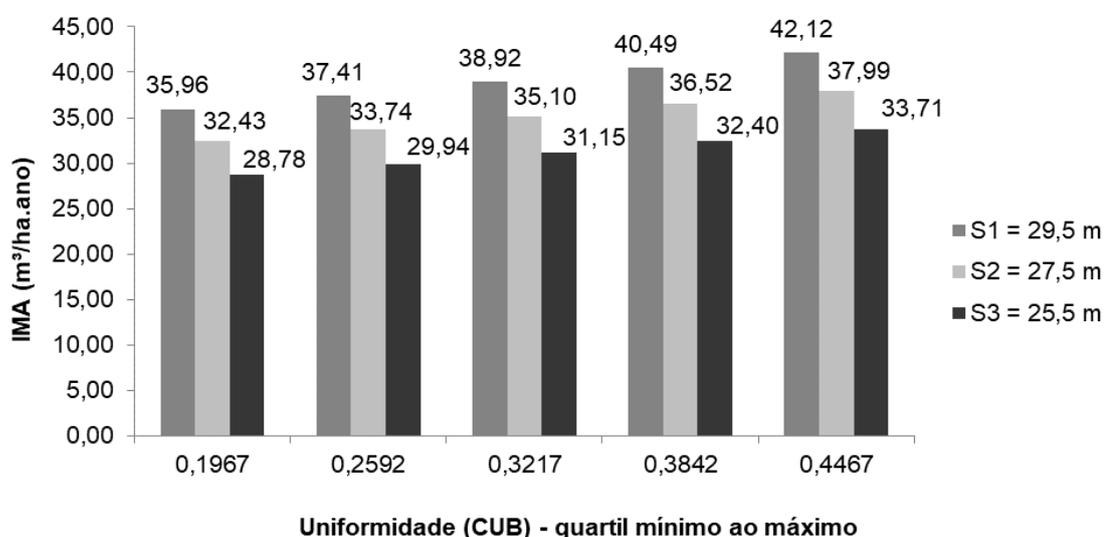


Figura 3. Variação da produtividade florestal estimada em função da variação na uniformidade mensurada através do CUB para diferentes quartis encontrados nas parcelas.

A Tabela 3 exhibe o ganho anual médio em volume total com casca por hectare em função de um acréscimo em 20% da uniformidade, mostrando que a

uniformidade exerce uma influência significativa na produtividade da floresta, sendo que quanto melhor o sítio, mais expressiva é essa influência.

Tabela 3. Ganho médio anual em volume (m³/ha) a cada 20% de aumento na uniformidade mensurada através do índice CUB.

Idade (anos)	Sítio 1 29,5 m	Sítio 2 25,5 m	Sítio 3 23,5 m
	Volume estimado (m ³ /hectare)		
2	2,343	2,137	1,922
3	5,009	4,543	4,058
4	7,135	6,454	5,746
5	8,711	7,868	6,994
6	9,885	8,920	7,921
7	10,779	9,721	8,626

4. CONCLUSÃO

Os índices de uniformidade selecionados foram eficazes em mensurar a uniformidade de produção volumétrica estimada da floresta e, quando associados ao sítio, exercem influência expressiva na variação da produtividade do povoamento, de modo que com os modelos e índices adotados para essa área de estudo, quanto maior a uniformidade, maior a produtividade do povoamento. Os índices de melhor desempenho foram o CUB e o PV50.

A diferença entre as parcelas de uniformidade mínima e máxima geraram uma diferença de mais de 6 m³/ha/ano para a melhor classe de sítio e aproximadamente 5 m³/ha/ano para a pior classe de sítio. Assim, quanto melhor a qualidade do sítio, maior a influência que a uniformidade exerce sobre a produtividade.

5. REFERÊNCIAS

- BENDEL, R. B. et al. Comparison of skewness coefficient, coefficient of variation and Gini coefficient as inequality measures within populations. *Oecologia*, Berlin, v. 78, p. 394-400, 1989
- BERGER, R. Crescimento e qualidade da madeira de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith sob o efeito do espaçamento e da fertilização. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2000. (Dissertação de Mestrado).
- CARVALHO, S. D. P. C. E. Estimativa volumétrica por modelo misto e tecnologia laser aerotransportada em plantios clonais de *Eucalyptus* sp. Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Piracicaba - SP, p. 105. 2013. (Tese de Doutorado).
- CASTRO, R. V. O. et al. Modelagem do crescimento e produção para um povoamento de *Eucalyptus* utilizando dois métodos para quantificação do índice de local. *Scientia Florestalis*, Piracicaba, v. 43, n. 105, p. 83-90, Março 2015.
- GOMES, F. P.; GARCIA, C. H. A determinação de equações volumétricas na engenharia florestal. Instituto de Pesquisas

Florestais. Piracicaba, p. 17-27. 1993. (ISSN 100-8137).

HAKAMADA, R. E. Uso do inventário florestal como ferramenta de monitoramento da qualidade silvicultural em povoamentos clonais de *Eucalyptus*. Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba - SP, p. 114. 2012. (Dissertação de Mestrado).

MAESTRI, R. et al. Modelagem do crescimento ambiental considerando variáveis do ambiente: Uma revisão. *Scientia Agraria*, Curitiba, v. 14, n. 3, p. 103-110, Dezembro 2013.

MELLO, J. M. D. Geoestatística aplicada ao inventário florestal. Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba - SP, p. 122. 2004. (Tese de Doutorado).

METEOROLOGIA, I. N. D. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Instituto Nacional de Meteorologia, 2016. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home2/index>>. Acesso em: 17 Agosto 2016.

MIRANDA, D. L. C.; JUNIOR, V. B.; GOUVEIA, D. M. Fator de forma e equações de volume para estimativa volumétrica de árvores em plantio de *Eucalyptus urograndis*. *Scientia Plena*, Manaus, v. 11, n. 3, p. 9, Fevereiro 2015.

MORENO, A.J.A.; THIERSCH, M.F.B.M.; VALENTE, R.A.; BERNARDI, L.K.; LOURENÇO, S.V.; THIERSCH, C.R. Espacialidad Volumétrica de Madera En Plantaciones Forestales Usando Redes Neurales Artificiales Con Imágenes de Satélite. *Acta Agronómica*, v. 68, n.2, p. 142-50, 2019.

PINTO, U. R. C. et al. Uniformidade de Distribuição de Água em Aspersão Convencional Sob Diferentes Pressões de Serviços. *Global Science and Technology*, v. 8, n. 2, p. 160-169, 2015.

QUEIROZ, W. M. et al. Uniformidade de distribuição de água em um sistema de irrigação com o uso de aspersores setoriais. *Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação*. Fortaleza: [s.n.]. 2012. p. 1-5.

SANTANA, C. et al. Sistema de Equações para simulação do crescimento e da produção em povoamentos de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden sem desbaste baseado no modelo de Clutter. *Ambiência*, Guarapuava, v. 1, n. 2, p. 239-256, Dezembro 2005. ISSN 1808 - 0251.

SCHNEIDER, P. R. et al. Equações de volume para *Eucalyptus dunii* Maiden, determinadas para a depressão central do Estado do Rio Grande do Sul. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 27, n. 3, p. 8, Agosto 1997.

SCOLFORO, J. R. Curvas de índice de sítio para *Pinus caribea* var. *hondurensis*. Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais, Piracicaba, v. 45, p. 40-47, Dezembro 1992.

SILVA, E. R. S. et al. Uniformidade de distribuição de água em irrigação localizada com sistema de aeração, decantação e filtragem. *Científica*, Jaboticabal, v. 39, n. 1, p. 7-17, 2011.

STAPE, J. L.; DONATTI, Z. Monitoring Silvicultural and Genetic Improvements of *Eucalyptus* Plantations Using Inventory Data. IUFRO CONFERENCE ON SILVICULTURE AND IMPROVEMENT OF EUCALYPTS. Porto Seguro: [s.n.]. 2011.

STAPE, J. L.; ROCHA, J. C.; DONATTI, Z. Indicadores de qualidade silvicultural na Aracruz: 2000 a 2005. 1.ed. Piracicaba: IPEF, 2006. 25p

R Core Team (2013). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.

.