

GEOESTATÍSTICA NA MODELAGEM DO CRESCIMENTO E PRODUÇÃO EM POVOAMENTOS DE EUCALIPTO

Data de aceite: 03/07/2023

Karla Lima Ribeiro

Estudante de graduação em Engenharia Florestal (UFRRJ)

Bruno Fonseca Martins

Estudante de graduação em Engenharia Florestal (UFRRJ)

Lucas da Silva Cardoso

Estudante de graduação em Engenharia Florestal (UFRRJ)

Danilo Henrique dos Santos Ataíde

Doutorando do Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Florestais (UFRRJ)

Marco Antonio Monte

Professor do Departamento de Silvicultura (UFRRJ)

Emanuel José Gomes de Araújo

Professor do Departamento de Silvicultura (UFRRJ)

RESUMO: Este estudo avaliou a geoestatística no mapeamento da capacidade produtiva em florestas de eucalipto, por meio da espacialização do índice de sítio e volume de madeira,

variáveis obtidas por métodos tradicionais e associadas com técnicas geoestatísticas. Os dados são oriundos de 170 unidades amostrais permanentes (400 m²), localizadas em povoamentos clonais de *Eucalyptus sp.*, em Bocaiúva, Minas Gerais. A estimativa do índice de sítio foi realizada pelo método da curva guia, considerando a idade de referência de 72 meses. O volume de madeira foi obtido através da soma do volume das árvores individuais da unidade amostral aos 72 meses. Em seguida, foi realizado o estudo variográfico e ajuste dos modelos de semivariância: Gaussiano, Exponencial e Esférico. Com os parâmetros do ajuste foi possível determinar o Índice de Dependência Espacial (IDE) das variáveis, sendo a acurácia dos modelos de semivariância ajustados avaliada por meio do Erro Médio Reduzido (EM), Desvio Padrão dos Erros Reduzidos (Ser) e Critério de Informação de Akaike (AIC). Após a escolha do melhor modelo, foi aplicada a krigagem ordinária para a espacialização das variáveis nos pontos não amostrados. Os resultados demonstraram forte dependência espacial das variáveis em estudo, viabilizando estimativas espaciais precisas da capacidade produtiva das áreas em que os povoamentos estão

estabelecidos e da produção em volume de madeira de eucalipto.

PALAVRAS-CHAVE: capacidade produtiva, curva guia, espacialização, krigagem ordinária.

GROWTH AND YIELD GEOSTATISTICS MODELING IN EUCALYPTUS STANDS

ABSTRACT: This study evaluated geostatistics in mapping productive capacity in eucalyptus forests, through the spatialization of the site index and wood volume, variables obtained by traditional methods and associated with geostatistical techniques. Data come from 170 permanent sampling units (400 m²), located in clonal stands of *Eucalyptus* sp., in Bocaiúva, Minas Gerais. The site index was estimated using the guide curve method, considering a reference age of 72 months. Wood volume was obtained by summing the volume of individual trees in the sample unit at 72 months. Then, the variographic study and adjustment of the semivariance models: Gaussian, Exponential and Spherical were carried out. With the adjustment parameters, it was possible to determine the Spatial Dependency Index (IDE) of the variables, and the accuracy of the adjusted semivariance models was evaluated using the Reduced Mean Error (EM), Standard Deviation of Reduced Errors (Ser) and the Information Criterion of Akaike (AIC). After choosing the best model, ordinary kriging was applied to spatialize the variables in the unsampled points. The results showed a strong spatial dependence of the variables under study, enabling accurate spatial estimates of the productive capacity of the areas where the stands are established and the production in volume of eucalyptus wood.

KEYWORDS: guide curve, ordinary kriging, productive capacity, spatialization.

INTRODUÇÃO

A análise geoestatística de variáveis dendrométricas é uma das atividades que compõe a silvicultura de precisão, pois torna possível a otimização na tomada de decisão e redução de custos relacionados ao planejamento florestal, permitindo inclusive a redução da intensidade de amostral em inventário florestal contínuo (ATAÍDE et al., 2021), dentre outros benefícios. Pelissari et al. (2015), por exemplo, concluíram que o mapeamento da variável índice de sítio, utilizando a krigagem ordinária, pode permitir a intervenção silvicultural de acordo com o potencial de produção de povoamentos de *Tectona grandis*, expandindo as possibilidades no planejamento florestal.

A partir de estimativas consistentes obtidas pela forte dependência espacial já observada para a variável altura média das árvores dominantes em povoamentos de eucalipto (GUEDES et al., 2015), é possível delimitar a hipótese que a variável índice de sítio apresenta variação estruturada no espaço, e permite assim aprimorar a classificação de sítio em povoamentos de eucalipto. Também foi verificada a forte dependência espacial para a variável volume de madeira em povoamentos clonais de eucalipto (ATAÍDE et al., 2021), sendo interessante verificar se os padrões espaciais do índice de sítio estão correlacionados com aqueles observados para o volume de madeira.

Conhecer os padrões espaciais das variáveis índice de sítio e volume de madeira são fundamentais para auxiliar ações no manejo e entender os diferentes níveis de crescimento e incremento no povoamento. Porém são poucos os estudos que avaliam a dependência espacial dessas variáveis, sobretudo no que se refere ao índice de sítio em povoamentos de eucalipto.

Desse modo, é necessário se aprofundar nos métodos que permitam a inserção de uma componente espacial na modelagem da capacidade produtiva, visando obter a variável índice de sítio. Além da melhor adequação aos pressupostos em que estes modelos estão condicionados, a geoestatística pode permitir aumento significativo na qualidade das estimativas de volume projetado (PEREIRA et al., 2016).

Visando a modelagem espacial do crescimento e produção pela análise geoestatística, o objetivo deste trabalho foi avaliar a estrutura de dependência espacial do índice de sítio e volume de madeira em povoamentos de eucalipto.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo corresponde à povoamentos clonais de eucalipto, com área de 2.119 hectares (62 talhões), localizados no município de Bocaiúva, noroeste de Minas Gerais. Os dados foram obtidos em 170 unidades amostrais (ua) permanentes de área fixa (400 m²), distribuídas pelo processo de amostragem aleatória em quatro fazendas.

Em cada unidade amostral foram mensuradas as variáveis diâmetro a 1,30 m do solo (DAP), altura total (Ht) e a altura média das árvores dominantes (Hd), segundo o conceito de Assmann (SCOLFORO e THIERSCH, 2004), entre 18 a 90 meses de idade. Posteriormente, estimou-se a área basal (G) e o volume de madeira (V) de cada unidade amostral. A coordenada geográfica central de cada unidade amostral foi registrada para a análise espacial. Foram separadas 136 unidades amostrais para o ajuste dos modelos, enquanto que 34 unidades amostrais foram utilizadas na validação preditiva. A intensidade amostral utilizada para o ajuste dos modelos foi de uma unidade amostral para cada 15,6 hectares.

Através do método da curva guia, realizou-se a classificação de sítio, utilizando-se o modelo linearizado de Schumacher. A partir do rearranjo do modelo, considerando-se a idade de referência (Iref) de 72 meses, estimou-se o índice de sítio para todas as unidades amostrais. A significância dos coeficientes foi avaliada pelo teste t ($\alpha = 0,05$), e a qualidade da regressão foi avaliada pela análise gráfica dos resíduos normalizados, coeficiente de determinação ajustado (R²aj.) e erro padrão da estimativa em porcentagem (Syx%). O volume de madeira foi obtido através da soma do volume das árvores individuais da unidade amostral aos 72 meses.

A caracterização e modelagem da estrutura de dependência espacial do índice de sítio e volume de madeira foi realizada pelo estudo semivariográfico. Para tanto, o

semivariograma experimental foi construído para obter os parâmetros iniciais (efeito pepita (C0), contribuição (C) e alcance(a) e ajuste dos modelos de semivariância esférico, exponencial e gaussiano (YAMAMOTO e LANDIM, 2013). O melhor modelo foi aquele que apresentou Erro Médio Reduzido (ER) mais próximo de zero e Desvio Padrão dos Erros Reduzidos (Ser) mais próximo de 1, estatísticas calculadas a partir da validação cruzada.

Após a confirmação da dependência espacial, o modelo mais acurado foi utilizado pela krigagem ordinária na estimativa espacial do índice de sítio e volume de madeira, utilizando as quatro unidades amostrais mais próximas do ponto não-amostrado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os coeficientes do modelo ajustado de Schumacher ($\beta_0 = 3,5675$; $\beta_1 = - 24,2854$) foram significativos, com 95% de probabilidade. As estatísticas de ajuste $R^2_{aj} = 0,85$ e $S_{yx} = 8,7\%$ indicaram qualidade da equação, sem tendência na distribuição dos resíduos normalizados (Figura 1A). Dessa forma, a regressão obtida foi utilizada para estimar o crescimento médio em altura dominante das árvores, e na sua forma rearranjada, para determinar as curvas com os limites das classes de sítio (Figura 1B).

Com base nos valores observados de altura média das árvores dominantes, permitiu-se construir quatro classes de sítios com potencial de produção distintos entre si, com amplitude de 4 m e valores centrais de 19 m (Classe IV), 23 m (Classe III), 27 m (Classe II) e 31 m (Classe I) (Figura 1B). Os valores de índice de sítio próximos de 19 e 31 m, com baixa e alta produtividade respectivamente.

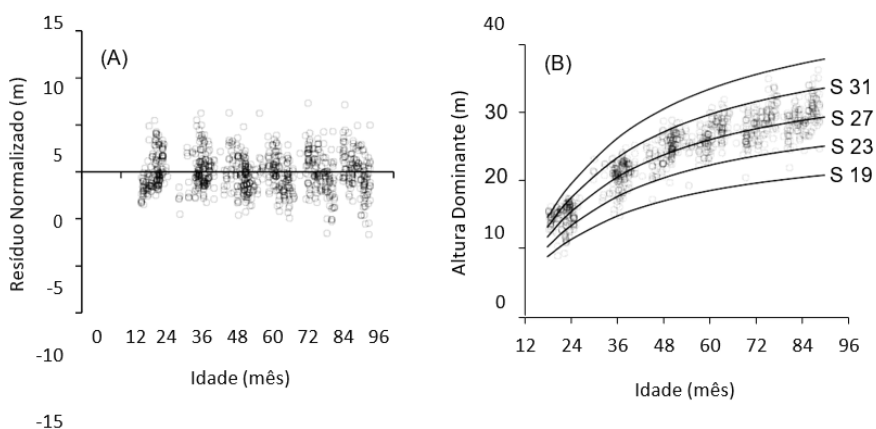


Figura 1. Distribuição dos resíduos normalizados (A) e limites inferiores e superiores das classes de sítio obtidos pelo método da curva guia com o modelo de Schumacher (B) nos povoamentos de eucalipto localizados em Bocaiúva, MG. Em que S = índice de sítio.

Todos os modelos de semivariância avaliados detectaram a presença de forte dependência espacial para as variáveis índice de sítio (S) e volume de madeira (V) (Tabela 1), porém os modelos esférico e exponencial apresentaram as melhores estatísticas de ajuste, permitindo a espacialização das variáveis por meio da krigagem ordinária. A forte dependência espacial do índice de sítio pode ser explicada pela forte continuidade espacial da altura média das árvores dominantes em povoamentos de eucalipto (ATAÍDE et al., 2021). A confirmação de dependência espacial para o volume de madeira coincide com o estudo de Mello (2004), que também apresentou forte dependência espacial para esta variável.

Tabela 1. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariograma esférico, exponencial e gaussiano para a variável índice de sítio e volume de madeira empovoamento de eucalipto, na idade 72 meses, espacializada pela krigagem ordinária (KO).

Idade (meses)	Variável	Modelo	(C0)	(C)	(a)	\overline{ER}	S_{er}	IDE (%)	DE
72	S	Esf	0,884	5,192	4.000,000	-0,003	1,047	85	Forte
		Exp	0,693	5,423	1.999,999	-0,004	1,045	89	Forte
		Grau	1,492	4,923	2.000,000	0,002	1,053	77	Forte
	V	Esf	554,400	2.069,000	4.000,000	-0,003	1,072	79	Forte
		Exp	442,500	2.237,300	2.000,000	0,004	1,065	83	Forte
		Grau	564,100	1.652,500	983,800	-0,003	1,064	75	Forte

Em que S = índice de sítio; V = volume de madeira; C0 = efeito pepita; C = contribuição; a = alcance; \overline{ER} = erro médio reduzido; S_{er} = desvio padrão dos erros reduzidos; IDE(%) = índice de dependência espacial em porcentagem; DE = classificação da dependência espacial.

Os mapas de espacialização do índice de sítio e volume de madeira apresentaram alta variabilidade espacial, indicando que a área apresenta estratos com diferentes níveis de produtividade (Figura 2). Além disso, os estratos de índice de sítio e volume de madeira estão correlacionados espacialmente, reforçando que a variável altura dominante é uma ótima indicadora dos níveis de produção de madeira em povoamentos de eucalipto (MELLO et al., 2005).

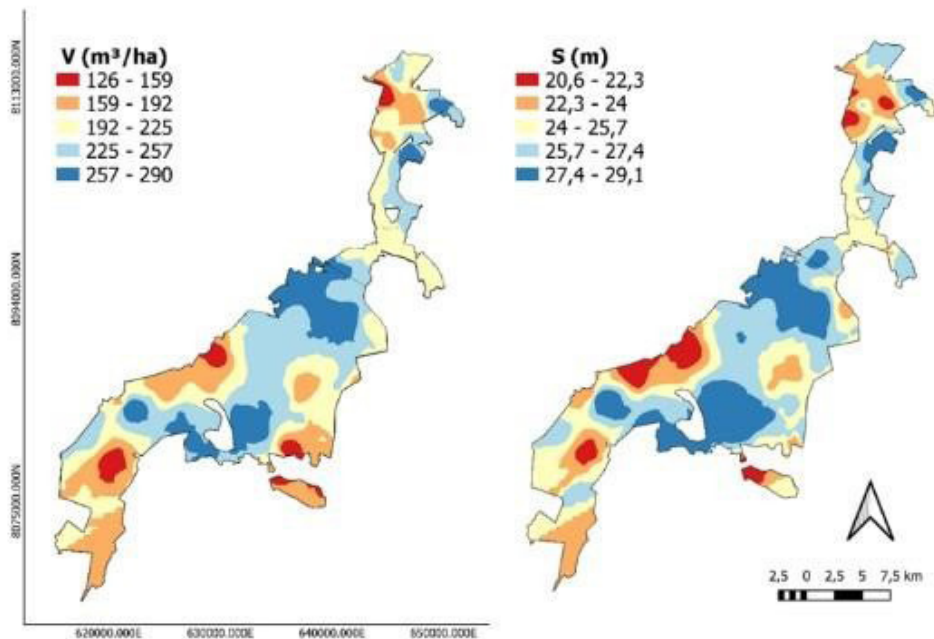


Figura 2. Espacialização das variáveis volume de madeira (V) e índice de sítio (S) em povoamento de eucalipto por meio da krigagem ordinária na idade de 72 meses. Em que V = volume de madeira; S = índice de sítio.

CONCLUSÕES

As variáveis Índice de Sítio e Volume de Madeira, apresentam-se estruturadas espacialmente, aos 72 meses, com forte dependência espacial. Além disso, a krigagem ordinária permite a espacialização das variáveis Índice de Sítio e Volume de Madeira, e viabilizou confirmar estratos de maior capacidade produtiva com estratos de maior volume de madeira.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Emanuel por ter orientado esse estudo. Aos que contribuíram neste trabalho, Danilo, Lucas e Bruno. À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) pela infraestrutura disponibilizada. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pela bolsa de estudos concedida.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ATAÍDE, D.H.S. et al. Dependência espacial de variáveis dendrométricas em diferentes idades e intensidades amostrais em povoamento de eucalipto. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 31, n. 4, p. 1591-1611, 2021.

GUEDES, I.C.L. et al. Continuidade espacial de características dendrométricas em povoamentos clonais de *Eucalyptus sp.* avaliada ao longo do tempo. **Cerne**, Lavras, v. 21, n. 4, p.527–534, 2015.

MELLO, J.M. et al. Estudo da dependência espacial de características dendrométricas para *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 113–126, 2005.

MELLO, J.M. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal**. 2004. 110 p. Tese (Doutorado em Recurso Florestais). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2004.

PELISSARI, A L. et al. Propostas de mapeamentos da capacidade produtiva de sítios florestais por meio de análises geoestatísticas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 107, p. 601-608, 2015.

PEREIRA, J.C.P. Modelo de crescimento e produção de Clutter adicionado de uma variável latente para predição de volume em um plantio de *Eucalyptus urograndis* com variáveis correlacionadas espacialmente. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 110, p. 393-403, 2016.

SCOLFORO, J.R.S.; THIERSCH, C.R. **Biometria Florestal: Medição, Volumetria e Gravimetria**. 1. ed. Lavras: UFLA/FAEPE, 2004.

YAMAMOTO, J.K.; LANDIM, P.M.B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.