

Dependência espacial do índice de sítio em povoamentos de eucalipto

Danilo Henrique dos Santos Ataíde^{1*} Emanuel José Gomes de Araújo¹ Marco Antonio Monte¹ Rafaella de Angeli Curto² Laís Cândido Silva¹ Pedro Vaz da Rocha¹

¹Instituto de Florestas - IF, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

²Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais – ICAA, Universidade Federal do Mato Grosso.

* Autor para correspondência: daniloataide.florestal@gmail.com

Resumo: O objetivo deste trabalho foi caracterizar e modelar a dependência espacial da variável índice de sítio em povoamentos de eucalipto. O estudo foi realizado em 62 talhões (2.119 hectares) de *Eucalyptus* sp., com idade entre 18 e 90 meses. Os dados são oriundos de 170 unidades amostrais (400 m²), distribuídas pelo processo de amostragem casual simples. O índice de sítio foi estimado em cada unidade amostral e ocasião de medição pelo método da curva-guia. Em seguida, foi realizado o estudo semivariográfico para detecção, caracterização e ajuste dos modelos esférico, exponencial e gaussiano. Com os parâmetros do modelo de melhor desempenho, calculou-se a dependência espacial da variável, classificada como fraca, moderada e forte. Conclui-se que o índice de sítio apresentou dependência espacial predominantemente forte ao longo do desenvolvimento do povoamento, possibilitando a espacialização da capacidade produtiva por interpoladores geoestatísticos.

Palavras-chave: Geoestatística, Semivariância, Capacidade produtiva, Curva-guia.

Spatial dependence of the site index on eucalyptus stands

Abstract: We aimed with this work characterize and model the spatial dependence of the site index on eucalyptus stands. The study was carried out in 62 sample units (2,119 hectares) of *Eucalyptus* sp., aged between 18 and 90 months. The data base come from 170 sample units (400 m²), distributed through the simple random sampling process. The site index was estimated in each sample unit and measurement occasion by the guide curve method. The semivariographic study was then performed to detect, characterize and adjust the spherical, exponential and gaussian models. With the parameters of the best performance model, the spatial dependence of the variable was calculated: weak, moderate and strong. It was concluded that the site index presented a strong spatial dependence throughout the development of the stands, making possible the spatialization by geostatistical interpolators.

Keywords: Geostatistics, Semivariogram, Production capacity, Guide curve.

1. INTRODUÇÃO

A compreensão do comportamento das variáveis dendrométricas espacialmente é uma das atividades que compõe a silvicultura de precisão, denominada como o conjunto de técnicas que utilizam o sensoriamento remoto e sistema de informações geográficas aplicadas ao manejo florestal (Rufino et al., 2006), tornando possível a otimização na tomada de

decisão, redução de riscos e custos, entre outros benefícios.

A altura média das árvores dominantes (Hd) é uma variável importante no manejo de florestas, sendo utilizada na classificação da capacidade produtiva e modelagem do crescimento e produção em povoamentos de eucalipto (Campos & Leite, 2013). Desta forma, esta variável está ligada a produtividade potencial de uma determinada área, para fins de produtos madeireiros ou não, expressando a interação entre o clima, solo e os fatores bióticos predominantes no povoamento (Pelissari et al., 2015; Leite et al., 2011).

Alguns estudos tem demonstrado que a altura média das árvores dominantes de eucalipto apresenta forte estrutura de dependência espacial (Guedes et al, 2015; Kanegae Junior et al., 2007; Mello et al., 2005), indicando o seu potencial na espacialização da capacidade produtiva utilizando interpoladores geoestatísticos. Entretanto, na literatura são apresentados poucos estudos relacionados ao mapeamento do índice de sítio utilizando a abordagem geoestatística (Pelissari et al., 2015).

Visando compreender o comportamento desta variável por meio da análise geoestatística, o objetivo deste trabalho foi avaliar a estrutura de dependência espacial da variável índice de sítio em povoamentos de eucalipto.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área e dados do estudo

A área deste estudo refere-se a povoamentos clonais de eucalipto com área de 2.119 hectares (62 talhões), localizada no município de Bocaiúva, noroeste de Minas Gerais. De acordo com a classificação de Köppen, o clima é do tipo Aw, definido como tropical úmido de savana (Alvarez et al., 2014). A temperatura e precipitação média anual são de 24°C e 1.246 mm, respectivamente (Caldeira et al., 2005).

Os dados foram obtidos em 170 unidades amostrais permanentes (400 m²) distribuídas aleatoriamente na área de estudo, na intensidade de uma unidade amostral para cada 15,6 hectares. Nas unidades amostrais foi mensurada a altura média das árvores dominantes (Hd), segundo o conceito de Assman (Scolforo & Thiersch, 2004), entre 18 e 90 meses de idade. As coordenadas centrais de cada unidade amostral foram registradas para a análise espacial.

2.2 Análise

A classificação de sítio foi realizada pelo método da curva-guia, utilizando o modelo linearizado de Schumacher (Campos & Leite, 2013). A significância dos coeficientes do

modelo ajustado foi verificada pelo teste t ($\alpha = 0,05$), enquanto que a qualidade da regressão foi avaliada por meio da análise gráfica dos resíduos normalizados, coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) e erro padrão da estimativa em porcentagem ($S_{yx\%}$) (Campos & Leite, 2013). Considerando a idade de referência (I_{ref}) de 72 meses, estimou-se o índice de sítio para todas as unidades de amostra, em cada ocasião de medição.

A estrutura de dependência espacial foi detectada e caracterizada a partir da construção do semivariograma experimental (Yamamoto & Landim, 2013), obtendo-se os parâmetros iniciais efeito pepita (γ), contribuição (σ^2) e alcance (ρ), utilizando a seguinte equação:

Em que: $\hat{\gamma}$ = semivariância estimada entre pares de pontos; n = número de pares de valores medidos, separados pela distância h .

Também foram analisados os semivariogramas direcionais (0° , 45° , 90° e 135°), a fim de verificar a existência de anisotropia. Quando existente, a correção foi realizada para obtenção de um semivariograma isotrópico. O semivariograma experimental foi utilizado no ajuste dos modelos gaussiano, exponencial e esférico, descritos por Yamamoto & Landim (2013). O modelo de melhor ajuste ao semivariograma experimental foi aquele que apresentou o erro médio reduzido (\bar{e}) e desvio padrão dos erros reduzidos (S_{er}) iguais ou mais próximos de 0 de 1 (Mello et al., 2005), respectivamente, obtidos a partir da validação cruzada.

Com os parâmetros ajustados, obteve-se o índice de dependência espacial da variável (Zimback, 2003), classificando-a como baixa ($IDE\% \leq 25$), moderada ($25 < IDE\% \leq 75$) e forte ($IDE\% > 75$). As análises geoestatísticas foram realizadas utilizando o software R, por meio do pacote geoR (Ribeiro Júnior & Diggle, 2001).

3. RESULTADOS

Os coeficientes do modelo ajustado de Schumacher ($\beta_0 = 3,5675$; $\beta_1 = -24,2854$) foram significativos ($p \leq 0,05$), 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 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).

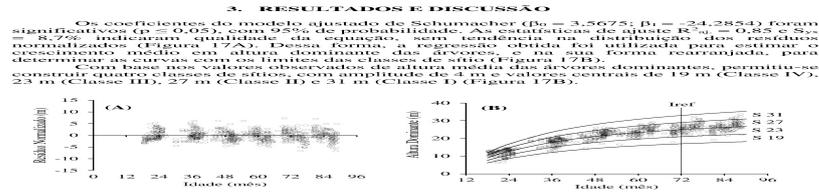


Figura 17. Distribuição dos resíduos normalizados (A) e limites inferiores e superiores das classes de sítio obtidos pelo método da curva-guia com o modelo de Schumacher (B) nos povoamentos de eucalipto localizados em Bocaiúva, MG.

O índice de sítio (S) obtido a partir da equação de Schumacher apresentou, predominantemente, forte dependência espacial (CIEE = 0,75), portanto a sua espacialização por meio da krigagem e cokrigagem ordinária. Além disso, a presença da estrutura de dependência foi detectada em todas as idades, em que 67% dos modelos de melhor desempenho apresentaram forte autocorrelação espacial da variável, enquanto que os demais foram classificados como moderada dependência espacial (Tabela 9). A estrutura do índice de sítio pode ser explicada pela forte continuidade espacial da altura média das árvores dominantes em povoamentos de eucalipto.

Em relação à krigagem ordinária, dentre os modelos de melhor ajuste ao semivariograma experimental CER e S₀ mais próximos de 0 e 1, respectivamente, não foi verificada tendência na escolha do modelo, ou seja, não foi verificada superioridade de algum modelo em detrimento do outro. Em relação a cokrigagem ordinária, nos dois formatos avaliados (S = DAP e S = FFD), o modelo de semivariância teórico gaussiano apresentou desempenho superior em prever a semivariância em função da distância.

O alcance médio nos índices observados para a krigagem ordinária, cokrigagem ordinária (S = DAP) e cokrigagem ordinária (S = FFD) dos modelos de melhor desempenho, foi de 2.202,69 m, 2.628,88 m e 3.408,24 m, respectivamente. O alcance médio, na prática, pode ser

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.

A presença da estrutura de dependência espacial foi detectada em todas as idades, em que 67% de todos os modelos ajustados, apresentaram forte autocorrelação espacial da variável, enquanto que os demais foram classificados como moderada dependência espacial (Tabela 1).

Tabela 1. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos teóricos de semivariância esférico, exponencial e gaussiano para a variável índice de sítio (S) em povoamentos de eucalipto.

Idade (mês)	Modelo	C ₀	C	a	S _{ER}	IDE(%)	DE
24	Esférico	1,713	16,808	4.887,483	0,011	1,032	Forte
	Exponencial	1,094	17,825	2.390,422	0,013	1,032	Forte
	Gaussiano*	3,577	15,316	2.226,943	0,007	1,030	Forte
36	Esférico	0,813	6,667	2.089,542	0,007	1,025	Forte
	Exponencial	0,770	7,140	1.302,019	0,008	1,033	Forte
	Gaussiano*	1,892	5,634	1.038,188	0,005	1,021	Moderada
48	Esférico	1,359	3,472	2.459,014	0,003	1,034	Moderada
	Exponencial*	1,795	3,278	2.604,411	0,002	1,042	Moderada
	Gaussiano	1,935	3,024	1.387,482	0,003	1,039	Moderada
60	Esférico	0,598	3,829	2.381,579	0,001	1,041	Forte
	Exponencial*	0,348	3,995	1.072,419	-0,001	1,038	Forte
	Gaussiano	1,136	3,273	1.108,153	0,000	1,036	Moderada
72	Esférico*	0,527	4,801	2.639,454	0,000	1,055	Forte
	Exponencial	0,285	5,254	1.364,849	-0,002	1,049	Forte
	Gaussiano	1,291	4,349	1.471,044	-0,002	1,039	Forte

Tabela 1. Continuação...

84	Esférico*	0,771	4,408	3.631,125	0,000	1,041	Forte
	Exponencial	0,428	4,696	1.553,360	0,001	1,045	Forte

Gaussiano 1,386 3,772 1.740,261 -0,003 1,030 73 Moderada

Em que: C_0 = efeito pepita; C = contribuição; = alcance; = erro médio reduzido; S_{ER} = desvio padrão do erro reduzido; $IDE_{(\%)}$ = índice de dependência espacial em porcentagem; DE = dependência espacial.

O símbolo “*” indica o modelo de desempenho superior na idade avaliada.

4. DISCUSSÃO

Foi possível observar que não houve uma tendência na escolha dos modelos de melhor desempenho. Os modelos esférico, exponencial e gaussiano foram superiores em 33% dos ajustes, cada um. De acordo com Yamamoto e Landim (2013), mesmo existindo vários modelos teóricos, os modelos esférico, exponencial e gaussiano são descritores da maioria dos fenômenos espaciais existentes.

A forte estrutura de dependência espacial ($IDE_{\%} > 75$) do índice de sítio (S) observada em 67% dos modelos ajustados de melhor desempenho, pode ser explicada pela forte continuidade espacial da variável altura dominante de eucalipto (Guedes et al., 2015; Kanegae Junior et al., 2007; Mello et al., 2005). Por ser uma variável menos exposta à competição por recursos disponíveis ao crescimento, os padrões espaciais da altura dominante costumam apresentar-se estruturados, inclusive para outras espécies. Propondo classificar a capacidade produtiva de sítios de *Tectona grandis* por meio da geoestatística, Pelissari et al. (2015) constataram robustez da análise no zoneamento da capacidade produtiva do local, permitindo um manejo direcionado as limitações de desenvolvimento da espécie em cada estrato mapeado.

Dessa forma, é primordial considerar a relação espacial entre as unidades amostrais na classificação da capacidade produtiva em plantios florestais, em especial os de eucalipto, tendo em vista a ampla dispersão geográfica dos plantios do gênero no Brasil. Calcula-se que os plantios de eucalipto ocupam 5,7 milhões de hectares do país, e localizam-se, principalmente, em Minas Gerais (24%), São Paulo (15%) e Mato Grosso do Sul (15%) (PÖYRY, 2017), ou seja, em regiões com características edafoclimáticas contrastantes.

5. CONCLUSÃO

A variável índice de sítio de eucalipto apresenta-se com forte dependência espacial ao longo do crescimento dos povoamentos, permitindo o mapeamento da sua variabilidade espacial utilizando interpoladores geoestatísticos.

6. REFERÊNCIAS

Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JLM, Sparovek G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 2014, 22 (6): 711–728.

Caldeira MA, Zanetti R, Moraes JC, Zanuncio JC. Distribuição espacial de saúveiros (Hymenoptera: Formicidae) em eucaliptais. *Cerne* 2005, 11 (1): p.34–39.

Campos JCC, Leite HG. *Mensuração Florestal: perguntas e respostas*. 4 ed. Viçosa: Editora UFV; 2013.

Guedes ICL, Mello JM, Silveira EMO, Mello CR, Reis AA, Gomide LR. Continuidade espacial de características dendrométricas em povoamentos clonais de *Eucalyptus* sp. avaliada ao longo do tempo. *Cerne* 2015, 21 (4): 527–534.

Kanegae Junior H, Mello JM, Scolforo JRS, Oliveira AD. Avaliação da continuidade espacial de características dendrométricas em diferentes idades de povoamentos clonais de *Eucalyptus* sp. *Revista Árvore* 2007, 31 (5): 859–866.

Leite HG, Castro R, Silva A, Júnior C, Binoti D, Castro AF et al. Classificação da capacidade produtiva de povoamentos de eucalipto utilizando diâmetro dominante. *Silva Lusitana*, Lisboa 2011, 19 (2): 181-195.

Mello JM, Batista JLF, Oliveira MS, Ribeiro Júnior, PJ. Estudo da dependência espacial de características dendrométricas para *Eucalyptus grandis*. *Cerne* 2005, 11 (2):113–126.

Pelissari AL, Caldeira SF, Figueiredo Filho A, Machado, SA. Propostas de mapeamentos da capacidade produtiva de sítios florestais por meio de análises geoestatísticas. *Scientia Forestalis* 2015,43 (107): 601-608.

Pöyry, CEMGENL. Relatório 2017 IBÁ. São Paulo; 2017.

Ribeiro Júnior PJ, Diggle PJ. GeoR: a package for geostatistical analysis. *RNEWS* 2001, 1 (2): 15–18.

Rufino TMC, Thiersch CR, Ferreira SO, Kanegae Junior H, Fais D. Uso da geoestatística no estudo da relação entre variáveis dendrométricas de povoamentos de *Eucalyptus* sp. e atributos do solo. *Ambiência* 2006, 2 (1): 83-93.

Scolforo JRS. *Biometria florestal: modelos de crescimento e produção florestal*. Lavras: UFLA/FAEPE; 2006.

Scolforo JRS, Thiersch CR. *Biometria Florestal: Medição, Volumetria e Gravimetria*. 1 ed. Lavras: UFLA/FAEPE; 2004.

Yamamoto JK, Landim PMB. *Geoestatística: conceitos e aplicações*. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos; 2013.

Zimback CRL. *Geoestatística*. 1 ed. Botucatu: UNESP; 2003.