

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS – *CAMPUS* SÃO JOÃO EVANGELISTA
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA FLORESTAL
LUILLA LEMES ALVES**

**KRIGAGEM PARA A ESTIMATIVA DA ALTURA DE ÁRVORES DE EUCALIPTO
EM ÁREA DE DECLIVE**

**SÃO JOÃO EVANGELISTA
2019**

LUILLA LEMES ALVES

**KRIGAGEM PARA A ESTIMATIVA DA ALTURA DE ÁRVORES DE EUCALIPTO
EM ÁREA DE DECLIVE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus*
São João Evangelista como exigência parcial
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Oliveira Lafetá

SÃO JOÃO EVANGELISTA

2019

LUILLA LEMES ALVES

**KRIGAGEM PARA A ESTIMATIVA DA ALTURA DE ÁRVORES DE EUCALIPTO
EM ÁREA DE DECLIVE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus*
São João Evangelista como exigência parcial
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Florestal.

Orientador: Bruno Oliveira Lafetá

Aprovada em: 10 / 12 / 2019

BANCA EXAMINADORA

Bruno Oliveira Lafetá
Orientador: Prof. Dr. Bruno Oliveira Lafetá

Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista

Ícaro Tourino Alves
Prof. Me. Ícaro Tourino Alves
Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista

Ivan da C. I. Fontan
Prof. Me. Ivan da Costa Ilhéu Fontan
Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista

Tamires Mousslech A. Penido
Ma. Tamires Mousslech Andrade Penido
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - *Campus* Diamantina

FICHA CATALOGRÁFICA

A472k Alves, Luilla Lemes.
2020

Krigagem para a estimativa da altura de árvores de eucalipto em área de declive. /
Luilla Lemes Alves. – 2020.
19fl.;il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) – Instituto
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus São João
Evangelista, 2020.

Orientador: Dr. Bruno Oliveira Lafetá.

1. Dependência espacial. 2. Geoestatística. 3. Método probabilístico. 4. Interpolação.
5. Hipsometria I. Alves, Luilla Lemes. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Minas Gerais – Campus São João Evangelista. III. Título.

CDD 631.411

Elaborada pela Biblioteca Professor Pedro Valério
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais.
Campus São João Evangelista.
Bibliotecária Responsável: Rejane Valéria Santos – CRB-6/2907

“Dedico a Deus, aos meus pais e minha irmã que foram grandes colaboradores e incentivadores, com todo amor e carinho.”

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi avaliar o desempenho de diferentes métodos de krigagem e modelos matemáticos de semivariograma teórico na estimativa da altura de eucalipto em área de declive. Aos 62 meses de idade foi realizado o inventário florestal em um talhão de 11,6 ha, sendo lançada uma parcela de $100 \times 80\text{m}$ (8.000m^2) em seu interior. A declividade das duas maiores arestas da parcela foi de 1% (relevo plano) e nas duas menores arestas, de 19% (relevo ondulado). A altura de todas as árvores foram medidas. A análise de interpolação espacial adotou dois métodos de krigagem (simples e ordinária) e três modelos de semivariograma teórico (esférico, exponencial e gaussiano). Os ajustes do modelo gaussiano exibiram estimativas sem viés, com poucos desvios. Para o mesmo modelo de semivariograma, o método de krigagem simples apresentou desempenho um pouco melhor na fase de validação que aquele da krigagem ordinária. Conclui-se que o método de krigagem simples associado ao modelo de semivariograma teórico Gaussiano é eficiente para análises de interpolação geoestatísticas da altura de árvores de eucalipto em área de declive.

Palavras chave: Dependência espacial, Geoestatística, Método probabilístico, Interpolação, hipsometria.

ABSTRACT

The objective of the present work was to evaluate the performance of different kriging methods and theoretical semivariogram mathematical models in the estimation of eucalyptus height in a slope area. a plot of $100 \times 80\text{m}$ (8.000m^2) is being launched inside. The slope of the two largest edges of the plot was 1% (flat relief) and the two smallest edges, 19% (undulating relief). The height of all trees was measured. Spatial interpolation analysis adopted two kriging methods (simple and ordinary) and three theoretical semivariogram models (spherical, exponential and Gaussian). Gaussian model adjustments exhibited unbiased estimates with few deviations. For the same semivariogram model, the simple kriging method performed slightly better in the validation phase than that of ordinary kriging. It is concluded that the simple kriging method associated with the Gaussian theoretical semivariogram model is efficient for geostatistical interpolation analysis of eucalyptus tree height in slope area.

Keywords: Spatial dependence, Geostatistics, Probabilistic method, Interpolation, hipsometry.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
2	MATERIAIS E MÉTODOS	8
3	RESULTADOS	10
4	DISCUSSÃO	15
5	CONCLUSÕES.....	16
	REFERÊNCIAS	17

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos países com maior extensão de área plantada com espécies florestais, abrangendo cerca de 7,83 milhões de hectares de árvores plantadas. Desse total, 5,7 milhões são ocupados por plantios de eucalipto (IBÁ, 2019), espécie de grande importância comercial que apresenta elevadas produtividades em solos brasileiros, sobretudo pelo melhoramento genético e pelo preparo e fertilização dos solos (NUNES, et al., 2016; BARRETO et al., 2016).

Para a quantificação da produtividade volumétrica de um reflorestamento, é imprescindível a realização de inventários florestais. Nesses levantamentos, são coletados via amostragem, dados de todos os diâmetros à altura do peito (DAP) e tomadas parte das alturas totais (Ht) de cada parcela mensurada. Para as árvores que não tiveram suas alturas estimadas, é ajustado um modelo estatístico baseado na forte correlação entre DAP e Ht, conhecida como relação hipsométrica (BINOTI et al., 2013).

A relação hipsométrica tradicionalmente é realizada por meio de modelos de regressão que ficou consagrada pela dificuldade de medição de alturas. Quando coletada em plantios adensados e sob influência de ventos, demanda um tempo maior de coleta e aumenta, por consequência, o custo do inventário florestal (CAMPOS & LEITE, 2017; BINOTI et al., 2013; MENDONÇA et al., 2015; SANQUETTA et al., 2009).

Uma alternativa promissora para a modelagem da relação hipsométrica consiste no uso da interpolação espacial que dispõe de métodos para quantificar a autocorrelação espacial e incorporá-la na estimação de valores de pontos não amostrados (ALVARENGA et al., 2012). A interpolação espacial pode ser do tipo determinístico e estatístico.

Os interpoladores estatísticos são obtidos a partir de semivariogramas empíricos e teóricos, capazes de detectar a estrutura da variabilidade espacial da variável de interesse (FERREIRA et al., 2016). Eles estimam valores em pontos não amostrados a partir de informações dos pontos amostrados, considerando a estrutura de dependência espacial da característica em estudo (GUEDES et al., 2012).

O semivariograma é o método geoestatístico que é capaz de diagnosticar a presença da correlação espacial entre as unidades amostradas, e sua modelagem é fundamental para aplicação do interpolador geoestatístico, conhecido como krigagem (GUEDES et al., 2012). A técnica de krigagem é superior aos demais interpoladores, por permitir o cálculo do erro associado a cada estimativa – variância da krigagem (JUNIOR, et al., 2007).

Entre os tipos krigagem linear mais encontrados na literatura estão, a krigagem simples e a krigagem ordinária. A krigagem simples considera uma média conhecida, sendo esta constante em todo o domínio, enquanto a krigagem ordinária assume uma média constante, ainda que desconhecida (CARMO et al., 2015). Existem diversos tipos de modelos teóricos geoestatísticos, entre que os mais utilizados se encontram o modelo Esférico, Exponencial e Gaussiano, por apresentarem positividade definida (CARVALHO et al., 2009). Nos quais, o modelo Exponencial representa processos que tem maior perda de semelhança com a distância, o modelo Gaussiano inicia com o crescimento lento até atingir um ponto de inflexão antes do alcance, e, o Esférico linear até aproximadamente $1/3$ do alcance (FERREIRA et al., 2016).

Os interpoladores de dados espaciais são utilizados nas mais diversas áreas da ciência, podendo citar: na erosividade das chuvas (BATISTA et al., 2018); na precipitação pluvial (VIOLA et al., 2010); na determinação do volume de madeira (LUNDGREN et al., 2015); na fertilidade e textura dos solos (SKORUPA et al., 2012); nas falhas e, ou, mortalidade de plantas (ODA-SOUZA et al., 2008). Entretanto, existem poucas informações sobre a altura de eucalipto utilizando a interpolação espacial. Diante disso, o objetivo foi avaliar o desempenho de diferentes métodos de krigagem e modelos matemáticos de semivariograma teórico na estimativa da altura de eucalipto em área de declive.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi conduzido em um talhão comercial de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden de 11,6 hectares, proveniente de um projeto de fomento florestal situado em área do município de Peçanha, no Vale do Rio Doce em Minas Gerais – Brasil. Os limites administrativos do município foram obtidos do banco de dados *Global Administrative Areas* versão 2.8 (Figura 1); o sistema de coordenadas geográficas de referência foi o Datum WGS84. O clima da região segundo sistema internacional de Köppen (KÖPPEN, 1936) é do tipo Cwa, mesotérmico úmido (verão quente e chuvoso). As médias anuais de temperatura e precipitação são de 20,4° C (médias variando de 17,3°C em julho a 23,1°C em janeiro) e 1.339 mm (médias variando de 13 mm agosto a 287 mm em dezembro), respectivamente. Os dados climáticos foram oriundos de registros anuais de 1982 a 2012, disponibilizados gratuitamente por Climate-data.org (<http://es.climate-data.org/>).

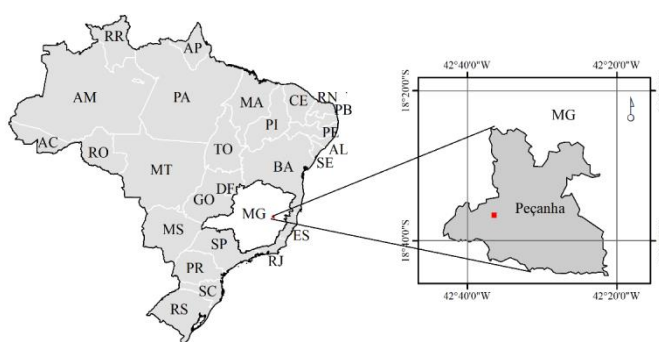


Figura 1. Localização da parcela experimental no município de Peçanha, Vale do Rio Doce em Minas Gerais – Brasil (Datum WGS84). A parcela experimental se encontra representada em vermelho.

O talhão foi instalado em outubro de 2014 sob arranjo espacial $3 \times 3\text{m}$, em área com histórico de uso e ocupação por povoamentos de eucalipto. Realizaram-se operações de coveamento (covas de $30 \times 30 \times 30\text{cm}$) e fertilização em covetas laterais, sendo aplicado no plantio 500g de NPK 6:30:6 por coveta e, em cobertura (12 meses após o plantio), 700g de NPK 6:10:29 por coveta. Os controles de formiga e matocompetição foram efetuados com isca formicida Dinagro-S[®] e herbicida glifosato (produto comercial Scout WG – Monsanto) conforme recomendações do próprio fabricante, respectivamente.

Aos 61 meses de idade foi realizado o inventário florestal, sendo lançada uma parcela experimental retangular de $100 \times 80\text{m}$ (8.000m^2 , equivalente a uma intensidade amostral de

6,90%) no interior do talhão, sob as coordenadas de 18°36'35,36'' de latitude Sul e 42°36'25,46'' de longitude Oeste (Datum WGS84). Assumiu-se uma bordadura dupla (duas fileiras de plantio) para o lançamento da parcela experimental. A declividade das duas maiores arestas da parcela foi igual a 1% (relevo plano) e nas duas menores arestas, de 19% (relevo ondulado). Todas as árvores tiveram a altura total medida com auxílio de um hipsômetro eletrônico Haglof. As árvores foram demarcadas em um plano cartesiano (X, Y), onde X e Y são a distância em metros da projeção dos pontos nos eixos para a árvore origem (0, 0).

De modo exploratório, os dados foram submetidos à estatística descritiva (mínimo, máximo, média, mediana, moda, desvio padrão e quartis) e análises gráficas de frequência (histograma) e de tendência a partir da dispersão entre os valores de altura e o plano cartesiano; o coeficiente de correlação de Pearson (r) foi calculado entre os dados de altura e os eixos cartesianos. A amplitude e quantidade de classes do histograma foram definidas conforme critério de Scott (1979).

A análise de interpolação espacial adotou dois métodos de krigagem (simples e ordinária) e três modelos matemáticos de semivariograma (Esférico, Exponencial e Gaussiano), 12 lags de 4m cada. Os dois métodos de krigagem e os três modelos matemáticos de semivariograma teórico totalizaram seis combinações.

Inicialmente, para cada modelo de semivariograma, os seguintes parâmetros foram calculados e representados graficamente: efeito pepita (C_0), contribuição (C_1), patamar ($C_0 + C_1$) e alcance. O efeito pepita é o valor de semivariância encontrada quando a distância é zero e representa o componente da variação ao acaso; contribuição é a diferença entre o patamar e o efeito pepita; patamar é o valor da semivariância em que a curva estabiliza e se torna constante; e o alcance é a distância da origem até onde o patamar atinge valores estáveis, expressando até que ponto se percebe o efeito da dependência espacial (LUNDGREN et al., 2016).

A quantificação do Índice de Dependência Espacial (IDE) foi realizada pela razão entre o efeito pepita e o patamar. Classificou-se o IDE segundo critério usado por Lundgren et al. (2016), que considera a dependência espacial forte quando IDE é menor ou igual a 0,25; moderada quando está entre 0,25 e 0,75 e fraca, quando é maior que 0,75.

A existência de anisotropia foi investigada a partir da construção de semivariogramas nas direções 0, 45, 90 e 135° e análise do comportamento espacial. A anisotropia é evidenciada quando os semivariogramas apresentam patamar, alcance e efeito pepita distintos para alguma das direções (LUNDGREN et al., 2016). A correção da anisotropia foi realizada

para a elaboração dos mapas de interpolação de cada combinação entre método de krigagem e modelo de semivariograma teórico. A definição de classes de altura empregou amplitudes de decis dos dados observados.

A técnica de validação cruzada leave-one-out, também conhecida como Jackknife, foi utilizada para definir a melhor combinação. O desempenho preditivo das combinações foi examinado em duas circunstâncias, uma considerando as estimativas de todo o conjunto de dados e outra para a validação cruzada. A qualidade preditiva contemplou as estatísticas de Média dos Desvios Absolutos (MDA), Raiz Quadrada do Erro Médio (RQEM) e coeficiente de correlação. Menores valores de MDA e RQEM implicam em maior qualidade preditiva. As análises gráficas consistiram na inspeção estatística da dispersão dos resíduos padronizados e dos valores observados em relação àqueles estimados.

As análises estatísticas foram efetuadas com auxílio do *software* R versão 3.5.2 (R CORE TEAM, 2018) e ESRI ArcMap 10.3.1, ao nível de significância de 1%.

3 RESULTADOS

Na análise exploratória dos dados de altura das árvores de eucalipto, obteve-se uma amplitude de variação de 11,8m (de 13,2 a 25,0m), com média de 21,5m, mediana de 21,5m, moda de 21,8m e desvio padrão de 1,5m. Ao analisar o histograma da Figura 2, constatou-se que a distribuição dos dados tendeu à simetria. Logo, os dados de altura não foram transformados para as análises geoestatísticas subsequentes. Considerando os valores do 1º e 3º quartil, verificou-se que 25% das árvores apresentaram valores de altura abaixo de 20,9m e 25% das árvores apresentam valores acima de 22,4m.

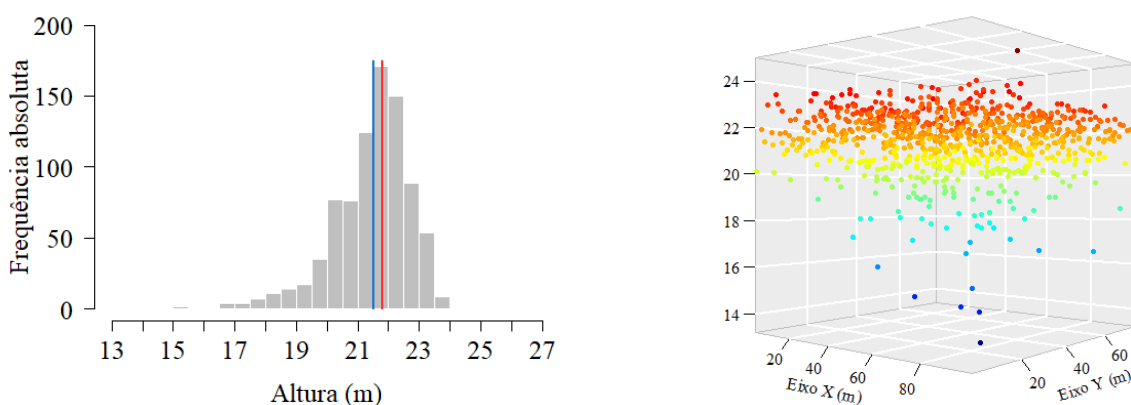


Figura 2. Histograma de frequência observada da altura de árvores de eucalipto em área de declive à direita e dispersão dos dados de altura (eixo Z, m) em plano cartesiano 3D. No

histograma, a linha vermelha representa a moda e a linha azul, coincidem a média e a mediana.

Mesmo em área de declive, não foram observadas tendências lineares ou não lineares nos dados de altura em relação ao plano cartesiano (Figura 3), que se distribuíram homogeneamente ao longo dos eixos X e Y. Não se verificou tendências no comportamento dos dados ao longo dos eixos cartesianos (perpendiculares entre si), ou seja, não existe nenhum tipo de enviesamento ou tendenciosidade direcionada. Os coeficientes de correlação entre a altura e os eixos cartesianos foram baixos, de $r = -0,1645$ ($p \leq 0,01$) com o eixo X e de $r = 0,0829$ ($p > 0,01$) com o eixo Y.

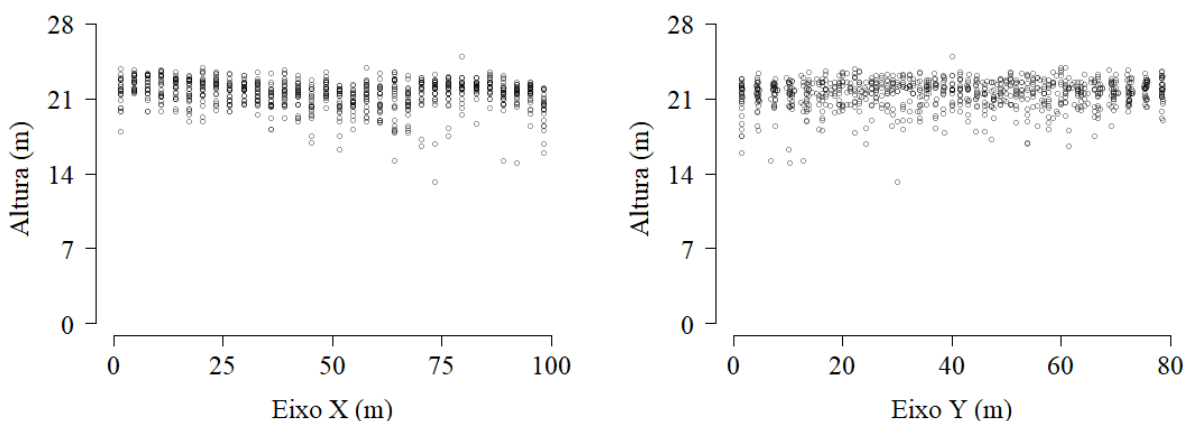


Figura 3. Dispersão da altura de árvores de eucalipto em área de declive distribuídas em plano cartesiano, nos eixos X e Y.

Os valores dos parâmetros dos semivariograma estão apresentados na Tabela 1. Nenhum dos semivariogramas apresentou efeito pepita puro. Para a altura de árvore de eucalipto em área de declive, o alcance (a), que representa a distância na qual há dependência espacial entre amostras, variou de 27 (Gaussiano) a 37m (Exponencial) entre os modelos matemáticos de semivariograma teórico. As estatísticas geradas com o modelo Gaussiano exibiram maior efeito pepita e menor contribuição, refletindo em maior valor para o grau de dependência espacial ou variação estruturada (Figura 4). O maior patamar ($C_0 + C_1$) foi evidenciado para o modelo Exponencial.

Tabela 1. Estimativa dos parâmetros dos modelos ajustados de semivariograma teórico para a altura de árvores de eucalipto em área de declive

Modelo	Efeito pepita	Contribuição	Patamar	Alcance (m)	IDE
Esférico	1,4590	0,3923	1,8513	30,8134	0,79
Exponencial	1,3089	0,5472	1,8561	36,6632	0,71
Gaussiano	1,5220	0,3396	1,8616	27,2832	0,82

IDE = índice de dependência espacial.

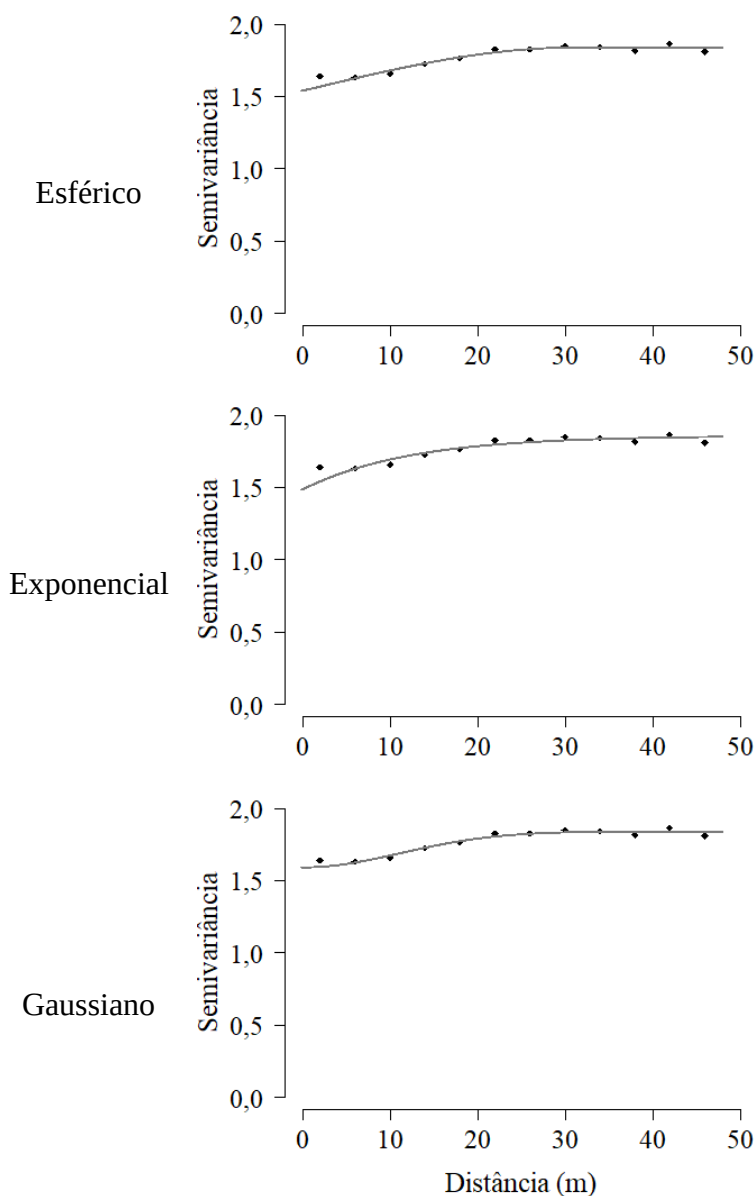


Figura 4. Semivariogramas teóricos ajustados a partir dos modelos Esférico, Exponencial e Gaussiano para a altura de árvores de eucalipto aos 5 anos de idade em área de declive.

O desempenho preditivo oscilou pouco entre os métodos de krigagem e modelos de semivariograma (Tabela 2). No que se refere a todo conjunto de dados, os coeficientes de variação foram de 4,99 e 4,79% para o MDA e RQEM, respectivamente. Nesta mesma sequência de estatísticas de qualidade, os coeficientes de variação foram de 0,30 e 0,33% para a validação. O contraste entre as estimativas de altura obtidas para todo o conjunto de dados e validação cruzada, demonstrou que os ajustes do modelo Gaussiano exibiram as menores diferenças percentuais ($< 6,5\%$) de MDA e RQEM. O maior declínio em qualidade preditiva na validação foi observado com o uso do modelo exponencial.

Tabela 2. Estatísticas de qualidade do desempenho preditivo das combinações entre métodos de krigagem e modelos ajustados de semivariograma teórico para a altura de árvores de eucalipto em área de declive

Krigagem	Modelo	MDA	RQEM	r
----- Todos os dados -----				
Ordinária	Esférico	0,8674	1,1835	0,4821**
Ordinária	Exponencial	0,8050	1,1042	0,6013**
Ordinária	Gaussiano	0,8983	1,2262	0,4090**
Simples	Esférico	0,8675	1,1854	0,5012**
Simples	Exponencial	0,8048	1,1054	0,6249**
Simples	Gaussiano	0,8995	1,2283	0,4160**
----- Validação cruzada -----				
Ordinária	Esférico	0,9513	1,2994	0,2759**
Ordinária	Exponencial	0,9536	1,3052	0,2687**
Ordinária	Gaussiano	0,9533	1,2986	0,2764**
Simples	Esférico	0,9464	1,2948	0,2714**
Simples	Exponencial	0,9489	1,3015	0,2619**
Simples	Gaussiano	0,9484	1,2934	0,2737**

** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste *t*.

Para o mesmo modelo de semivariograma, o método de krigagem simples apresentou desempenho um pouco melhor na fase de validação que aquele da krigagem ordinária. A combinação entre o método de krigagem simples e modelo Gaussiano resultou no maior coeficiente de correlação na validação ($r = 0,2737$, $p \leq 0,01$).

Os mapas de interpolação gerados para combinação entre os métodos de krigagem e modelos ajustados de semivariograma teórico são apresentados na Figura 5. Visualmente, os mapas apresentaram estruturas bem diferenciadas umas das outras. A maior precisão das

estimativas de altura foi observada para a interpolação do método de krigagem simples e modelo Gaussiano.

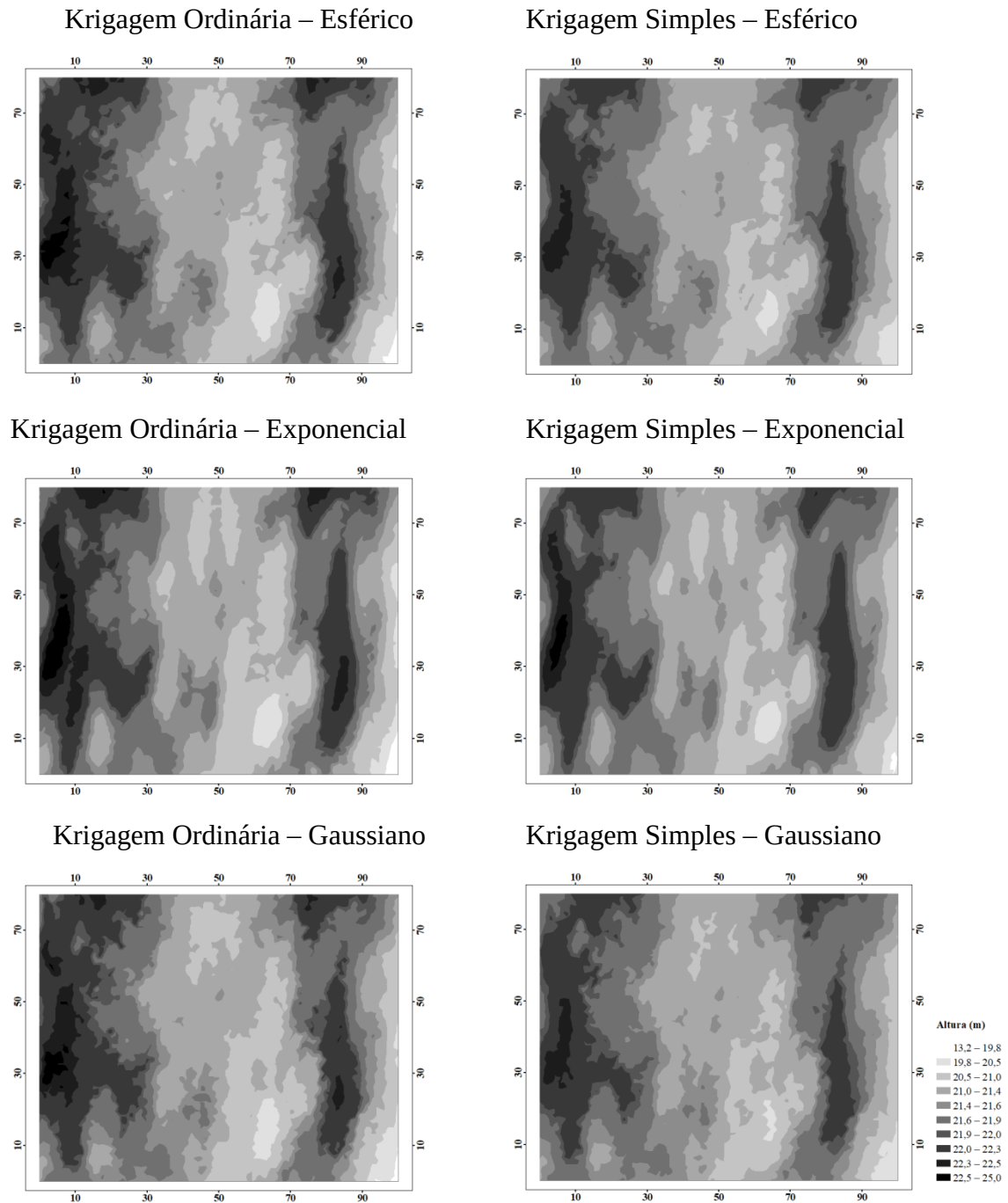


Figura 5. Interpolações relacionadas a diferentes métodos de krigagem e modelos ajustados de semivariograma teórico para a altura de árvores de eucalipto em área de declive.

4 DISCUSSÃO

O total de árvores contidas na parcela experimental foi de 849 indivíduos em 860 covas. A mortalidade regular e/ou irregular não foi identificada em campo (parcela experimental), sendo constatadas 1,28% de falhas de plantio. O coeficiente de variação da altura de árvores de eucalipto foi de relativamente baixo (6,25%) e evidenciou pequena dispersão relativa dos dados de altura em torno da média. As medidas de posição (média, moda e mediana) foram próximas entre si (oscilando de 21,5 a 21,8m). Esta semelhança é um indício claro de simetria e tendência à normalidade (JUNQUEIRA JÚNIOR et al., 2008), que pode ser comprovada graficamente pelo histograma de frequência de absoluta (Figura 2). A premissa de normalidade é um aspecto relevante para a obtenção de um bom ajuste de modelos de semivariograma teóricos pelo algoritmo de máxima verossimilhança (LIZZI et al., 2016).

A ausência de tendências lineares e não lineares nos dados de altura em relação ao plano cartesiano (Figura 3) foi essencial para o bom desempenho preditivo das interpolações. Os baixos coeficientes de correlação ($r < |0,17|$) confirmaram a ausência de tendências no que se refere aos eixos cartesianos. Segundo GOMES et al. (2007), a presença de tais tendências em dados inviabilizam a aplicação da geoestatísticas e influenciam a estrutura de dependência espacial.

O modelo de semivariograma ajustado Esférico modelou adequadamente o conjunto de dados de altura, entretanto apresentou viés para as menores distâncias, subestimando a semivariância do efeito pepita. Por outro lado, o modelo Exponencial superestimou a semivariância em maiores distâncias e a subestimou naquelas menores. O alcance desses dois modelos ajustados foi superior ao Gaussiano, que se mostrou mais preciso para delinear as semivariância ao longo das distâncias.

Pela análise de parâmetros do semivariograma teórico Gaussiano (Tabela 1), a dependência espacial da altura de árvores de eucalipto foi classificada como fraca ($IDe = 0,82$), apesar de ter exibido um alcance de 27m, representa o raio mínimo entre pontos amostrais de altura de eucalipto em área declivosa a fim de atendimento ao princípio de aleatoriedade. Conforme LUNDGREN et al. (2016), maiores valores de alcance representa homogeneidade da área, aumentando a qualidade preditiva das estimativas para a geoestatística. A escolha do procedimento amostral para a medição da altura de árvores com hipsômetro deve ser planejada com cautela, principalmente, em sítio com relevo acidentado e declivosos. Recomenda-se a análise prévia geoestatística para subsidiar o planejamento e

tomada de decisões sobre a definição de rotinas operacionais de medição de parcelas em inventários florestais contínuos. Enfatiza-se que o princípio da aleatoriedade é de fundamental importância para a obtenção de dados não enviesados durante a aplicação de técnicas estatísticas paramétricas, como a tradicional regressão linear e, especificamente no setor florestal, a modelagem hipsométrica.

O tamanho da parcela experimental e quantidade de árvores amostradas foram suficientemente grandes para a captação de variações da altura de árvores de eucalipto, permitindo a discriminação de regiões onde apresentam maior probabilidade de ocorrência de fustes dominantes e suprimidos. Pequenas oscilações das condições de relevo e distribuições de fertilizantes e demais tratamentos silviculturais durante a implantação e condução florestal podem favorecer ou prejudicar o crescimento de árvores específicas (ATTIA et al., 2019; MAIRE et al., 2019).

A interpolação da altura de árvores de eucalipto se mostrou uma eficiente ferramenta para a silvicultura de precisão, identificando regiões que requerem tratamentos silviculturais distintos em um mesmo talhão comercial. Portanto, a padronização na aplicação de corretivos e fertilizantes não é garantia de homogeneidade da altura de árvores em unidades de manejo florestal. O levantamento de todos os custos envolvidos desde o planejamento de plantio até as operações de colheita devem ser considerados na busca de mais precisão das atividades florestais.

Os resultados obtidos fornecem informações úteis para o desenvolvimento de futuras pesquisas relacionadas à hipsometria vegetal e quantificação do estoque de madeira. A interpolação probabilística com método de krigagem simples associado ao modelo de semivariograma teórico Gaussiano se mostrou uma combinação precisa para a estimativa de altura de árvores de eucalipto e classificação de regiões mais produtivas em sítios florestais.

5 CONCLUSÕES

O método de krigagem simples associado ao modelo de semivariograma teórico Gaussiano é eficiente para análises de interpolação geoestatísticas da altura de árvores de eucalipto em área de declive.

Mesmo assim, a dependência espacial da altura de eucalipto em área de declive pode existir e seu procedimento de amostragem em inventários florestais deve ser vista com cautela para assegurar o princípio da aleatoriedade.

REFERÊNCIAS

- ALVARENGA, L. H. V.; MELLO, J. M.; GUEDES, I. C. L.; SCOLFORO, J. R. S. Desempenho da estratificação em um fragmento de cerrado *stricto sensu* utilizando interpolador geoestatístico. **CERNE**, Lavras, MG, v.18, n.4, p.675-681, 2012.
- ATTIA, A.; NOUVELLON, Y.; CUADRA, S.; CABRAL, O.; LACLAU, J. P.; GUILLEMOT, J.; CAMPOE, O.; STAPE, J. L.; GALDOS, M.; LAMPARELLI, R.; MAIRE, G. Modelling carbon and water balance of *Eucalyptus* plantations at regional scale: effect of climate, soil and genotypes. **Forest Ecology and management**, v. 449, 2019, 117460.
- BARRETO, T. G.; NETTO, S. P.; CORTE, A. P. D.; RODRIGUES, A. L.; SANQUETTA, C. R. Influência das características químicas do solo na dinâmica de crescimento de um fragmento florestal. **Magistra**, Cruz das Almas, BA, v.28, n.1, p.1-12, 2016.
- BATISTA, M. L.; COELHO, G.; TEIXEIRA, M. B. R.; OLIVEIRA, M. S. Estimadores de semivariância: análise de desempenho no mapeamento da precipitação anual para o estado de Minas Gerais. **Scientia Agraria**, Curitiba, PR, v.19, n.1, p.64-74, 2018.
- BINOTI, D. H. B. et al. Redução dos custos em inventário de povoamentos equiâneos. **Agrária**, Recife, PE, v.8, p.125-129, 2013.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. Editora UFV, Viçosa, MG, 5ª ed., 2017, 548p.
- CARMO, E. J.; RODRIGUES, D. D.; SANTOS, G. R. avaliação dos interpoladores krigagem e topo to raster para geração de modelos digitais de elevação a partir de um “As Built”. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, PR, v.21, n.4, p.674-690, 2015.
- CARVALHO, J. R. P.; VIEIRA, S. R.; GREGO, C. R. Comparação de métodos para ajuste de modelos de semivariograma da precipitação pluvial anual. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.13, n.4, p.443-448, 2009.
- GOMES, N. M.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; FARIA, M. A.; OLIVEIRA, P. M. Métodos de ajuste e modelos de semivariograma aplicados ao estudo da variabilidade espacial de atributos físicos-hídricos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.3, p.435-443, 2007.
- GUEDES, I. C. L.; MELLO, J. M.; MELLO, C. R.; OLIVEIRA, A. D.; SILVA, S. T.; SCOLFORO, J. R. S. Técnicas geoestatísticas e interpoladores espaciais na estratificação de povoamentos de *Eucalyptus* sp. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.22, n.3, p.541-550, 2012.
- FERREIRA, I. O.; ZANETTI, J.; GRIPP, J. S.; MEDEIROS, N. G. Viabilidade do uso de imagens do sistema rapideye na determinação da batimetria de águas rasas. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, RJ, n.68/7, p.1331-1340, 2016.
- IBÁ [Indústria Brasileira de Árvores] Histórico do Desempenho do Setor, 2019. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>>. Acesso em dez/2019.

JUNIOR, K. H.; MELLO, J. M.; SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA, A. D. Avaliação da continuidade espacial de características dendrométricas em diferentes idades de povoamentos clonais de *Eucalyptus* sp. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.31, n.5, p.859-866, 2007.

JUNQUEIRA JÚNIOR, J. A.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; PINTO, D. B. F. Continuidade espacial de atributos físicos-hídricos do solo em sub-bacia hidrográfica de cabeceira. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 3, p. 914-922, 2008.

KÖPPEN, W. **Das geographische system der klimate**. Berlin: Gerbrüder Bornträger, 1936. 44 p.

LIZZI, E. A. S.; ACHCAR, A.; MARTINEZ, E. Z.; ACHCAR, J. Algumas considerações práticas sobre a precisão dos estimadores de mínimos quadrados e máxima verossimilhança para os parâmetros de regressão linear normal. **Ciência e Natura**, v. 38, n. 1, pp. 55-70, 2016.

LUNDGREN, W. J. C.; SILVA, J. A. A. FERREIRA, R. L. C. Estimação de volume de madeira de eucalipto por cokrigagem, krigagem e regressão. **CERNE**, Recife, PE, v.21, n.2, p.243-250, 2015.

LUNDGREN, W. J. C.; SILVA, J. A. A.; FERREIRA, R. L. C. Influência do tipo de amostragem na estimativa de volume de madeira de eucalipto por krigagem. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 4, p. 511-523, 2016.

MAIRE, G.; GUILLEMOT, J.; CAMPOE, O. C.; STAPE, J. L.; LACLAU, J. P.; NOUVELLON, Y. Light absorption, light use efficiency and productivity of 16 contrasted genotypes of several *Eucalyptus* species along a 6-year rotation in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 449, 2019, 117443.

MELLO, J. M.; BATISTA, J. L. F.; OLIVEIRA, M. S.; RIBEIRO, P. J. Estudo da dependência espacial de características dendrométricas para *Eucalyptus grandis*. **CERNE**, v. 11, n. 2, p. 113-126, 2005.

MENDONÇA, A. R.; CARVALHO, S. P. C.; CALEGARIO, N. Modelos hipsométricos generalizados mistos na predição da altura de *Eucalyptus* sp. **CERNE**, Lavras, MG, v.21, n.1, p.107-115, 2015.

NUNES, A. C. P.; SANTOS, G. A.; RESENDE, M. D. V.; SILVA, L. D.; HIGA, A.; ASSIS, T. F. Estabelecimento de zonas de melhoramento para clones de eucalipto no Rio Grande do Sul. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, SP, v.44, n.111, p.563-574, 2016.

ODA-SOUZA, M.; BARBIN, D.; JÚNIOR, P. J. R.; STAPE, J. L.; Aplicação de métodos geoestatísticos para identificação de dependência espacial na análise de dados de um ensaio de espaçamento florestal em delineamento sistemático tipo leque. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.32, n.3, p.499-509, 2008.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. 2018.

SANQUETTA, C. R.; WATZALAWICK, L. F.; CORTE, A. P. D.; FERNANDES, L. A. V.; SIQUEIRA, J. D. P. **Inventários Florestais: Planejamento e Execução**. 2 ed. Curitiba: Multi-Graphic Gráfica e Editora, 2009. 316 p.

SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M. **Inventário florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2006. 561p.

SCOTT, D. W. On optimal and data-based histograms. **Biometrika**, Oxford, v.66, n.3, p.605-610, 1979.

SKORUPA, A.; LUCIA, A.; GUIMARÃES, G.; ROBERTO, L.; CURI, N.; SILVA, C.P. C.; SCOLFORO, J. R. S.; SÁ, G.; MARQUES, J. J. M. Propriedades de solos sob vegetação nativa em Minas Gerais: distribuição por fitofisionomia, hidrografia e variabilidade espacial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.36, n.1, p.11-22, 2012.

VIOLA, M. R.; MELLO, C. R.; PINTO, D. B. F.; MELLO, J. M.; ÁVILA, L. F. Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.14, n.9, p.970–978, 2010.