

## Estimativa volumétrica de um fragmento de Cerrado *Sensu Stricto* através de técnicas geostatísticas e sensoriamento remoto

Marcel Régis Raimundo<sup>1</sup>  
Aliny Aparecida dos Reis<sup>1</sup>  
Anderson Pedro Bernardina Batista<sup>1</sup>  
Iasmim Louriene Gouveia Silva<sup>1</sup>  
José Marcio de Mello<sup>1</sup>  
Fausto Weimar Acerbi Junior<sup>1</sup>  
Henrique Ferrazo Scolforo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Lavras - UFLA  
Caixa Postal 3037 - 37200-000 - Lavras - MG, Brasil  
marcelufla@gmail.com, alinyreis@hotmail.com, anderson\_pedro22@yahoo.com.br,  
iasmimlouriene@gmail.com, {josemarcio, fausto}@dcf.ufla.br,  
henriquescolforo@hotmail.com

**Abstract.** The knowledge of the forest stock is important for forest resources planning. The combination of the forest inventory with geostatistics and remote sensing provide to more accurate estimates of forest biomass. Therefore, the present study aimed to compare volume estimates from the ordinary kriging and co-kriging. It was used the NDVI as the auxiliary variable for co-kriging. The work was performed in a fragment of Cerrado *Sensu Stricto* located in the north Minas Gerais State. The results shown by the statistics of the residual standard error (Syx), residual average and graphs of observed and predicted values and percentage errors relative to observed values did not show significant differences between ordinary kriging and co-kriging. Also, it was observed that the maps generated by kriging and co-kriging are very similar. These results demonstrate that the use of an auxiliary variable with low correlation in relation of the primary variable ( $r=0,346$ ), as well as the poor spatial dependence of the auxiliary variable did not aggregate for a more accurate information. The performing of the co-kriging is not suitable in the situation that the auxiliary variable presents a low correlation with the main variable and also when the auxiliary variable presents a poor spatial dependence.

**Palavras-chave:** NDVI, kriging, cokriging, NDVI, krigagem, cokrigagem.

### 1. Introdução

O conhecimento do máximo potencial que as florestas oferecem é de suma importância, tanto para fins de produção como para fins de conservação. Segundo Scolforo et al. (2008) o planejamento do manejo em bases sustentáveis, aliado às análises de investimento e às diversas tomadas de decisão que, cotidianamente têm como objeto a vegetação nativa, justifica a utilização do inventário florestal. As informações oriundas do inventário são essenciais para o planejamento de atividades de corte, colheita e para suprir com matéria-prima a demanda dos usuários dos recursos naturais, seja como fonte de energia ou demais formas de uso.

O inventário florestal incide da teoria de amostragem para a determinação ou estimativa de características quantitativas ou qualitativas da floresta. Dentre as características quantitativas citam-se: volume, sortimentos, área basal, altura média das árvores dominantes, biomassa, densidade, densidade da madeira por árvore e por unidade de área, e diâmetro médio quadrático, dentre outras (Péllico Netto e Brena, 1997; Scolforo e Mello, 2006).

Como objetivos dos inventários realizados para manejo florestal podem ser mencionados: a disponibilidade de conhecer o volume de madeira atual e futuro, conhecer o custo da produção de madeira sob diferentes alternativas de manejo, a compra e venda de madeiras e terras (Franco et al., 1997). Desta forma, a redução dos custos de amostragem, sem significativa perda de precisão, é um dos esforços sobre o qual muitos pesquisadores têm trabalhado.

Assim, uma alternativa capaz de efetuar a predição de variáveis dendrométricas com eficácia sem gerar aumento nos custos dos inventários florestais em relação aos métodos tradicionais é a utilização do interpolador geoestatístico, principalmente pela sensibilidade de captar a autocorrelação entre as parcelas, de forma a elevar a eficiência da estimativa (Mello et al., 2009). Desta forma, a krigagem e sua extensão multivariada, denominada cokrigagem (Yamamoto; Landim, 2013), destacam-se como interpoladores estatísticos que estimam valores em pontos não amostrados a partir de informações dos pontos amostrados, considerando a estrutura de dependência espacial da característica em estudo, como observado nos trabalhos de Mello et al. (2006) para predição de volume, Mello et al. (2009) para variável volume, sob diferentes intensidades amostrais, Guedes et al. (2012), por meio da estratificação da variável volume.

Essas técnicas geoestatísticas, aliadas as técnicas de sensoriamento remoto, estão cada vez mais, sendo utilizadas e aprimoradas para fornecer informações de objetos com certa precisão, sem contato físico, por meio do uso de sensores remotos (Turner et al., 2004), por exemplo, para cálculos de índices de vegetação, usados para estimar componentes biofísicos da vegetação.

Os índices de vegetação baseados em quocientes, como o NDVI, trabalham com as bandas espectrais do vermelho e infravermelho próximo em virtude do comportamento da vegetação nestas bandas espectrais. A vegetação vigorosa de espécies folhosas absorve radiação na zona do vermelho (0,6 a 0,7 $\mu$ m) e reflete a maior parte da energia incidente na região do infravermelho próximo (0,7 a 1,1 $\mu$ m) (Berra et al., 2012). Assim, os índices de vegetação podem ser associados a outras características dendrométricas para identificar produtividade, estoque de biomassa e outras variáveis de interesse da vegetação (Tomppo et al., 2008).

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi comparar a estimativa da variável volume aplicando-se o interpolador geoestatístico da krigagem ordinária com a estimativa do volume aplicando-se o interpolador da co-krigagem com a utilização do NDVI como variável auxiliar.

## 2. Metodologia de Trabalho

A área de estudo corresponde a um fragmento de Cerrado *Sensu Stricto* localizado no município de Januária, na Zona do Alto Médio São Francisco, região norte do Estado de Minas Gerais, cujas coordenadas geográficas são 15°20'06" S, 45°14'14" W e altitude média de 620 metros, e uma área aproximada de 398,40 ha.

O clima da região, segundo a classificação climática de Köppen, é Aw, tropical úmido com inverno seco, e temperatura média anual em torno de 23,4°C, com uma amplitude anual de 16°C a 34°C. Outubro e novembro são os meses mais quentes e junho e julho os mais frios. A precipitação anual média é de 1.098 mm e o tipo de solo predominante da região é o Latossolo (Scolforo; Mello; Oliveira, 2008).

Os dados do inventário florestal foram obtidos lançando-se de forma sistemática 33 parcelas retangulares de 1000 m<sup>2</sup>, sendo que nestas foram medidas a circunferência a 1,30 m do solo (CAP) e a altura total de todas as árvores com circunferência mínima de 15,7 cm. Todas as unidades amostrais foram georreferenciadas e as estimativas de volume de madeira foram obtidas aplicando-se as equações volumétricas geradas por fitofisionomia desenvolvidas por Rufini et al. (2010).

Os dados da imagem de sensoriamento remoto foram obtidos a partir de uma imagem do satélite Landsat 5 TM na data de passagem de 04/09/2010 correspondente com a coleta dos dados em campo, na órbita 219 ponto 071, com resolução espacial de 30 m, nas bandas TM1 (0,45 – 0,52  $\mu$ m), TM2 (0,52 – 0,60  $\mu$ m), TM3 (0,63 – 0,69  $\mu$ m), TM4 (0,76 – 0,90  $\mu$ m) e TM5 (1,55 – 1,75  $\mu$ m), correspondente as regiões espectrais do azul, verde, vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio, respectivamente.

A imagem foi corrigida geometricamente, e em seguida, realizou-se o cálculo do índice de vegetação NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*).

A partir das coordenadas geográficas dos centroides das parcelas extraiu-se o valor de NDVI, e adicionalmente foram distribuídos 103 pontos aleatoriamente pela área do fragmento onde foram coletados os valores de NDVI.

Para a aplicação da krigagem e da cokrigagem foi realizado primeiramente o estudo variográfico com a geração do semivariograma experimental e ajustes dos modelos. Neste trabalho por meio do Critério de Informação de Akaike (AIC) e Validação Cruzada selecionou o modelo exponencial ajustado por quadrados mínimos ponderados.

Primeiramente foi efetuada a krigagem ordinária a partir da identificação dos pesos obtidos com os parâmetros do semivariograma ajustado para a característica volume (m<sup>3</sup>/ha). O estimador da krigagem ordinária foi descrito inicialmente por Journel e Huijbregts (1978) e atualmente por Meusburger et al. (2012) e Hengl et al. (2004).

Posteriormente foi aplicada a co-krigagem, conceituada como uma extensão da krigagem ordinária em que uma ou mais variáveis de fácil obtenção auxiliam na estimativa da variável principal (Yamamoto e Landim, 2013). Desta maneira foi obtido os parâmetros do semivariograma cruzado ajustado para o volume (m<sup>3</sup>/ha) em função da variável auxiliar NDVI.

O estimador da co-krigagem é representado pela Equação 1:

$$\hat{Z}_{X_0} = \sum_{i=1}^{n1} \lambda_{1i} Z_{1i} + \sum_{i=1}^{n2} \lambda_{2i} Z_{2i} \quad (1)$$

Em que  $\hat{Z}_{X_0}$  é a estimativa do valor na posição  $X_0$ ;  $n$  é o número de pontos amostrais vizinhos utilizados para a predição do valor não amostrado  $\hat{Z}_{X_0}$  (vizinhança da krigagem);  $\lambda_{1i}$  e  $\lambda_{2i}$  são os  $i$ -ésimos pesos atribuídos a cada  $i$ -ésima observação das variáveis  $Z_{1i}$  (variável observada) e  $Z_{2i}$  (covariável observada).

Para a comparação das estimativas geradas a partir da krigagem ordinária e da co-krigagem foram utilizadas as estatísticas de erro padrão residual ( $S_{yx}$ ) (Equação 2), média residual, além dos gráficos de dispersão dos valores observados e preditos e do erro percentual em relação aos valores observados em torno da reta 1:1.

$$S_{xy} = \sqrt{\frac{QMerro}{n - p - 1}} \quad (2)$$

em que  $QMerro$  o quadrado médio do erro;  $n$  o número de observações; e  $p$  o número de parâmetros.

Realizou-se também a comparação dos mapas das estimativas de volume (m<sup>3</sup>/ha) da krigagem ordinária e da co-krigagem. Todas as análises foram realizadas no ArcMap versão 10.1 (Esri, 2011), com o uso da extensão *Geostatistical Analyst* (Esri, 2010).

### 3. Resultados e Discussão

Na Tabela 1 encontram-se as estatísticas de erro padrão residual e a média residual para a estimativa do volume (m<sup>3</sup>/ha) da krigagem ordinária e co-krigagem. Observa-se que a krigagem ordinária apresentou valores de  $S_{yx}$  ligeiramente inferiores comparados aos valores apresentados pelo interpolador da co-krigagem, demonstrando assim uma ligeira superioridade da krigagem em relação a co-krigagem.

De forma contrária a média residual da krigagem foi ligeiramente superior em relação à co-krigagem indicando que a co-krigagem apresentou-se pouco superior a krigagem.

Tabela 1. Estatísticas referentes às estimativas de volume (m<sup>3</sup>/ha) pelos interpoladores da krigagem ordinária e co-krigagem.

Estatísticas	Interpolador	
	Krigagem	Cokrigagem
$S_{yx}$ (m <sup>3</sup> /ha)	1,6240	1,6502
$S_{yx}$ (%)	4,2648	4,3335
Média Residual (m <sup>3</sup> /ha)	0,1690	0,1650

As Figuras 1 e 2 representam os gráficos de dispersão dos valores observados em relação aos preditos, bem como o erro percentual em relação aos valores observados para o volume (m<sup>3</sup>/ha) para a krigagem ordinária e co-krigagem, respectivamente.

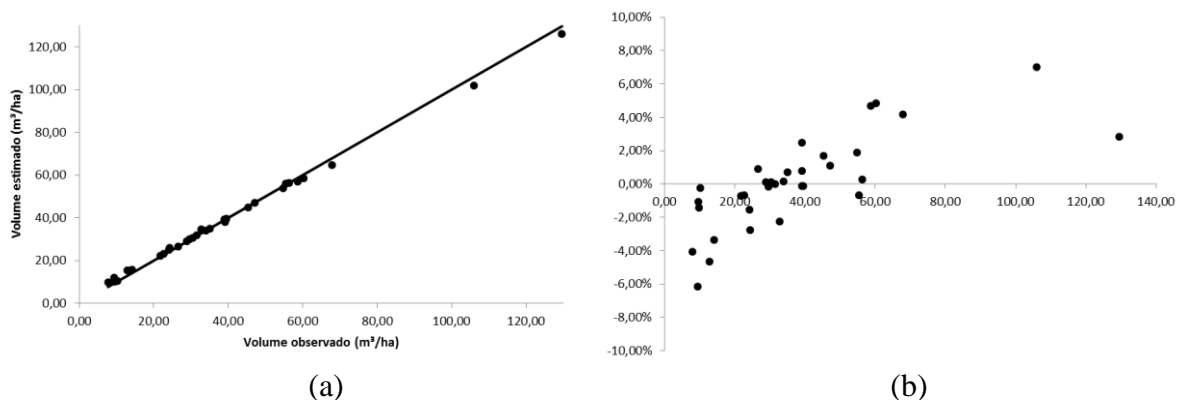


Figura 1. Gráficos da estimativa de volume (m<sup>3</sup>/ha) pela krigagem ordinária: Dispersão dos valores observados em relação aos preditos (a); Erro percentual em relação aos valores observados (b).

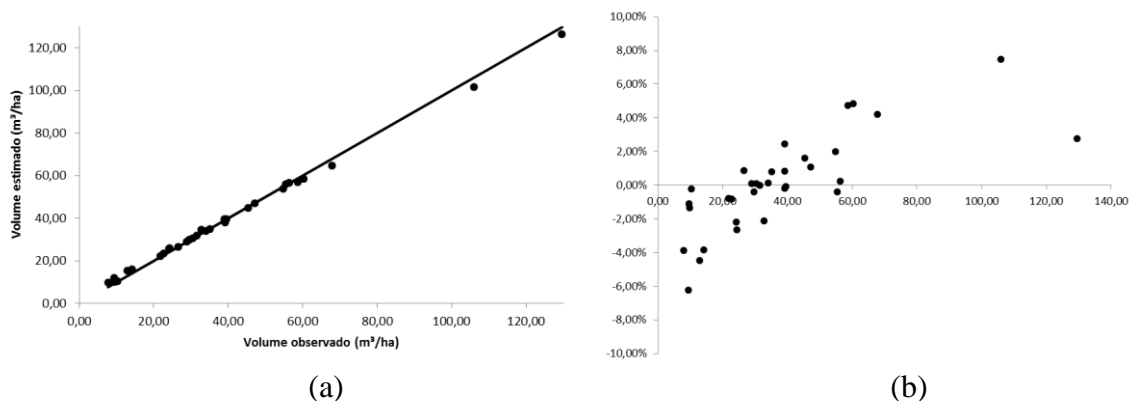


Figura 2. Gráficos da estimativa de volume (m<sup>3</sup>/ha) pela co-krigagem: Dispersão dos valores observados em relação aos preditos (a); Erro percentual em relação aos valores observados (b).

Comparando as Figuras 1(a) e 2(a), de um modo geral, percebe-se boa estimativa para ambos interpoladores, apresentando os pontos bem distribuídos em torno da reta 1:1. Percebe-se também que quase não existem diferenças entre as Figuras 1(a) e 2(a), indicando que as estimativas de volume pela krigagem e co-krigagem foram praticamente iguais.

Mesma lógica ocorre analisando as Figuras 1(b) e 2(b), em que os valores de erro percentual apresentados são semelhantes, indicando também semelhanças nas estimativas para ambos interpoladores. Este fato ocorreu pela baixa correlação linear entre as variáveis volume e NDVI ( $r = 0,346$ ) e também pelo fato do NDVI apresentar fraca dependência espacial (7,9%) de acordo com Cambardella et al. (1994). Yates e Warrick, citados por Basaran et al. (2011), verificaram que a cokrigagem retorna melhores resultados em relação a krigagem quando a correlação entre as variáveis primária e secundária excedem 0,50. Deste modo, a utilização dos valores de NDVI como variável auxiliar na estimativa do volume pela co-krigagem não acarretou em ganho em relação ao método da krigagem ordinária, ou seja, o NDVI não foi capaz de auxiliar a estimativa do volume para os pontos não amostrados.

Para corroborar com os valores apresentados pelas estimativas, as Figuras 3 e 4 representam os mapas de estimativa do volume pela krigagem ordinária e co-krigagem. Pela análise visual dos mesmos é possível verificar que não há diferenças significativas quanto às suas conformações, evidenciando também que as estimativas do volume por ambos os interpoladores não acarretou em mudanças significativas na distribuição espacial da variável volume.

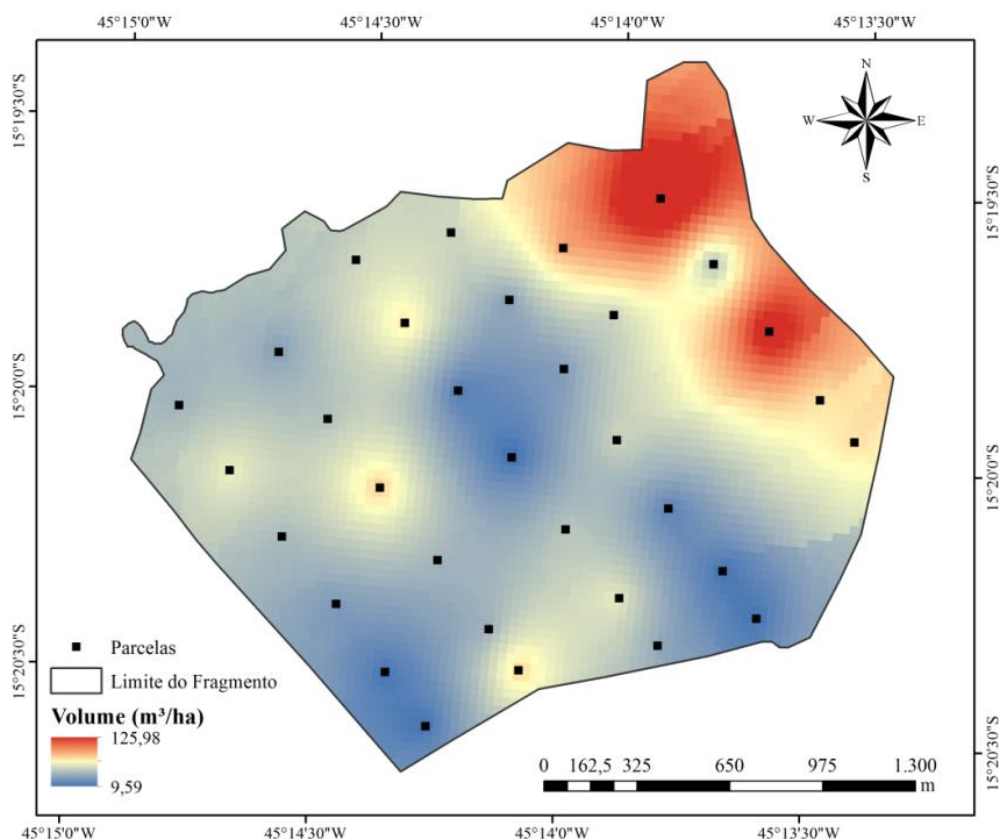


Figura 3. Mapa da estimativa de volume (m<sup>3</sup>/ha) referente ao interpolador geostatístico da krigagem ordinária.

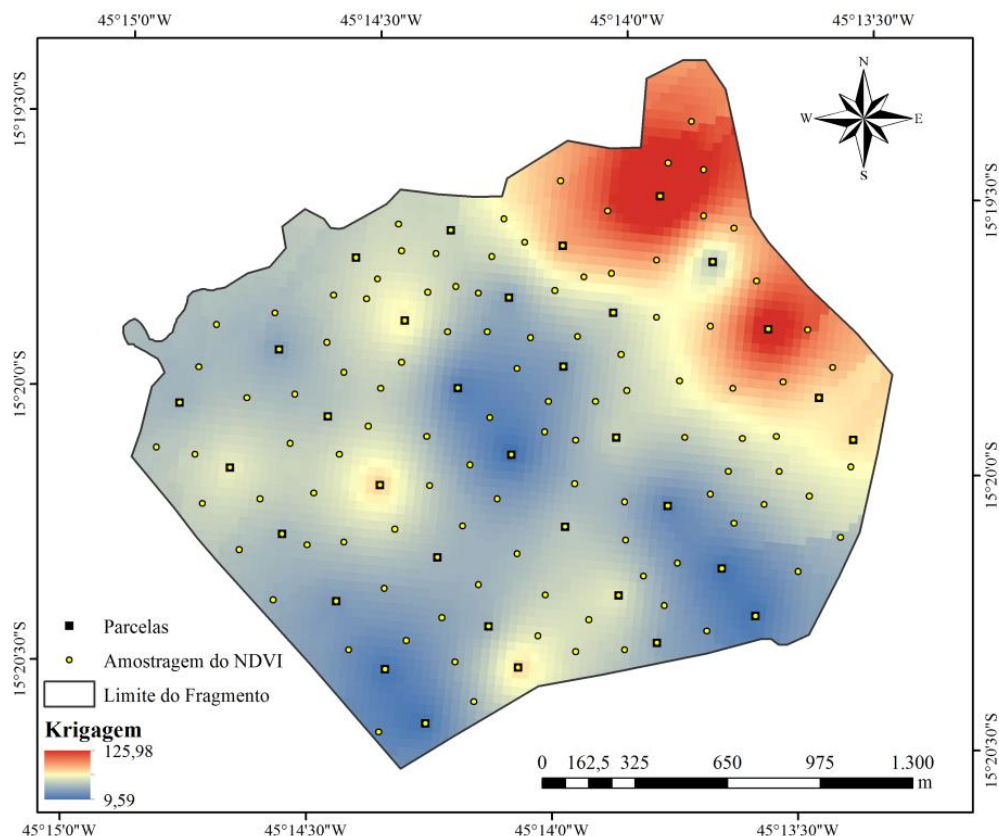


Figura 4. Mapa da estimativa de volume ( $m^3/ha$ ) referente ao interpolador geoestatístico da co-krigagem.

#### 4. Conclusões

Para um fragmento de Cerrado *Sensu Stricto* localizada na região norte de Minas Gerais a estimativa do volume ( $m^3/ha$ ) com a aplicação da co-krigagem com a variável auxiliar NDVI não apresentou ganhos em relação à krigagem.

A aplicação da co-krigagem com a utilização de uma variável auxiliar com baixa correlação com a variável principal e apresentando fraca correlação espacial não é indicada, tendo em vista os resultados obtidos pelo presente estudo.

#### Agradecimentos

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos à FAPEMIG pelo apoio financeiro.

#### Referências Bibliográficas

Basaran, M.; Erpul, G.; Ozcan, A.U.; Saygin, D.S.; Kibar, M.; Bayramin, I; Yilman, F.E. Spatial information of soil hydraulic conductivity and performance of cokriging over kriging in a semi-arid basin scale. **Environmental Earth Sciences**, New York, v. 63, p. 827–838, 2011.

Berra, F.; Brandelero, E.; Pereira, C. S.; Sebem, R.; Goergem, L. C. G.; Benedetti, A. C. P.; Lippert, D. B. Estimativa do volume total de madeira em espécies de eucalipto a partir de imagens de satélite Landsat. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 853-864, 2012. Disponível em:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53424836019>> ISSN 0103-9954.

Cambardella, C. A.; Moorman, T. B.; Novak, J. M.; Parkin, T. B.; Karlen, D. L.; Turco, R. F.; Konopka, A. E. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

Environmental Systems Research Institute **ArcGIS Desktop**: Release 10.1. Redlands, CA: ESRI, 2010.

Environmental Systems Research Institute - ESRI. **Geostatistical analyst tutorial**. Redlands, 2010. 57 p.

Franco, E.J.; Scolforo, J.R.S.; Mello, J.M.; Oliveira, A.D. Eficiência dos métodos para estimativa volumétrica de *Eucalyptus camaldulensis*. *Cerne*, Lavras, v.3, n.1, p.82-116, 1997.

Galeana-Pizaña, J. M.; López-Caloca, A.; López-Quiroz, P.; Silván-Cárdenas, J. L.; Couturier, S. Modeling the spatial distribution of above-ground carbon in Mexican coniferous forests using remote sensing and a geostatistical approach. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Amsterdam, v. 30, p. 179-189, 2014.

Guedes, I. C. de 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, jul.-set., 2012.

Hengl, T.; Heuvelink, G.; Stein, A.A. A genetic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. **Geoderma**, Amsterdam, v. 122, n. 1, p. 75-93, 2004.

Journel, A. G.; Huijbregts, C. J. **Mining geostatistics**. London: Academic, 1978. 600 p.

Turner, D. P.; Lefsky, M. A.; Ritts, W. D.; Van Tuyl, S.; Law, B. E. Monitoring forest carbon sequestration with remote sensing and carbon cycle modeling. **Environmental Management**, v. 33, p. 457-466, Aug. 2004.

Mello, J. M.; Oliveira, M. S.; Batista, J. L. F.; Ribeiro Jr, P. J.; Kanegae Jr, H. Uso do estimador geoestatístico para predição volumétrica por talhão. **Floresta**, Curitiba, v. 36, n. 2, p. 251-260, 2006.

Mello, J. M. de.; Diniz, F. S.; Oliveira, A. D.; Scolforo, J. R. S.; Acerbi Júnior, F. W.; Thiersch, C. R. Métodos de amostragem e geoestatística para estimativa do número de fustes e volume em plantios de *Eucalyptus grandis*. *Revista Floresta*, Curitiba, v. 39, n. 1, jan./mar., 2009.

Meusburger, K.; Steel, A.; Panagos, P.; Montanarella, L.; Alewell, C. Spatial and temporal variability of rainfall erosivity factor for Switzerland. **Hydrology and Earth System Sciences**, Gottingen, 16, 167-177, 2012.

Péllico Netto, S.; Brena, D. A. **Inventário florestal**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná: Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1997. 316 p.

Rufini, A. L.; Scolforo, J. R. S.; Oliveira, A. D.; Mello, J. M. Equações volumétricas para o cerrado *sensu stricto* em Minas Gerais. *Cerne*, Lavras, v. 16, n. 1, p. 1-11, jan./mar. 2010.

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

Scolforo, J. R. S.; Mello, J. M.; Oliveira, A. D. **Inventário florestal de Minas Gerais: Cerrado, florística, diversidade, similaridade, distribuição diamétrica e de altura, volumetria, tendências de crescimento e áreas aptas para manejo florestal**. Lavras: UFLA, 2008. 216 p.

Scolforo, J. R.; Rufini, A. L.; Mello, J. M.; Oliveira, A. D.; Silva, C. P. C. Equações para estimar o volume de madeira das fisionomias, em Minas Gerais. In: Scolforo, J. R.; Oliveira, A. D.; Acerbi Júnior, F. W.(Ed.). **Inventário Florestal de Minas Gerais – Equações de Volume, Peso de Matéria Seca e Carbono para Diferentes Fisionomias da Flora Nativa**. Lavras: UFLA, 2008. cap. 2, p.67-101

Tomppo, E.; Olsson, H.; Stahl, G.; Nilsson, M.; Hagner, O.; Katilat al. Combining national forest inventory field plots and remote sensing data for forest databases. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 1982-1999, 2008.

Yamamoto, J. K.; Landim, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de textos, 2013, 215 p.