

**CONTINUIDADE ESPACIAL DE CARACTERÍSTICAS DENDROMÉTRICAS
EM UMA ÁREA DE CERRADO NO NORTE DE GOIÁS**
SPATIAL CONTINUITY OF DENDROMETRIC CHARACTERISTICS IN A
SAVANNA AREA IN THE NORTH OF GOIÁS STATE

RESUMO

Conhecer o efeito da continuidade espacial proporciona previsões das características dendrométricas de forma mais segura, otimizando o inventário, manejo e planejamento florestal. Objetivou-se conhecer a estrutura de continuidade espacial das variáveis DAP médio, altura média, densidade e área basal, em função das diversas formações fisionômicas, por meio de técnicas de semivariograma, técnicas de krigagem e estimação dos parâmetros pelo método da máxima verossimilhança. Os dados foram coletados em área de 3.463 hectares de floresta nativa em Minaçu, região norte do estado de Goiás. Para cada parcela foram geradas as variáveis dendrométricas e construídos semivariogramas para cada variável. Utilizou-se a transformação das variáveis por meio do Box-Cox para corrigir o problema da presença de “outlier” e ausência de normalidade das variáveis. Por meio do método da máxima verossimilhança foram geradas estimativas dos parâmetros efeito pepita (τ^2), variação estruturada (σ^2), alcance (Φ), patamar ($\tau^2 + \sigma^2$) e relação da variação estruturada - patamar (DE %) para cada variável. Avaliando os parâmetros do modelo ajustado e os semivariogramas observa-se uma estrutura forte de correlação espacial no modelo para a maioria das variáveis. Esse resultado propõe considerar a estrutura de dependência espacial nessas áreas no processamento do inventário florestal, seja na intensidade e alocação das parcelas, ou seja, na previsão das características dendrométricas de acordo com o modelo que contenha essa estrutura.

Palavras-chave: geoestatística; variáveis dendrométricas; cerrado.

ABSTRACT

Knowledge about the effect of spatial continuity provides safe predictions about dendrometrics characteristics, optimizing inventory, forest management and planning. This paper aimed to know about the structure of spatial continuity of the variables DBH, height, density and basal area, considering several physiognomic formations, using semivariograms and kriging techniques and parameter estimation by maximum likelihood method. Data were collected in 3,463 hectares of native forest in Minaçu, north of Goiás state. For each plot the dendrometrics variables were observed and their semivariograms were obtained. We used the Box-Cox transformation to solve the outliers problem and lack of normality of the variables. Parameter estimates of nugget effect (τ^2), structured variation (σ^2), range (Φ), sill ($\tau^2 + \sigma^2$) and relationship between structured variation - sill (DE%) were obtained by the method of maximum likelihood for each variable. The parameters of the adjusted model and the semivariograms indicated a strong spatial correlation structure for most variables. This result suggests considering the structure of spatial dependence in these areas during inventories, evaluating the intensity and allocation of the plots, *i.e.*, predict the dendrometrics characteristics according to the template that contains this structure.

Keywords: geostatistic; dendrometrical variables; savanna.

INTRODUÇÃO

A classificação da vegetação se baseia em aspectos estruturais, ecológicos e florísticos. Segundo Ribeiro e Walter (1998), a classificação mais usada para o Cerrado sugere dois níveis hierárquicos de organização (estrutura e composição), cuja classificação mais abrangente são as formações florestais, savânicas e campestres. As formações florestais são compostas pelas fitofisionomias mata de galeria, mata ciliar, mata seca e cerrado. Esses tipos de formações possuem mais de 70% de cobertura arbórea. As formações savânicas, com cobertura arbórea entre 5 e 60%, compreendem veredas, palmeirais, parque e cerrado *sensu stricto*, este último compreendendo os cerrados ralo, típico, denso e rupestre. Com cobertura arbórea menor que 5%, as formações campestres são compostas por campos limpo, sujo e rupestre. Segundo o autor, a floresta estacional semidecidual submontana, em sua forma disjunta, pode ocorrer entremeada às formações savânicas, ocupando terrenos aplainados, com solos mesotróficos e profundos (tipicamente latossolos).

O cerrado tende a ocorrer em solos bem-drenados, ácidos e pobres em nutrientes, com altos níveis de alumínio trocável, e, com aumento da disponibilidade de água ou fertilidade do solo, tende a ser substituído por florestas (Goodland e Ferri, 1979), (Oliveira-Filho e Ratter, 2002). De acordo com Goodland e Pollard (1973), a altura e área basal arbórea variam de acordo com os nutrientes do solo, especialmente fósforo (P), aumentando de pastagens a cerrados, atingindo, em locais de floresta, maior biomassa de árvores e quantidade de P no solo.

Considerando que os organismos apresentam-se agregados em manchas, em forma de gradientes ou em outros tipos de estruturas espaciais, procura-se entender, quantificar e modelar os padrões de estrutura espacial, por meio de métodos geoestatísticos. A variabilidade espacial pode, muitas vezes, afetar de forma marcante a qualidade das estimativas feitas pelo inventário. Desse modo, uma análise criteriosa, visando conhecer o comportamento espacial das características dendrométricas, é fundamental na escolha de um método estatístico que otimize recurso sem perda de precisão no processo de estimativa. Técnicas geoestatísticas baseadas em variogramas têm sido as mais utilizadas para a modelagem da continuidade espacial, mas com a desvantagem de não assumirem explicitamente nenhuma distribuição (Ploner e Dutter, 2000). Além disso, podem levar a resultados muitas vezes imprecisos, em função dos diferentes números de pares que geram cada ponto do variograma e pelo fato de cada ponto entrar várias vezes no cálculo das distâncias (Oliveira, 2003). A geoestatística baseada em modelos descreve problemas geoestatísticos fundamentados na aplicação de métodos geoestatísticos formais, com a explicitação de um modelo e de métodos de inferência baseados na máxima verossimilhança. As vantagens da explicitação de modelos, associada à máxima verossimilhança, são maior eficiência na estimação de parâmetros e avaliação da incerteza envolvida na estimativa da estrutura de dependência (Diggle e Ribeiro Jr., 2007), que podem facilmente ser integradas na previsão, ao contrário da geoestatística baseada em variogramas.

Um estimador capaz de efetuar a predição de características dendrométricas com eficácia em relação às parcelas medidas é a krigagem, que considera a autocorrelação entre as parcelas, aumentando a eficiência da estimativa. Krigagem é o interpolador geoestatístico para locais não amostrados, em combinação linear dos pontos amostrados, considerando pesos para cada um deles.

O objetivo do trabalho é avaliar a estrutura de dependência espacial de quatro características dendrométricas em uma área do bioma Cerrado com diversas formações

fisionômicas, por meio de técnicas de semivariograma, método da máxima verossimilhança e técnica de predição por krigagem.

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição da área e coleta de dados

O trabalho foi conduzido em uma área de 3.463 hectares de floresta, localizada no município de Minaçu, região no extremo norte do estado de Goiás (Figura 1). A área de estudo apresentou coordenadas geográficas entre 13 30'00''S de latitude sul e entre 48 15'00'' de longitude oeste, com uma altitude variando entre 418 metros e 831 metros. O clima da região classificou-se como Aw de Köppen, ou seja, tropical com estação seca. Esta região apresenta um mosaico de vegetação de Cerrado, Florestas decíduas e Florestas semidecíduas (IBGE, 1990).

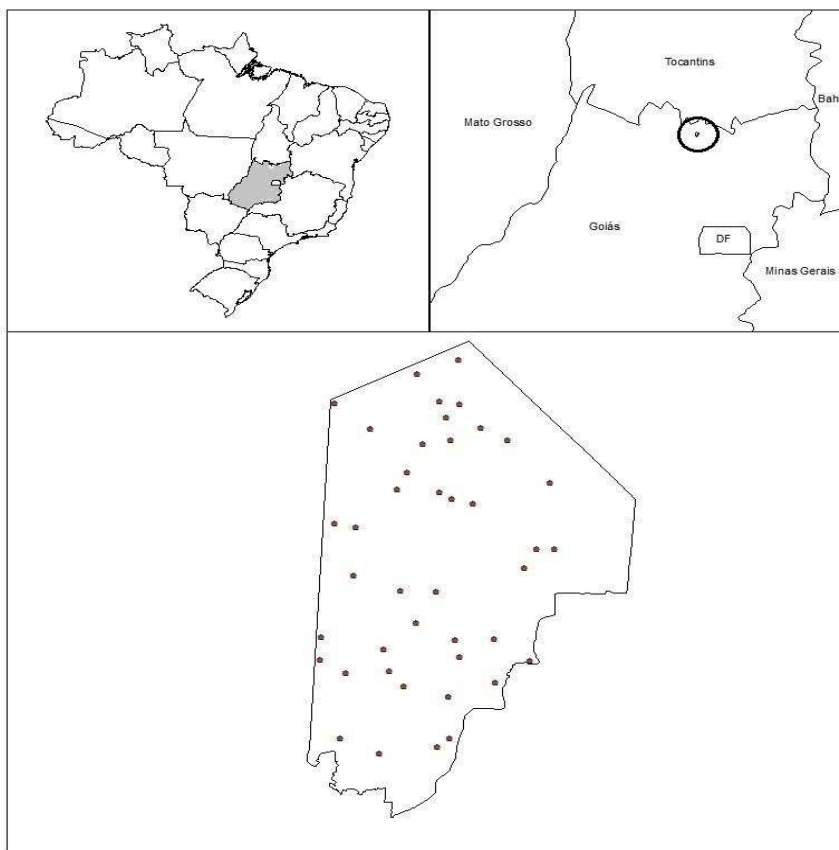


FIGURA 1: Localização da área de estudo e croqui da área experimental com as parcelas amostradas.

FIGURE 1: Location of study area and experimental area with the sampled plots.

Os dados para realização do estudo foram obtidos a partir de amostragem estratificada casual, sendo alocadas 42 parcelas de 400 m² (20 x 20m). Cada parcela foi georreferenciada em um ponto superior esquerdo. Todos os indivíduos de espécies

arbóreas e arbustivas, dentro dos limites de cada parcela, com circunferência à altura do peito (CAP) ou o quadrado da soma das ramificações do indivíduo com circunferência à altura do peito (CAP) igual ou superior a 15,7 cm tiveram suas circunferências medidas com fita métrica e alturas estimadas.

A primeira etapa da análise dos dados consistiu na análise exploratória dos mesmos, realizada com o objetivo de observar o comportamento geral dos dados (forma, distribuição, tendência central), considerando as variáveis diâmetro à altura do peito (DAP), altura média, densidade de indivíduos e área basal. A variável DAP média foi considerada como a média dos DAP's dos indivíduos medidos em cada parcela, assim como a altura média. A densidade representa o número de indivíduos observados na parcela, extrapolados para hectare. A área basal é a soma da área basal de cada indivíduo na parcela, extrapolada para um hectare.

Estudo variográfico

Efetou-se o estudo variográfico, a fim de se verificar a estrutura de continuidade espacial. As características dendrométricas DAP médio, altura média, densidade de indivíduos e área basal foram consideradas variáveis Z , que podem variar continuamente num espaço geográfico, em função das coordenadas das parcelas. Cada valor observado $z(x_i)$ nos locais x_i ($i = 1, 2, \dots, n$), em que x_i denota a coordenada geográfica em duas dimensões, é considerado uma realização da variável aleatória $Z(x)$. O conjunto das variáveis aleatórias $Z(x_1), \dots, Z(x_n)$ constitui um processo estocástico e o estudo da correlação entre essas variáveis é dado pelo semivariograma. Esse instrumento avalia a variância entre pares de pontos separados por uma distância h . A equação geral para o semivariograma $\hat{\gamma}(h)$, para qualquer fenômeno, é dada por

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$$

em que $N(h)$ é o número de pares de valores medidos $z(x_i)$, $z(x_i + h)$, separados por um vetor h .

Na ausência de correlação entre observações de diferentes pontos, a variância da variável não é afetada pela distância que separa os pontos observados, o que caracteriza uma situação na qual os dados são independentes. Por meio desse semivariograma é possível ajustar uma função matemática que expressa a estrutura de dependência espacial das características avaliadas. Com os dados obtidos em campo foi ajustado e selecionado o melhor modelo de função de semivariância para cada variável, por meio do Método da Máxima Verossimilhança. O semivariograma experimental e o ajuste dos modelos foram efetuados no sistema R, utilizando o pacote geoR (RIBEIRO JR. e DIGLLE, 2001).

Predição espacial

Existem várias técnicas de interpolação comumente usadas, como média simples, distância inversa, krigagem entre outras. A técnica da krigagem é um método de interpolação sofisticado, cujos pesos são diretamente correlacionados à estrutura de correlação espacial detectada no semivariograma.

Os mapas de krigagem para cada variável resposta são apresentados a fim de ilustrar as diferentes características espaciais existentes na área. Esses mapas são úteis

na identificação de regiões mais ou menos semelhantes e como uma ferramenta para elaboração de planos amostrais, ou seja, na definição de critérios de intensidade amostral considerando a dependência espacial das variáveis.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise exploratória dos dados

Foram utilizadas 42 amostras aleatórias de mesmo tamanho. Os gráficos “Box plot” (Figura 1) das características dendrométricas avaliadas mostraram assimetria na distribuição dos dados e presença de valores atípicos (ou “outliers”) para algumas variáveis, fato este que pode ser uma característica de florestas tropicais. Segundo Mello (2004) estes valores influenciam negativamente o semivariograma experimental no sentido de produzir estimativas irreais.

Segundo Cressie (1993), um fundamento comum da modelagem estocástica é que os dados tenham distribuição Gaussiana, sob a qual toda inferência geoestatística linear tem-se desenvolvido e, se houver normalidade, as inferências realizadas ganharão outras propriedades estatísticas ótimas, tal como a Máxima Verossimilhança. Os resultados do teste Shapiro-Wilk para as características avaliadas foram significativos para as variáveis DAP médio ($W=0,8197$), altura média ($W=0,9485$) e área basal ($W=0,9104$). A variável densidade não apresentou desvios de normalidade ($W=0,9897^{ns}$) nem observações discrepantes. Para a aplicação dos métodos apresentados, optou-se por transformações Box-cox nos dados originais. Essas transformações corrigiram o problema de presença de “outliers” e de ausência de normalidade para as variáveis DAP, altura média e área basal.

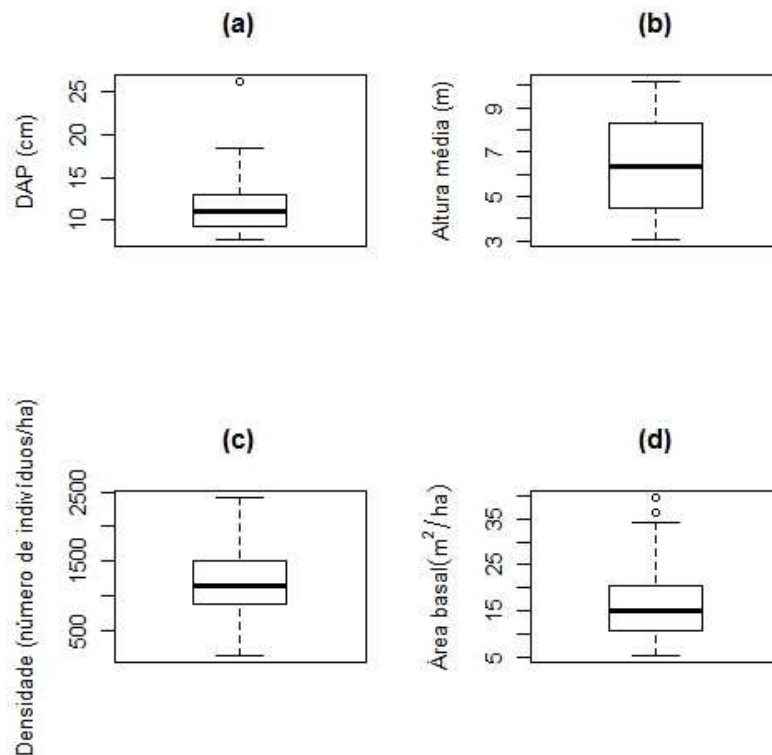


FIGURA 2: Box-plot das variáveis DAP médio (a), altura média (b), densidade (c) e área basal (d) antes da transformação logarítmica Box-Cox.

FIGURE 2: Box-plot of the variables DBH (a), height (b), density (c) and basal area (d) before logarithmic transformation Box-Cox.

Análise da estrutura de correlação espacial

Segundo Felfili (2004), em estudo de características dendrométricas em área de cerrado, a produção em área basal varia de 7 a 12 $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ e a densidade varia de 600 a 1600 ind. ha^{-1} . Segundo Werneck (2000), em estudo de uma floresta decidual em Uberlândia, a área basal apresentou um valor de 24,14 $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$. Andrade e Rodal (2004) verificou área basal de 23,9 $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ em floresta estacional semidecidual em áreas florestais de terras baixas no nordeste do Brasil. A produção em área basal no presente estudo variou de 5,32 a 36,39 $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$, enquanto a densidade variou de 125 a 2425 ind. ha^{-1} . Sem fazer um estudo de classificação das fisionomias existentes na área, verificamos que existe uma alta variabilidade na estrutura do componente arbóreo ao longo da área.

A análise variográfica mostrou que todas as quatro variáveis dendrométricas apresentaram semivariância de caráter modelável, ou seja, a variabilidade da estrutura das formações florestais apresentou-se estruturada espacialmente (Figura 3). Verificasse, por meio dos semivariogramas, que o DAP médio e altura média apresentaram estrutura de dependência semelhante, enquanto as variáveis densidade e área basal apresentaram comportamentos próprios. No estudo de Mello (2005) foram observados altos valores de efeito pepita para as características dendrométricas, concordando com a teoria de Aubry e Debouzie (2001), que concluíram que o efeito pepita é alto em estudos que envolvem variáveis ecológicas. Foi observado, no presente estudo, valores de efeito pepita igual a zero para o DAP médio e área basal e baixo valor para a altura média. Os valores próximos ou iguais a zero indicam variância total explicada pela componente espacial.

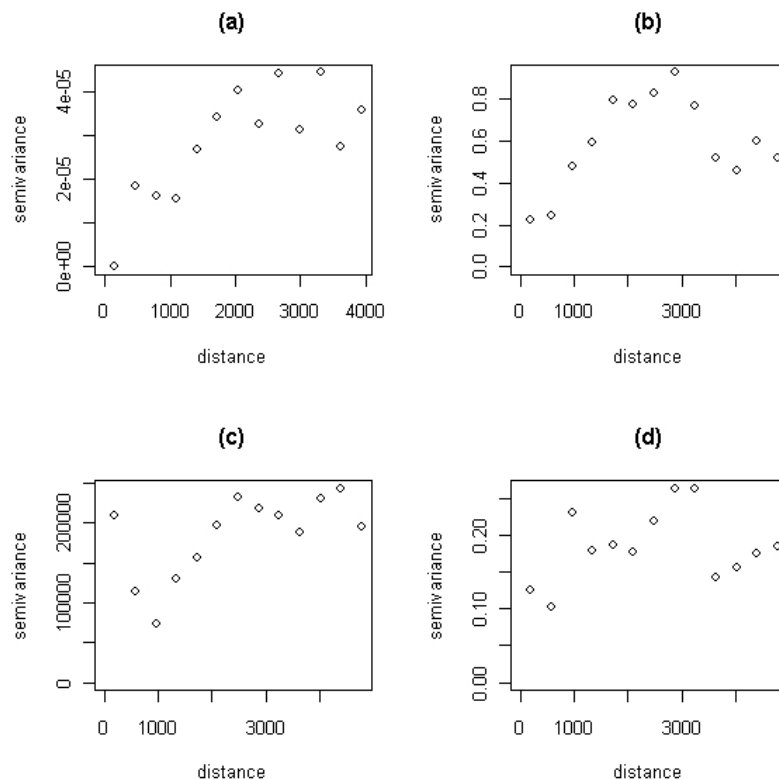


FIGURA 3: Semivariogramas ajustados para as variáveis DAP médio (a), altura média (b), densidade (c) e área basal (d) após transformação Box-Cox dos dados.

FIGURE 3: Semivariograms adjusted for the variables DBH (a), height (b), density (c) and basal area (d) after Box-Cox transformation.

Utilizou-se a relação entre a variável estruturada e o patamar para verificar o grau de dependência espacial, conforme Biondi *et al.* (1994), que estudou o comportamento espacial do diâmetro à altura do peito e da área basal em floresta natural de *Pinus ponderosa*. De acordo com Cambardella *et al.* (1994), quando essa relação for maior ou igual a 75% há uma forte dependência espacial. Mello *et al.* (2005) avaliou o comportamento espacial por meio da relação entre a variável estruturada e o patamar para avaliar a estrutura de dependência espacial do volume total, diâmetro médio quadrático, altura média das árvores dominantes e área basal em floresta de *Eucalyptus grandis*. Em seu estudo, foi observada uma relação maior que 75% para o volume e altura dominante, mostrando que estimativas dessas variáveis com o modelo proposto, considerando a componente espacial, trará otimização nas estimativas. De acordo com a Tabela 1, as variáveis DAP médio, altura média e área basal apresentaram forte grau de dependência espacial, mostrando que as estimativas de tais variáveis na área devem considerar a estrutura de dependência espacial. O alcance (Φ) corresponde ao raio das áreas consideradas homogêneas para cada característica e valores próximos a zero denotam baixa dependência espacial. Verificamos altos valores de alcance para todas as variáveis, principalmente DAP médio, com 2500 metros, altura média, com alcance igual a 2500 metros e densidade de indivíduos, que também apresentou alcance igual a 2500 metros. O alcance observado para a área basal foi de, aproximadamente, 360 metros. Isso significa que, para serem consideradas independentes, as parcelas devem ser lançadas com um espaçamento mínimo de 360 metros, considerando a característica área basal. Denota-se a importância de se conhecer os valores dos parâmetros gerados pelo modelo de máxima verossimilhança para conhecer a estrutura de dependência espacial em áreas de cerrado, levando em consideração a estrutura de dependência espacial em futuras amostragens em área similares, visando à predição das variáveis dendrométricas estudadas.

TABELA 1: Estimativa dos parâmetros β , efeito pepita (τ^2), variação estruturada (σ^2), alcance (Φ), patamar ($\tau^2 + \sigma^2$) e da relação variação estruturada - patamar (DE %) para as variáveis dendrométricas DAP médio (DAP), altura média (H), densidade de indivíduos e área basal.

TABLE 1: Parameters estimates β , nugget effect (τ^2), structured variation (σ^2), range (Φ), sill ($\tau^2 + \sigma^2$) and relationship between structured variation - sill (DE%) of the dendrometric variables DBH (DBH), height (H), density and basal area.

Variável	β	τ^2	σ^2	Φ	$\tau^2 + \sigma^2$	DE %
DAP	0,64	0,00	0,01	2500,00	0,01	100
H	2,51	0,06	1,03	2000,00	1,09	94,5
Densidade	1302,00	120848,00	111299,00	2500,00	232147,00	47,94
Área basal	2,65	0,00	0,18	361,84	0,18	100

Na área experimental, foram observadas formações com diferentes características estruturais ao longo do espaço e, por meio de técnicas geoestatísticas, verificamos um forte padrão espacial das características dendrométricas estudadas. Em áreas de cerrado com características fisionômicas semelhantes, sugere-se lançar parcelas próximas e distantes entre si, para obter uma boa estimativa do efeito pepita,

proporcionando uma estimativa ótima do semivariograma. Por meio da técnica de krigagem, observamos na Figura 4 os mapas de predição das variáveis dendrométricas na área de estudo. Os mapas foram gerados a partir dos modelos obtidos pelo método da máxima verossimilhança.

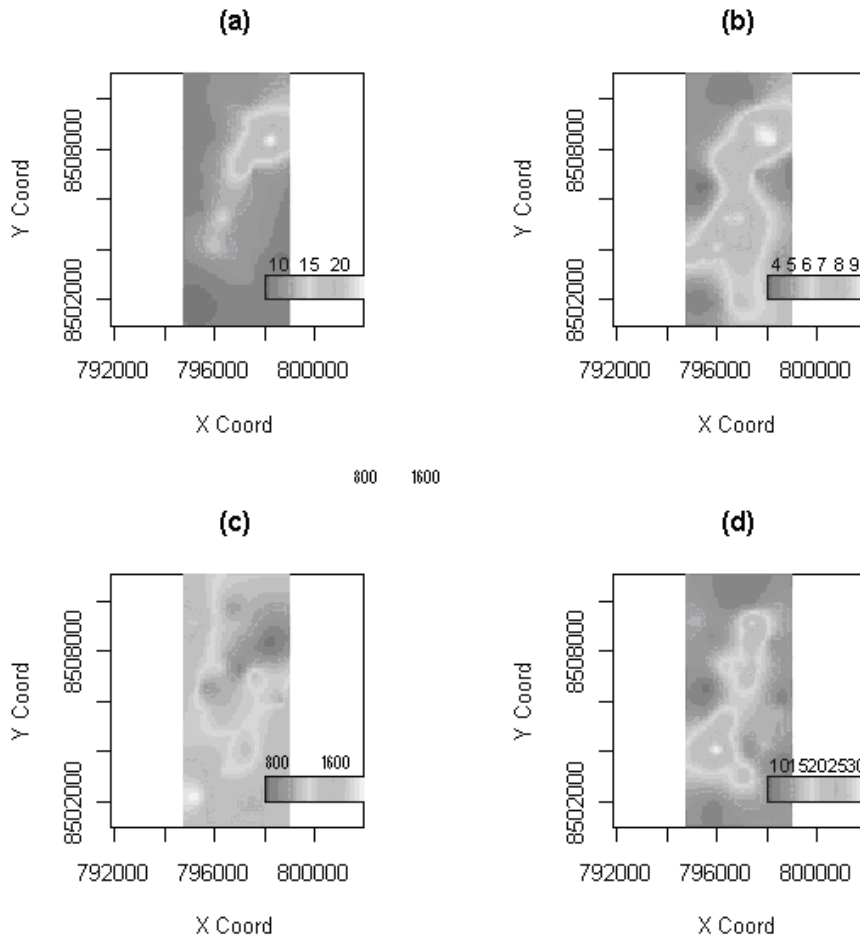


FIGURA 4: Mapas de Krigagem das variáveis DAP médio (a), altura média (b), densidade (c) e área basal (d).

FIGURE 4: Kriging maps of the variables DBH (a), height (b), density (c) and basal area (d).

CONCLUSÃO

As características dendrométricas avaliadas no presente estudo apresentaram-se estruturadas espacialmente. Dessa forma, é necessário considerar, em áreas similares a do presente estudo, a estrutura de dependência espacial para prever as variáveis. Verifica-se que não se devem tratar as amostras como independentes, pois as características dendrométricas apresentam altos valores de alcance. Torna-se importante, portanto, gerar amostras que apresentam espaçamentos tanto menores quanto maiores para uma estimativa ótima dos parâmetros do modelo geoestatístico, possibilitando gerar modelos que considerem a estrutura espacial.

Agradecimentos – À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa de mestrado concedida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, K. V. S. A.; RODAL, M. J. N. Fisionomia e estrutura de um remanescente de floresta estacional semidecidual de terras baixas no nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Botânica*, vol. 27, n. 3, p. 463-474, 2004.

AUBRY, P.; DEBOUZIE, D. Estimation of the mean from a two-dimensional sample: the geostatistical model-based approach. *Ecology*, Durham, v. 82, n. 5, p. 1484-1494, 2001.

BIONDI, F.; MYERS, D. E.; AVERY, C. C. Geostatistically modeling stem size and increment in an old-growth forest. *Canadian Journal of Forest Research-Revue (Canadienne de Recherche Forestiere)*, v. 24, n. 7, p. 1354-1368, 1994.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society American Journal*, Madison, v. 58, p. 1501-1511, 1994.

CRESSIE, N. *Statistics for spatial data*. New York: Wiley, 1993. 900p.

DIGGLE, P. J.; RIBEIRO JR, P. J. *Model-based geostatistics*. New York: Springer, 2007. 228p.

FELFILI, J. M.; RIBEIRO, J. F.; BORGES FILHO, H. C.; VALE, A. T. Potencial econômico da biodiversidade do cerrado: estágio atual e possibilidades de manejo sustentável dos recursos da flora. In: AGUIAR, L. M. S; CAMARGO, A. J. A. (Org.). *Cerrado: ecologia e caracterização*. 1 ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, V. 1, p. 177-220, 2004.

GOODLAND, R.; FERRI, M. G. *Ecologia do Cerrado*. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1979.

GOODLAND, R.; POLLARD, R. The Brazilian Cerrado vegetation: a fertility gradient. *Journal of Ecology*, v. 61, p. 219-224, 1973.

OLIVEIRA-FILHO, A.T.; RATTER, J.A. Vegetation physiognomies and woody flora of the cerrado biome, OLIVEIRA, P.S.; MARQUIS, R.J., Editors, *The Cerrados of Brazil: Ecology and Natural History of Neotropical Savannas*. New York: Columbia University, p. 13-32, 2002.

HOAGLIN, D. C. Letras-resumo: um conjunto de estatísticas ordinais selecionadas. In: HOAGLIN, D. C.; MOSTELLER, F.; TUKEY, J.W. (Ed.). *Análise exploratória de dados. Técnicas robustas: um guia*. Lisboa: Edições Salamandra, cap. 2, p.32-58, 1992.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Mapa da vegetação Brasileira*. 1990.

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

MELLO, J.M. Geostatistics applied to forest inventory, em Piracicaba, São Paulo. 2004. 111p. Tese de Doutorado - Escola Superior Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

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

OLIVEIRA, M. C. N. Métodos de estimação de parâmetros em modelos geoestatísticos com diferentes estruturas de covariância: uma aplicação ao teor de cálcio no solo. 2003, 140p. Tese (Doutorado), área de concentração: Estatística e Experimentação Agronômica - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

PLONER, A.; DUTTER, R. New directions in geostatistics. Journal of Statistical Planning and Inference, Amsterdam, v. 91, p. 499-509, 2000.

R Development Core Team. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>. 2011.

RIBEIRO JÚNIOR, P. J.; DIGGLE, P. J. geoR: a package for geostatistical analysis. R-NEWS, v.1, n.2, p.15-18, 2001.

RIBEIRO R, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P., ed. Cerrado: ambiente e flora. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1998.

WERNECK, M. S.; FRANCERCHINELLI, E. V.; TAMEIRÃO-NETO, E. Mudanças na florística de uma floresta decídua durante um período de quatro anos (1994-1998), na região do Triângulo Mineiro, MG. Revista Brasileira de Botânica, São Paul