

Geoestatística integrada com estatística multivariada e geoprocessamento na definição de unidades de manejo para o *Pinus taeda***

Itamar Antonio Bognola^{1*}, Christel Lingnau^{2*}, Osmir José Lavoranti^{1*}, Lorena Stolle^{3*}, Antonio Rioyei Higa^{2*}, Edilson Batista de Oliveira^{1*}

¹ Pesquisador A, Embrapa Florestas, Estrada da Ribeira, Km 111, CP 319, CEP 83411-000, Colombo, PR, Brasil

² Professor Universidade Federal do Paraná – UFPR, CEP 80210-170, Curitiba, PR, Brasil

³ Mestre em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, PR, Brasil

*e-mail: iabog@cnpf.embrapa.br; osmir@cnpf.embrapa.br; edilson@cnpf.embrapa.br; lingnau@ufpr.br; higa@ufpr.br; lorenastolle@yahoo.com.br

**Parte da tese de doutorado do primeiro autor

Resumo: O objetivo deste estudo foi o de avaliar a variabilidade espacial de *Pinus taeda* Linnaeus em função de propriedades do solo obtidas a partir de um mapeamento detalhado, na escala 1:10.000, em uma área da empresa Battistella Florestal, localizada no município de Rio Negrinho, Estado de Santa Catarina. Os princípios do manejo em silvicultura de precisão devem ser adaptados à variabilidade de campo. Isso requer técnicas eficientes para estimar e mapear a variabilidade espacial e/ou temporária de atributos do solo para a definição de “unidades de manejo”. No entanto, as determinações de algumas variáveis que caracterizam as propriedades de um determinado solo são muitas vezes onerosas. Nestas situações é interessante estimar tais variáveis em função de outras que apresentam boa correlação espacial e mais fácil determinação. Isto é possível por um semivariograma cruzado. O interpolador que utiliza o semivariograma cruzado em modelagem é chamado co-krigagem. O objetivo deste estudo foi testar o método de co-krigagem para estimar as “unidades de manejo” relacionadas com as propriedades do solo por meio de técnicas de estatística multivariada e geoestatística. Os resultados mostraram que estas “unidades de manejo” podem ser estimadas com alta precisão através da co-krigagem. Ele também evidencia a importância de se aliar técnicas de estatísticas multivariadas com geoestatística e geoprocessamento na definição de “Unidades de Manejo” para o pinus.

Palavras-chave: geoestatística, geoprocessamento, variabilidade espacial, silvicultura de precisão.

Geostatistics integrated with multivariate statistical and GIS in the definition of management units for Pinus taeda

Abstract: The objective of this study was to assess spatial variability of Loblolly Pine Linnaeus in properties function of the soil obtained from a detailed mapping, in the scale 1:10.000, in an area of the Forest Company – Battistella, located in the Rio Negrinho municipal district, state of Santa Catarina. In precision silviculture management principles must be adapted to the field variability. This requires efficient techniques to estimate and map the spatial and/or temporary variability of attributes of the soil for “management unit’s” definition. However, the determination of some variables that characterize the properties of a particular soil is often onerous. In these situations it is interesting to estimate such variables as a function of others that present good space correlation with the former and are of simple determination. This is possible by a cross-semivariogram. The interpolator that uses the cross-semivariogram in modeling is called co-kriging. The aim of this study was to test the co-kriging method for estimating “management unit’s” related to soil properties by means of statistical techniques multivariate and by geostatistical. Results showed these “management unit’s” can be estimated with high precision by co-kriging. It also got evident the importance of if ally technical multivariate with geostatistical and geoprocessing in the definition of the “Management Unit’s” for loblolly pine.

Keywords: geoprocessing, geostatistical, precision silviculture, space variability.



1. Introdução

A complexidade inerente aos fatores ecológicos, o elevado número de dados e seus inter-relacionamentos, a complexidade de sítios e de fatores ambientais, dentre outras características inerentes às espécies florestais, têm impedido o sucesso de aplicação dos procedimentos de sumarização e classificação de dados (JOHNSON; WICHERN, 1998). Justifica-se assim, o uso de técnicas estatísticas multivariadas, quando os objetivos da investigação científica se ajustam a: redução ou simplificação estrutural dos dados; agrupamento e classificação de objetos; investigação da dependência entre variáveis; predição; e, construção de testes de hipóteses. A estatística multivariada consiste em um conjunto de métodos utilizados em situações nas quais inúmeras variáveis são medidas simultaneamente em cada elemento amostral. Em geral, as variáveis são correlacionadas entre si e quanto maior o número de variáveis mais complexo torna-se a análise por métodos comuns de estatística univariada.

Estas técnicas multivariadas permitem ainda que se faça uma redução na dimensão de análises com múltiplas respostas com o objetivo de simplificar o seu entendimento, a sua visualização e interpretação, e ainda obter suficientes detalhes para uma adequada representação destes resultados. Ela engloba métodos estatísticos para descrever e analisar dados que incluem medidas simultâneas de muitas variáveis correlacionadas, que se supõe, explicam a complexidade de um sistema biológico (MINGOTI, 2005).

Por outro lado, a modelagem geoespacial permite a descrição quantitativa da variabilidade espacial dos atributos do solo e a estimativa não tendenciosa da variância mínima de valores desses atributos em locais não amostrados. Acessar essa variabilidade faz da geoestatística uma eficiente ferramenta de suporte a decisão no manejo de solo das espécies florestais. Os métodos geoestatísticos de interpolação, em especial o da co-krigagem, apresentam propriedades ótimas de estimativas em dados esparsos. Para a aplicação das técnicas de geoestatística, necessita-se, primeiramente, detalhar a área onde será implantado o estudo. Esse processo é viabilizado pela implantação de um

sistema de coordenadas locais ou geográficas, onde cada atributo ou característica do solo terá suas informações quantitativas e/ou qualitativas (relevo, granulometria, textura, teor de argila, acidez, matéria orgânica etc.) associados a um ponto no espaço. Essas informações podem ser obtidas por meio de coleta in loco, mapas temáticos, imagens de satélite ou fotografias aéreas. Para referenciar essas informações utiliza-se o GPS (Sistema de Posicionamento Global), ou de forma mais simplificada através da topografia convencional, obtendo coordenadas locais.

Em etapa posterior, utilizam-se os SIG's (Sistemas de Informações Geográficas) para processar e fornecer as informações da variabilidade espacial dos atributos do solo e do meio físico (variáveis independentes – X) e suas inter-relações com os aspectos de produtividade (variáveis dependentes – Y) da espécie florestal de interesse. Os SIG's realizam funções de análises espaciais baseados nos atributos das entidades gráficas armazenadas na base de dados e a partir de módulos específicos, geram um conjunto de dados estimados (semivariograma), utilizando-se dos pontos ($X_i, Y_i, Z_i, i = 1, 2, 3, \dots, n$) amostrados nos pontos de coleta da informação, em que as variáveis X e Y representaram a posição desses pontos (coordenadas geográficas ou locais) e a variável Z, os atributos do solo, estimando o valor dos parâmetros nos locais não amostrados (VIEIRA et al., 2002).

Dentro deste contexto, conforme Bognola (2007), o objetivo desse estudo foi o de avaliar a variabilidade espacial do rendimento produtivo de *Pinus taeda* L. em função de propriedades do solo por meio de geoprocessamento integrado com estatística multivariada e com geoestatística, através da técnica de co-krigagem.

2. Material e métodos

Foram coletados dados em parcelas de inventário florestal contínuo (PIFC's), com área de 500 m² e espaçamento entre árvores de 2,80 × 2,80 m. As medidas de crescimento de *P. taeda* constam de cinco idades diferentes (11 a 15 anos), obtidas junto ao Setor de Inventário da Battistella

Florestal, em função de variáveis do tipo de solo e de sua caracterização física, físico-hídrica e química, através de coletas deformadas e não deformadas de amostras nas profundidades de 0-20 e 30-50 cm para todas as parcelas de inventário estudadas; além da caracterização do espaço físico quanto aos aspectos de relevo, geologia e fisiografia. As variáveis foram estabelecidas a partir do levantamento de solos detalhados de uma área-piloto, além das avaliações químicas, físicas, físico-hídricas e morfológicas de perfis de solos, utilizando-se duas profundidades de coletas comuns (0-20 e 30-50 cm). A variável utilizada para caracterizar a qualidade do sítio de cada povoamento foi o Índice de Sítio (IS) dado pela altura dominante (HDOM) aos 15 anos de idade. Como as idades de medições dos povoamentos variaram de 11 a 15 anos, todas as alturas dominantes foram projetadas para 15 anos de idade através da Equação 1, disponível no software “Sispinus” (OLIVEIRA, 1995), dada por:

$$IS = HDOM \times e^{4,6433 \{[(1/I)^{0,56}] - 0,2195\}} \quad (1)$$

As análises estatísticas foram realizadas através do software do sistema estatístico SAS® Statistical Analysis System, licenciado para a Embrapa Florestas.

3. Resultados e discussão

As unidades de manejo para *P. taeda* (UM's) foram delimitadas através da integração de técnicas de sistemas de informações geográficas (SIG/ ArcGis) e de geoestatísticas aplicadas no estudo da relação entre potencial produtivo (baseado no Índice de Sítio para idade de 15 anos – IS_15) e atributos do meio físico (solo, relevo, geologia etc.) na área-piloto de estudo, com suas respectivas parcelas de inventário florestal contínuo.

Assim, procurou-se fazer uma análise de componentes principais para o grupo de variáveis

explicativas, a fim de se obter três grupos de componentes principais (CP₁, CP₂ e CP₃) para a estimativa da variável principal IS_15. Somente os cinco primeiros componentes apresentaram autovalores superiores a 1 e, ao mesmo tempo, ajudaram a explicar 90% da variância total. No entanto, pela limitação do uso de apenas três variáveis ou grupo de componentes principais do software ArcGis 9.1, para o método da Co-krigagem multivariada, tem-se 72% de percentual da variância total acumulada associada até o terceiro componente principal (CP₁ a CP₃), o que mostra uma tendência de estimativa promissora, via Co-krigagem multivariada, do IS_15 nos locais não amostrados.

Desta forma, procurou-se avaliar, via análise variográfica, se todos os três componentes principais escolhidos pela técnica ACP, apresentavam-se estruturados espacialmente, ou seja, se existia uma função estrutural, com semivariância de comportamento modelável. Assim, foi aplicado o método da Co-krigagem Ordinária Multivariada, pelo software ArcGis 9.1 – módulo geoestatística, tendo como variável principal o IS_15 e como variáveis secundárias, os três componentes principais (CP₁ à CP₃). Para o método aplicado, o modelo exponencial foi o que melhor se ajustou ao semivariograma experimental. Os ajustes dos parâmetros estão apresentados na Tabela 1.

Na Tabela 1, verificou-se que o Índice de Sítio (IS_15) em função dos componentes principais “CP1”, “CP2” e “CP3”, apresentou uma forte dependência espacial (DE%), com percentual da ordem de 80%. Na classificação de Cambardella et al. (1994), que trabalharam com atributos do solo, quando a relação for maior ou igual a 75%, diz-se que há uma forte dependência espacial. Isto mostra que houve uma ótima estimativa, nos locais não amostrados, do IS_15 com o modelo exponencial. Para verificar o grau

Tabela 1. Parâmetros de ajuste do semivariograma para o modelo exponencial ajustado à estrutura de correlação espacial da variável “IS_15” em função de três componentes principais.

Variável	C0*	C1**	C0+C1***	a****	DE%	Modelo de ajuste
IS_15 = f (CP ₁ +CP ₂ + CP ₃)	0,5519	2,168	2,72	7.112	79,7	Exponencial

*C0 = efeito pepita; **C1 = variância estrutural; ***patamar (C0 + C1); ****a = alcance, DE% = C1/(C0 + C1).

de dependência espacial, entre as características, utilizou-se da relação entre a variação estruturada e o patamar (DE%).

O fato do IS₁₅ ter apresentado forte correlação espacial é um ótimo indicativo do potencial da técnica de Co-krigagem Ordinária Multivariada na definição das unidades de manejo para *P. taeda* (UM's). O raio de alcance por volta de 3.600 m, apresentado nesta Tabela 1 (a qual mostra o diâmetro em torno de 7.112 m) é chamado de alcance teórico, uma vez que este parâmetro no modelo exponencial é considerado infinito (JOURNAL; HUIJBREGTS, 1978). Este valor de "alcance" corresponde ao diâmetro das áreas consideradas homogêneas para cada característica (definida pelas componentes principais). Desta forma, com os resultados alcançados do modelo exponencial, foi possível obter uma malha de pontos interpolados que permitiu visualizar o comportamento do IS₁₅, estimado via

componentes principais, por meio de isolinhas ou contorno e ou superfícies contínuas, recursos importantes para se definir a espacialização de quatro Unidades de Manejo Operacionais (UMO's) diferenciadas para o *P. taeda* (Figura 1), permitindo verificar o grau da relação entre os dados dos IS₁₅ - determinada via equação do SISPINUS (OLIVEIRA, 1995) -, com o mapa das UMO's para o *P. taeda* obtido através do modelo exponencial geoestatístico. Ainda, as análises dos resíduos revelaram distribuição normal homocedástica pelo teste de *Shapiro-Wilk* ($w = 0,953$; $p_valor = 0,480$), indicando um excelente.

Ajuste do modelo, com erro quadrático médio de 0,40. Seguramente, este conjunto de componentes principais que ajudam a explicar 72,2% da variância total na área do presente estudo, proporciona ótima estimativa do Índice de Sítio nos locais não amostrados da presente área de estudo.

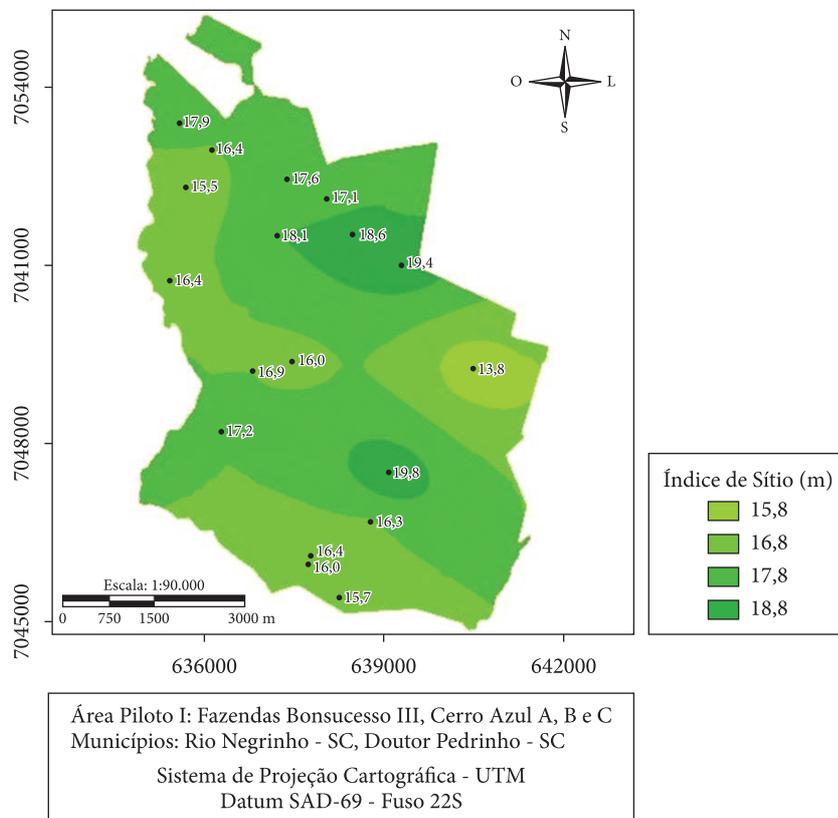


Figura 1. Mapa com distribuição espacial do "Índice de Sítio Médio - IS₁₅" obtido pela equação do programa "SISPINUS" com o "IS₁₅" predito por co-krigagem multivariada ordinária, utilizando-se de variáveis do meio físico selecionadas por análise de componentes principais e de fatores, na área-piloto, em Rio Negrinho, SC.

4. Conclusões

A integração de geoprocessamento com técnicas geoestatísticas, através da Co-krigagem Ordinária Multivariada, permite definir com boa precisão Unidades de Manejo Operacionais para o *P. taeda*. A espacialização de valores preditos dos índices de sítio para o *P. taeda*, através da relação deste índice com os três primeiros componentes principais, pelo método da Co-krigagem Multivariada - via modelo exponencial -, resulta em estimativas médias adequadas com explicação de 72,2% da variância total.

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa Battistella Florestal pelo grande apoio financeiro e logístico para que este trabalho pudesse ser desenvolvido.

Referências

BOGNOLA, I. A. **Unidades de manejo para Pinus taeda L. no planalto norte catarinense, com base em características do meio físico**. 2007. 160 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

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**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. 4. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 816 p.

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

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005. 297 p.

OLIVEIRA, E. B. **Um sistema computadorizado para prognose do crescimento e produção do P. taeda L., como critérios quantitativos para avaliação técnica e econômica de regimes de manejo**. 1995. 134 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995.

VIEIRA, S. R.; MILLETE, J.; TOPP, G. C.; REYNOLDS, W. D. Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and meteorological parameters. In: ALVAREZ V. H. **Tópicos em Ciência do Solo II**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v. 2, p. 1-45.