

GEOESTATÍSTICA APLICADA AO ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO SOLO EM ÁREAS DE FLORESTA ESTACIONAL DECIDUAL¹**GEOSTATISTICS APPLIED TO THE STUDY OF SOIL PHYSIOCHEMICAL CHARACTERISTICS IN SEASONAL DECIDUOUS FOREST AREAS**

Julio Cesar Wojciechowski² Mauro Valdir Schumacher³ Carlos A. da Fonseca Pires⁴
Pedro Roberto de A. Madruga⁵ Ricardo de V. Kilca⁶ Eleandro J. Brun⁷
Carlos R. S. da Silva⁸ Sandro Vaccaro⁹ Rubens M. Rondon Neto¹⁰

RESUMO

Utilizaram-se métodos da geoestatística na identificação do tamanho e da estrutura da variabilidade espacial de alguns atributos físico-químicos do solo em áreas de Floresta Estacional Decidual as quais foram denominadas floresta madura, floresta secundária e capoeirão. As áreas, localizadas no município de Santa Tereza, RS, foram amostradas durante o período de 2002 a 2003, compreendendo as classes de solo: Chernossolo Argilúvico, Cambissolo Ta e Neossolo Litólico. Realizou-se amostragem sistemática com *grid* de espaçamento regular entre os pontos variando de 30 m para o capoeirão e 40 m para floresta madura e secundária, totalizando oitenta pontos amostrais em uma área total de 7,34 ha. Foram coletadas amostras de solo “*in situ*” para análise em laboratório dos atributos densidade do solo, argila, pH, potássio, matéria orgânica e fósforo. A estrutura da variabilidade espacial foi identificada por meio dos semivariogramas, definindo-se os parâmetros necessários para a krigagem. O atributo mais variável foi a matéria orgânica, não obtendo ajuste a nenhum modelo teórico de semivariograma, enquanto que o pH foi o menor. Na análise de estrutura da variabilidade espacial por meio da geoestatística, a argila e densidade, ambas em área de floresta secundária, e o pH nas áreas experimentais apresentaram a maior dependência espacial. O modelo gaussiano para o atributo argila obteve o maior alcance da dependência espacial, sendo 400 e 388 m, nas áreas de floresta secundária e madura respectivamente. A validação cruzada mostrou acuracidade no ajuste dos modelos variográficos, tendo a variável pH apresentado o melhor desempenho, 0,87; 0,94 e 0,92 nas áreas de floresta madura, secundária e capoeirão respectivamente.

Palavras-chave: geoestatística; variabilidade espacial; solos florestais; floresta estacional.

ABSTRACT

Methods of geostatistics were used in the identification of size and structure of space variability of some physiochemical attributes of soils under seasonal deciduous forest areas, which were called mature forest, secondary forest and “capoeirão”. The areas, located in Santa Tereza, RS, were sampled during the

1. Trabalho realizado com o auxílio financeiro da Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul – FAPERGS.
2. Engenheiro Florestal, M.Sc. Professor do Departamento de Engenharia Florestal, Universidade do Estado do Mato Grosso, Rua Alvarez de Azevedo n. 3, Setor J, CEP: 78580-000, Alta Floresta (MT). cw.julio@gmail.com
3. Engenheiro Florestal, Dr. Professor do Departamento de Ciências Florestais, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP: 97105-900, Santa Maria (RS). schumacher@pesquisador.cnpq.br
4. Geólogo, Dr. Professor do Departamento de Geociências, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP: 97105-900, Santa Maria (RS). calpires@terra.com.br
5. Engenheiro Florestal, Dr. Professor do Departamento de Engenharia Rural, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP 97105-900, Santa Maria (RS).
6. Biólogo, MSc., Instituto de Biologia, Universidade Federal de Uberlândia, Rua Pedro Pereira, 108, CEP: 97050-890, Uberlândia (MG). rkilca@gmail.com.br
7. Engenheiro Florestal, Doutorando pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP: 97105-900, Santa Maria (RS). eleandrobrun@yahoo.com.br
8. Engenheiro Florestal, MSc. pelo Programa de Pós-Graduação em Geomática, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP: 97105-900, Santa Maria (RS).
9. Engenheiro Florestal, Dr., Rua Refatti, 119, Bairro Maria Goretti, CEP: 95700-000, Bento Gonçalves (RS). vacarsan@terra.com.br
10. Engenheiro Florestal, Dr., Rua H15, 1538, Setor Industrial, CEP: 78580-000, Alta Floresta (MT). rubensrondon@yahoo.com.br

Recebido para publicação em 8/03/2007 e aceito em 9/09/2009.

period of 2002 and 2003, comprising the soil classes: Argiluvic Chernosol, Cambisol Ta and Litholic Neosol. Systematic sampling was performed with regular spacing grid of points varying of 30 m for “capoeirão” and 40 m for mature and secondary forest, in an amount of 80 sample points in a total area of 7.34 ha. For each point, measurements “in situ” were made of the soil bulk density, clay content, pH, potassium, organic matter and phosphorus. The structure of space variability was identified through the variograms, being defined the needed parameters for the Kriging. The most variable attribute was the organic matter, being not adjusted to any model of variogram, while the pH was the least. In the analysis of the space variability structure through the geostatistics, the clay and bulk density, both in area of secondary forest, and pH in the experimental areas, had showed the biggest space dependence. The Gauss model for the clay attribute obtained the largest reach (a), being 400 m and 388 m in the areas of secondary and mature forest, respectively. The crossed validation showed accuracy in the variographic models adjustment, being the pH variable the one which presented the optimum performance, 0.87; 0.94 and 0.92 in the areas of mature forest, secondary forest and “capoeirão”, respectively.

Keywords: geostatistics; space variability; forest soils; deciduous forest.

INTRODUÇÃO

A preocupação com técnicas e estimadores mais eficientes, que determinem as características de uma área, ou uma porção da superfície terrestre, são alvos de estudos não só na ciência do solo, mas também em outras áreas do conhecimento desde o início do século vinte. No Brasil, ainda são poucos os trabalhos que abordam o comportamento dos atributos do solo sobre o ponto de vista espacial, sendo ainda mais raro esse estudo, em solos sob florestas naturais regeneradas.

As florestas, como recurso natural, exercem um importante papel na melhoria da qualidade nutricional e características físicas dos atributos de um solo. O estudo desses atributos se torna essencial quando se objetiva, o manejo racional, produtividade sustentável e predição dos ecossistemas florestais, pois ambos, floresta e solo, encontram-se interligados.

Os processos de formação, cobertura, tipos de uso e manejo, influenciam as características e propriedades dos solos nos quais exprimem variabilidades que podem ser dependentes ou não do ponto de vista espacial. Essa variabilidade pode não ser detectada pela estatística clássica ou métodos convencionais de amostragem, por considerar que as variações entre as amostras ocorrem de forma casual, independente e normalmente distribuída (DOURADO NETO, 1989).

Na metodologia tradicional da amostragem de solo, que não contempla o estudo da distribuição espacial das amostras coletadas, é necessário, por vezes, um grande número de amostras para representar a variabilidade de uma determinada área, a fim de se obter um mapa que represente com fidelidade, o comportamento de cada variável no local. Nessa metodologia, o coeficiente de variação (CV) é o parâmetro que resume a variabilidade do atributo em relação à média, que é fixa, além de não distinguir o número de amostras utilizadas, sua forma nem sua posição espacial, que é exatamente o que discute a geoestatística, adotando uma média móvel, que varia de acordo a distribuição da variável no local (GUIMARAES, 1993).

Segundo Isaaks e Srivastava (1989), a teoria fundamental da geoestatística é a esperança de que, na média, as amostras próximas no tempo e espaço sejam mais similares entre si do que as que estiverem distantes. Para Matheron (1965), é uma função que varia de um lugar a outro no espaço com certa aparência de continuidade. São variáveis cujos valores amostrados estão relacionados com a posição espacial que ocupam, assumindo valores diferentes em diferentes lugares de observação, com certa independência de um lugar a outro

A análise estatística clássica e o estudo da variabilidade espacial das variáveis de interesse permitem compreender as leis que “regem” o comportamento dessas variáveis (PIRES, 2002). Contudo diferentemente da estatística clássica, a geoestatística possibilita, separar a variabilidade explicada, pela relação existente entre as amostras, e a variabilidade casual, sua aplicação, pode diminuir o número de amostras necessárias, para descrever as características de um determinado local, reduzindo custos de levantamento, mantendo a precisão das estimativas realizadas (VIEIRA *et al.*, 1983).

A união de técnicas estatísticas e geoestatísticas contribuem para uma silvicultura econômica e ecologicamente sustentável, pois a maioria das propriedades do solo, além de apresentar variabilidade casual (intemperismo, erosão, adição, fatores biológicos e hidrológicos, erros analíticos e de amostragem), possui

também variabilidade espacial (sistemática), que nem sempre são detectados pela amostragem simples em função do uso e manejo do solo e componentes de paisagem, como aspectos geomorfológicos e fatores pedogenéticos.

O variograma ou semivariograma como mais comumente é chamado, é uma ferramenta básica de suporte às técnicas geoestatísticas, pois permite representar, quantitativamente, a variação de um fenômeno regionalizado no espaço (HUIJBREGTS, 1975).

Camargo (1997) considera duas variáveis, X e Y , em que $X = Z(x)$ e $Y = Z(x + h)$, nesse caso, referindo-se ao mesmo atributo (por exemplo, o teor de zinco no solo) medido em duas posições diferentes, em que x denota uma posição em duas dimensões, com componentes (x_i, y_i) , e “ h ” um vetor distância com módulo e direção que separa os pontos. O nível de dependência entre essas duas variáveis regionalizadas, X e Y , é representado pelo semivariograma $\gamma(h)$, o qual é definido como a esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores de pontos no espaço, separados pelo vetor distância h .

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a relação da dependência e variabilidade espacial dos atributos do solos sob áreas de Floresta Estacional Decidual em diferentes sucessões ecológicas, localizadas no município de Santa Tereza, RS.

MATERIAIS E MÉTODOS

Caracterização da Área de Estudo

O experimento foi efetuado no município de Santa Tereza, região nordeste do estado do Rio Grande do Sul, onde foram utilizadas três áreas, subdivididas por critérios de homogeneidade fisionômica e idade conhecida em: floresta madura; floresta secundária e capoeirão.

A floresta madura, com 2.82 ha, está situada nas coordenadas 29°11'00"S e 51°43'40"W, em altitude média de 280 m, em exposição Oeste, com 4° de inclinação média. A floresta Secundária com 2.89 ha possui de 53 a 58 anos e está localizada nas coordenadas 29°09'29"S e 51°41'49"W, em altitude média de 180 m, em exposição Oeste, com 16° de inclinação média. O Capoeirão por sua vez, corresponde a uma área de 1.63 ha, e 38 anos de idade, está localizado nas coordenadas 29°09'28"S e 51°42'05"W, em altitude média de 215 m, em exposição Norte, com 5° de inclinação média.

Segundo a classificação de Köppen (MORENO, 1961), o clima é Cfa, e a vegetação pertence à formação denominada Floresta Estacional Decidual. Efetuou-se a caracterização dos perfis do solo, próximo ao centro de cada área experimental, apresentando a floresta madura um Chernossolo Argilúvico Férrico, a floresta secundária um Cambissolo Ta eutrófico e o capoeirão o Neossolo Litólico eutrófico (STRECK *et al.*, 2002).

Metodologia

Para cada área do experimento, realizou-se um levantamento, por amostragem sistemática, em um *grid* de espaçamento regular com 32 pontos para floresta madura e 28 pontos para a floresta secundária, ambas de 40 m, enquanto que o capoeirão obteve vinte pontos espaçados de 30 m.

Os pontos foram marcados utilizando-se equipamentos de topografia e, por consequência, foram localizados anotando-se os valores das coordenadas planas, em metros, no sistema UTM, seguindo procedimentos semelhantes realizados por Mello e Scolforo (2000) e Oliveira (1991).

Os atributos do solo avaliados foram: densidade (g cm^{-3}); argila (%); pH (H_2O); potássio (mg kg^{-1}); matéria orgânica (%) e fósforo (mg kg^{-1}). As análises de laboratório, bem como os procedimentos para a coleta das amostras foram realizadas de acordo com recomendações de Tedesco *et al.* (1995) e EMBRAPA (1997).

A análise da dependência espacial foi feita por meio da geoestatística, utilizando-se o semivariograma, com base nas pressuposições da hipótese intrínseca, que diz que a relação de dependência espacial é a mesma em qualquer posição de “ h ” dentro de um determinado alcance da continuidade espacial, o qual pode ser estimado por:

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

Em que: $\gamma(h)$ é a semivariância; $z(x_i)$ e $z(x_i + h)$ são os pares de valores medidos separados por um

vetor “h”, $N(h)$ é o número de pares de valores $[z(x_i) - z(x_{i+h})]$ separados por um vetor distância “h”, informando quão diferentes se tornam os valores em função da distância e “z” é a variável em estudo.

Para cada variável e em cada subsere, foram realizados os cálculos das semivariâncias $\gamma(h)$, nas direções 0° , 45° , 90° e 135° , sendo representado o modelo de maior alcance.

Após o ajuste de um modelo matemático realizado visualmente (á “sentimento”), aos valores calculados de $\gamma(h)$, foram obtidos os coeficientes, efeito pepita “Co”, o patamar “Co + C₁”, e o alcance de dependência espacial, “a” para os modelos teóricos de semivariogramas selecionados (COUTO *et al.*, 2000).

Como critério de seleção do modelo, utilizou-se a técnica de validação-cruzada “cross-validation”, que fornece o coeficiente de determinação do modelo de regressão (R^2), como resultado, ajustando uma reta que passa entre as observações reais e estimadas. Os valores de R^2 variam de 0 a 1, quanto mais próximo de 1, o ajuste do semivariograma, mais eficiente é o modelo para representar o fenômeno estudado (RIBEIRO JÚNIOR, 1995).

Foi avaliado o grau de dependência espacial do modelo, dado pela fórmula: $GDE = (C_1/C_1 + Co) \times 100$, sendo considerada fraca se essa razão for $\leq 25\%$, moderada quando a razão estiver entre 25 e 75%, e forte se a razão for $> 75\%$ (ROBERTSON, 1998).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Densidade

Observa-se na Tabela 1, que na floresta madura, a densidade não mostrou autocorrelação entre os pontos amostrados, revelando uma variação que se ajustou ao modelo efeito pepita puro nessa área. Pode-se pressupor, então, que ocorreu independência entre as amostras ou, grande variação espacial não detectada pela escala de amostragem adotada (40 m de *grid*). A redução da escala adotada poderia resultar no ajuste a um modelo teórico do semivariograma experimental, excetuando-se o caso em que o comportamento da variável, for de fato, o efeito pepita puro. Nesse caso, a redução da escala, não acarretaria na modelagem da continuidade espacial dessa variável no local.

TABELA 1: Modelos de semivariogramas ajustados a variável densidade ($g\ cm^{-3}$) nas áreas experimentais de Floresta Estacional Decidual: (M) floresta madura, (S) floresta secundária e (C) capoeirão – Santa Tereza, RS.

TABLE 1: Semivariograms models adjusted to variable density ($g\ cm^{-3}$) in the experimental areas of seasonal deciduous forest: (M) mature forest, (S) secondary forest and (C) “capoeirão” – Santa Tereza, RS.

Área	Modelos	Direções	Co	Co+C ₁	a (m)	[Co/Co+C ₁].100	GDE	R ²
M	pepita puro	-	0,009	-	-	-	-	-
S	gaussiano	0°	0,038	0,725	237	5,2	forte	0,65
C	gaussiano	90°	0,014	0,061	237	20,9	forte	0,25

Em que: Co = Efeito Pepita; a = amplitude; Co+C₁ = Patamar; $[Co/Co + C_1].100$ = Dependência Espacial em Porcentagem; (GDE) = Grau de dependência espacial; R^2 = Coeficiente de determinação.

O modelo Gaussiano, ajustado às semivariâncias calculadas, na floresta secundária e Capoeirão, obteve uma autocorrelação entre as observações até a distância de, aproximadamente, 237 m, ambos apresentando forte dependência espacial, segundo critério de Cambardella *et al.* (1994).

No capoeirão, foi encontrado um coeficiente de determinação (R^2), que explicou apenas 25% da variabilidade nesta área, sem precisão para as estimativas de krigagem desejadas. Isso pode sugerir que o tamanho do campo amostral não foi suficiente para exibir toda a variação espacial atribuída a essa variável, ou que o comportamento da variável estudada nesta área tenha efetivamente tal característica.

Guimarães (1996) encontrou dependência espacial de 70 m para a densidade do solo em um Latossolo Roxo, textura muito argilosa, nas profundidades de 30 e 60 cm, e, Gonçalves e Folegatti (1995) verificaram ausência de padrão espacial da densidade do solo em uma Terra Roxa Estruturada; mesmo que os dados tenham apresentado distribuição normal, como é o caso da variável nesse estudo.

Cabe ressaltar que, segundo Trangmar *et al.* (1985), a densidade do solo é uma propriedade inerente ao processo evolutivo que o solo sofre com o passar dos anos, sendo assim, além do seu comportamento natural, existem fatores que influenciam no seu comportamento espacial, como, por exemplo, o histórico de cultivos agrícolas praticados num passado remoto, o preparo e a cobertura do solo, o tipo de solo, o regime

de chuvas, entre outros.

Argila

Na Tabela 2, verifica-se que os semivariogramas experimentais dos dados do teor de argila foram ajustados ao modelo Gaussiano para a floresta madura e secundária, e ao modelo esférico para o Capoeirão, com alcances de 388, 400 e 187 m respectivamente.

O modelo Gaussiano, ajustado para argila, foi o mesmo obtido por Eguchi (2001), porém esse autor obteve um alcance menor (49,50 m) para uma amostragem semelhante. Isso reforça a grande variabilidade espacial e o comportamento complexo da distribuição espacial de determinadas variáveis do solo.

TABELA 2: Modelos de semivariogramas ajustados a variável argila (%) nas áreas experimentais de Floresta Estacional Decidual: (M) floresta madura, (S) floresta secundária e (C) capoeirão – Santa Tereza, RS.

TABLE 2: Semivariograms models adjusted to variable clay content (%) in the experimental areas of seasonal deciduous forest: (M) mature forest, (S) secondary forest and (C) “capoeirão” – Santa Tereza, RS.

Área	Modelos	Direções	Co	Co+C ₁	a (m)	[Co/Co+C ₁].100	GDE	R ²
M	gaussiano	0°	20	281	388	7,2	forte	0,72
S	gaussiano	-45°	8,89	184	400	4,8	forte	0,60
C	esférico	90°	4,89	69	187	7,1	forte	0,71

Em que: Co = Efeito Pepita; a = amplitude; Co+C₁ = Patamar; [Co/Co+C₁].100 = Dependência Espacial em Porcentagem; (GDE) = Grau de dependência espacial; R² = Coeficiente de determinação.

Os modelos de semivariogramas teóricos revelaram forte dependência espacial nas áreas experimentais, uma vez que os valores do efeito pepita foram menores que 25% do patamar, concordando com os resultados encontrados por Eguchi (2001), ao estudar a variabilidade dos atributos físico-hídricos do solo em uma transeção paralelo em mata ciliar, encontrando forte dependência espacial para argila. Nota-se que a dependência espacial para a variável argila foi mais acentuada na área de floresta secundária (4,8%), em relação às outras duas áreas, obtendo também um maior alcance (400 m).

A dependência espacial encontrada para a argila nessas áreas, esta de acordo com as afirmações de Isaaks e Srivastava (1989). Segundo esses autores, o comportamento parabólico do modelo gaussiano próximo à origem é reflexo de boa continuidade, ou seja, a dependência entre amostras é alta, resultando em um maior alcance encontrado em relação aos outros modelos aplicados.

Para Cambardella *et al.* (1994), uma forte dependência espacial dos atributos do solo é usualmente atribuída a fatores intrínsecos (relevo, material de origem, etc.), ao passo que aos extrínsecos (plantios, adubações ou calagens) pode-se atribuir fraca dependência.

pH

Ajustou-se o modelo gaussiano para floresta madura e esférico para áreas de floresta secundária e capoeirão. Os modelos apresentaram uma área de influência amostral próxima, expresso nos valores do alcance (a), sendo 258 m para a floresta madura, 269 m para a floresta secundária e 234 m para o capoeirão. A forte dependência espacial nas três áreas experimentais foi encontrada para os modelos ajustados. Quanto à eficiência do ajuste, o modelo gaussiano obteve um R² = 0,87 com alcance de 258 m, ao passo que Ortiz (2003), em *grid* de 50 x 50 m, para o mesmo modelo encontrou um alcance de 380 m. O modelo esférico obteve um coeficiente de determinação (R²) de 0,94 e 0,92 respectivamente nas áreas de floresta secundária e capoeirão (Tabela 3).

TABELA 3: Modelos de semivariogramas ajustados a variável pH (H₂O) nas áreas experimentais de Floresta Estacional Decidual: (M) floresta madura, (S) floresta secundária e (C) capoeirão – Santa Tereza, RS.

TABLE 3: Semivariograms models adjusted to pH (H₂O) in the experimental areas of seasonal deciduous forest: (M) mature forest, (S) secondary forest and (C) “capoeirão” – Santa Tereza, RS.

Área	Modelos	Direções	Co	Co+C ₁	a (m)	[Co/Co+C ₁].100	GDE	R ²
M	gaussiano	0°	0,112	3,749	258	3,0	forte	0,87
S	esférico	0°	0,067	1,194	269	5,6	forte	0,94
C	esférico	45°	0,09	1,726	234	5,2	forte	0,92

Em que: Co = Efeito Pepita; a = amplitude; Co+C₁ = Patamar; [Co/Co+C₁].100 = Dependência Espacial em Porcentagem; (GDE) = Grau de dependência espacial; R² = Coeficiente de determinação.

Potássio

Observa-se, nos dados da Tabela 4, que os semivariogramas construídos para a variável potássio ajustaram-se melhor ao modelo esférico. De acordo com estudos de outros autores nos quais apontam que esse modelo tem uma melhor adaptação aos semivariogramas que descrevem as variações espaciais das propriedades químicas do solo (Trangmar *et al.*, 1985; Souza *et al.*, 1998).

Ocorreu grande dispersão das semivariâncias calculadas para as diferentes distâncias entre os pares de pontos amostrados, sendo mais evidente na área de floresta madura, no semivariograma experimental. Apesar dessa grande variabilidade, os modelos aplicados apresentaram um bom desempenho do coeficiente de determinação (R²), 0,82; 0,85 e 0,77; respectivamente para a floresta madura, floresta secundária e capoeirão e uma forte dependência espacial, sendo mais evidente na área de floresta madura com valor de GDE = 8,1%.

Com um ajuste menos restritivo, os dados de potássio para floresta madura poderiam ter sido adequados ao modelo “pepita puro”, representando a ausência da continuidade espacial para a variável. Nessas condições, segundo Ortiz (2002), os parâmetros da estatística clássica (média, variância, coeficiente de variação, etc) seriam suficientes na descrição do comportamento desta variável no local.

TABELA 4: Modelos de semivariogramas ajustados à variável potássio (mg kg⁻¹) nas áreas experimentais de Floresta Estacional Decidual: (M) floresta madura, (S) floresta secundária e (C) capoeirão – Santa Tereza, RS.

TABLE 4: Semivariograms models adjusted to variable potassium (mg kg⁻¹) in the experimental areas of seasonal deciduous forest: (M) mature forest, (S) secondary forest and (C) “capoeirão” – Santa Tereza, RS.

Área	Modelos	Direções	Co	Co+C ₁	a (m)	[Co/Co+C ₁].100	GDE	R ²
M	esférico	90°	10	123	144	8,1	forte	0,82
F	esférico	-45°	117	916	332	12,7	forte	0,85
C	esférico	45°	110	865	162	12,7	forte	0,77

Em que: Co = Efeito Pepita; a = amplitude; Co+C₁ = Patamar; [Co/Co+C₁].100 = Dependência Espacial em Porcentagem; (GDE) = Grau de dependência espacial; R² = Coeficiente de determinação.

O alcance da dependência espacial encontrado para os modelos foi de 144, 332 e 162 m respectivamente nas áreas de floresta madura, floresta secundária e capoeirão, os quais correspondem aos raios das áreas consideradas homogêneas para variável estudada. Dessa forma, todos os vizinhos situados dentro de um círculo com esses raios podem ser usados para estimar valores para qualquer ponto entre eles (Vieira, 1995).

Silva e Chaves (2001) ajustaram também o modelo esférico para a variável potássio em duas profundidades testadas, com alcance de 168 m e 70 m respectivamente nas profundidades de 0 a 0.3 m e 0.3 a 0.6 m.

Matéria orgânica

Observa-se, nos modelos de semivariogramas da Tabela 5, que a matéria orgânica apresentou um efeito pepita puro, na área de floresta madura e aleatoriedade ou ausência total de dependência espacial nas áreas de floresta secundária e capoeirão, na escala adotada. O ajuste dos dados experimentais a um modelo teórico é comprometido em razão da ausência da dependência espacial. Para esses dados, tem-se uma distribuição completamente aleatória, não tendo sob o ponto de vista geoestatístico, uma função que descreva sua variação no espaço.

A aleatoriedade verificada nos semivariogramas teóricos, em parte pode ser explicada pelo caráter decidual da floresta. Grande parte do material orgânico na floresta estacional é composto pela deposição da serrapilheira (folhas, galhos, sementes,...), no solo da floresta, essa deposição ocorre de maneira irregular, ditada por condições fisiológicas das espécies e fatores externos.

Essa irregularidade na distribuição da matéria orgânica no chão da floresta, não detectada pela escala amostral, pode sugerir a confecção de *grids* com espaçamentos inferiores aos aplicados neste estudo, tendo em vista a característica dessa variável nas áreas experimentais. O comportamento aleatório para os teores de matéria orgânica também foram observados por outros autores como Ortiz (2002); Guimarães (2000) e Hernandez *et al.* (2003) em suas pesquisas.

TABELA 5: Modelos de semivariogramas ajustados a variável matéria orgânica (%) nas áreas experimentais de Floresta Estacional Decidual: (M) floresta madura, (S) floresta secundária e (C) capoeirão – Santa Tereza, RS.

TABLE 5: Semivariograms models adjusted to variable organic matter (%) in the experimental areas of seasonal deciduous forest: (M) mature forest, (S) secondary forest and (C) “capoeirão” – Santa Tereza, RS.

Área	Modelos	Direções	Co	Co+C ₁	a (m)	[Co/Co+C ₁].100	GDE	R ²
M	pepita puro	-	-	-	-	0,986	-	-
S	aleatório	-	-	-	-	-	-	-
C	aleatório	-	-	-	-	-	-	-

Em que: Co = Efeito Pepita; a = amplitude; Co + C₁ = Patamar; [Co/Co+C₁].100 = Dependência Espacial em Porcentagem; (GDE) = Grau de dependência espacial; R² = Coeficiente de determinação.

Fósforo

Foram ajustados os modelos de semivariogramas experimentais para a variável fósforo, nas direções -45°, 0°, 45 e 90°, sendo representada, a direção do semivariograma de maior alcance da continuidade espacial nas áreas experimentais. A partir do cálculo das semivariâncias, ajustou-se o modelo esférico de semivariograma experimental, na direção -45° e 90° nas áreas de floresta madura e secundária respectivamente, e o modelo exponencial na direção de 90°, na área experimental capoeirão. Os parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas experimentais para os teores de fósforo encontram-se na Tabela 6.

TABELA 6: Modelos de semivariogramas ajustados a variável fósforo (mg kg⁻¹) nas áreas experimentais de Floresta Estacional Decidual: (M) floresta madura, (S) floresta secundária e (C) capoeirão – Santa Tereza, RS.

TABLE 6: Semivariograms models adjusted to variable phosphorus (mg kg⁻¹) in the experimental areas of seasonal deciduous forest: (M) mature forest, (S) secondary forest and (C) “capoeirão” – Santa Tereza, RS.

Área	Modelos	Direções	Co	Co+C ₁	a (m)	[Co/Co+C ₁].100	GDE	R ²
M	esférico	-45°	0,194	0,645	224	30,1	moderada	0,65
S	esférico	90°	0,34	4,233	190	8,0	forte	0,65
C	exponencial	90°	0,14	0,965	92	14,5	forte	0,75

Em que: Co = Efeito Pepita; a = amplitude; Co+C₁ = Patamar; [Co/Co+C₁].100 = Dependência Espacial em Porcentagem; (GDE) = Grau de dependência espacial; R² = Coeficiente de determinação.

Em relação à dependência espacial dos modelos, esta se mostrou moderada na floresta madura,

passando para forte nas áreas de floresta secundária e capoeirão. O modelo exponencial ajustado na área de capoeirão obteve o melhor coeficiente de determinação ($R^2 = 0,75$), e o menor alcance (92 m), seguido do modelo esférico com igual desempenho nas outras duas sucessões ($R^2 = 0,65$).

A modelagem geoestatística para os semivariogramas que melhor se ajustaram à variável fósforo concorda com autores como Silva e Chaves (2001) e Dariva (2001) em relação ao modelo exponencial e Carvalho *et al.* (2003) com relação ao modelo esférico.

CONCLUSÕES

As variáveis densidade e fósforo apresentam estrutura de dependência espacial forte, nas áreas de floresta secundária e capoeirão, enquanto argila, pH e potássio em todas as áreas experimentais. Na floresta madura, a variável fósforo apresenta dependência espacial moderada.

Nas áreas experimentais de floresta madura, as variáveis densidade e matéria orgânica apresentam efeito pepita pura, sendo a estatística clássica mais indicada para explicar o comportamento destas variáveis neste local.

Quanto a precisão do ajuste dos modelos variográficos utilizando a validação cruzada, a variável pH apresenta o melhor desempenho, com R^2 de 0,87; 0,94 e 0,92 nas áreas de floresta madura, secundária e capoeirão respectivamente.

Entre os modelos de semivariograma, o gaussiano obtém melhor ajuste para os atributos densidade e argila, enquanto que para os atributos pH; potássio e fósforo, ajustaram-se melhor pelo modelo esférico.

A anisotropia geométrica, constatada na forma elíptica do campo amostral, é verificada em todos os modelos teóricos de semivariograma experimentais, que apresentam dependência espacial, nos locais amostrados.

A geoestatística se mostra como uma ferramenta eficaz para compreensão da magnitude e estrutura da variabilidade espacial dos atributos estudados, indicadores fundamentais para o manejo do solo e dos demais recursos naturais presentes na área de estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CAMARGO, O. A de.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: USP/ESALQ, 1997. 132 p.
- CAMBARDELLA, C. A. *et al.* 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.
- CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil, SP. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 695-703, 2003.
- COUTO, E. G.; KLAMT, E.; STEIN A. Estimativa do teor de argila e do potássio trocável em solos esparsamente amostrados no sul do estado do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 129-139, 2000.
- DARIVA, T. A. **Variabilidade espacial de solo e da cultura de soja em várzea sistematizada**. 2001. 119 f. Dissertação (Mestrado Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Santa Maria.
- DOURADO NETO, D. **Variabilidade espacial das alturas de chuva e irrigação e de potenciais da solução do solo**. 1989. 180 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- EGUCHI, E. S. **Variabilidade espacial de atributos físico-químicos de um solo hidromorfo no Município de Lavras - MG**. 2001. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e Abastecimento, 1997. 212 p.
- GONÇALVES, A. C.; FOLEGATTI, M. V. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo, ao longo de uma transeção em área irrigada por pivô central. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24., 1995, Viçosa. **Anais...** Viçosa: UFV, 1995. p.95-190.
- GUIMARÃES, E. C. **Variabilidade espacial da umidade e da densidade do solo em um Latossolo Roxo**. 1993. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- GUIMARÃES, E. C. Estabilidade temporal da umidade de um Latossolo Roxo. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., 1996, Águas de Lindoia, **Anais...** Águas de Lindoia: SBSC/ESALQ-USP, 1996. 1 CD-ROM.

- GUIMARÃES, E. C. **Variabilidade especial de atributos de um Latossolo vermelho escuro textura argilosa da região do cerrado, submetido ao plantio direto e ao plantio convencional**. 2000. 85 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade de Campinas, Campinas.
- HERNANDES, A. *et al.* Variabilidad espacial edáfica en el sistema tradicional de conucos en el Amazonas de Venezuela. **Investigación Agrária - Sistemas y Recursos Forestales**, Madrid, v.12, n. 2, p.43-54, 2003.
- HUIJBREGTS, C. J. Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data. In: DAVIS, J. C.; McCULLAGH, M. J. (Ed.). **Display and analysis of spatial data**. New York: John Wiley, 1975. p.38-53.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989.
- MATHERON, G. **Les variables régionalisées et leur estimation**. Paris: Masson et C^{ie}, 1965. 305 p.
- MELLO, J. M.; SCOLFORO, J. R. S. Análise comparativa de procedimentos de amostragem em um remanescente de Floresta Estacional Semidecídua Montana. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 24, n. 1, p. 55-62, 2000.
- MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961. 73 p.
- OLIVEIRA, M. S. **Planos amostrais para variáveis espaciais utilizando geostatística**. 1991. 100 f. Dissertação (Mestrado em Estatística) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- ORTIZ, G. C. **Aplicação de métodos geostatísticos para identificar a magnitude e a estrutura da variabilidade espacial de variáveis físicas do solo**. 2002. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- ORTIZ, J. L. **Emprego do geoprocessamento no estudo da relação entre potencial produtivo de um povoamento de eucalipto e atributos do solo e do relevo**. 2003. 178 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- PIRES, C. A. F. **Modelagem e avaliação de dados geofísicos e geoquímicos aplicada a pesquisa de metais básicos e Au no Prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS, Brasil)**. 2002. 208 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas Matérias e Metalurgia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- RIBEIRO JÚNIOR, P. J. **Métodos geostatísticos no estudo da variabilidade espacial dos parâmetros do solo**. 1995. 99 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- ROBERTSON, G. P. **GS⁺: Geostatistics for the enviromental sciences - GS⁺ User Guide**. Plainwell: Gamma Design Software, 1998. 152 p.
- STRECK, E. V. *et al.* **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 2002. 107 p.
- SILVA, P. C. M.; CHAVES, L. H. G. Avaliação e variabilidade espacial de fósforo, potássio e matéria orgânica em Alissolos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 3, p. 431-436, 2001.
- SOUZA, L. da S.; COGO, N. P.; VIEIRA, S. R. Variabilidade de fósforo, potássio e matéria orgânica no solo em relação a sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 77-86, 1998.
- TEDESCO, M. J. *et al.* **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS, 1995. 118 p. (Boletim Técnico).
- TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, New York, v. 38, p. 45-93, 1985.
- VIEIRA, S. R. *et al.* Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v. 51, n. 3, p. 1-75, 1983
- VIEIRA, S. R. **Geostatística em estudos de variabilidade espacial**. Campinas: IAC, 1995. 61p.