



UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS
FÍSICO-HIDRICOS EM SOLOS DE UMA
TRANSEÇÃO PERPENDICULAR A UM DRENO
NATURAL**

MÁRCIO WILLIAM ROQUE

2003

MÁRCIO WILLIAM ROQUE

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS EM
SOLOS DE UMA TRANSEÇÃO PERPENDICULAR A UM DRENO
NATURAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração Irrigação e Drenagem, para obtenção do título de "Mestre".

Orientador

Prof. Dr. Elio Lemos da Silva

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
2003

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Roque, Márcio William

Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos em solos de uma transeção perpendicular a um dreno natural / Márcio William Roque. -- Lavras : UFLA, 2003.

138 p. : il.

Orientador: Elío Lemes da Silva.

Dissertação (Mestrado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Geoestatística. 2. Variabilidade espacial. 3. Solo. 4. Atributos físico-hídricos. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-631.432

MÁRCIO WILLIAM ROQUE

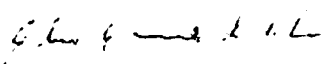
**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS EM
SOLOS DE UMA TRANSEÇÃO PERPENDICULAR A UM DRENO
NATURAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de
Lavras como parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de
concentração Irrigação e Drenagem, para obtenção
do título de "Mestre".

APROVADA em 27 de fevereiro de 2003

Prof. Dr. Antonio Marciano da Silva UFLA

Prof. Dr. Marcelo Silva de Oliveira UFLA



Prof. Dr. Elio Lemos da Silva

UFLA

(Orientador)

LAVRAS

MINAS GERAIS - BRASIL

A DEUS,

pela saúde e pela presença em todos os momentos da minha vida,

OFEREÇO

Aos meus pais, José e Luzia, pelo amor e confiança depositada em mim,

A minha namorada Janice, pelo amor, carinho e paciência nos momentos difíceis,

Ao meu irmão Wellington, pelo amor e incentivo para realização do curso,

Aos meus amigos,

A todos aqueles que acreditaram,

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Engenharia, pela oportunidade de realização do curso.

À FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Professor Dr. Elio Lemos da Silva pela orientação e amizade.

Ao Professor Dr. Marcelo Silva de Oliveira, pela co-orientação e pelo apoio oferecido.

Ao Professor Dr. Mozart Martins Ferreira, pelo total apoio em todas as fases do projeto.

Ao Professor Dr. Antônio Marciano da Silva, membro da Banca Examinadora, pelas valiosas sugestões e observações.

Ao Professor Dr. João José, pela classificação dos solos estudados, sugestões e apoio oferecido.

Ao Tânio Eliezer Alves, pela concessão de sua propriedade para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos Evonaldo, Renato e Welson, pela ajuda na coleta de dados no campo.

Aos Funcionários do Laboratório de Física do Solo Delane e Dulce, pela ajuda nas análises textural.

Aos amigos de república Evonaldo e Flavio, pelo convívio e amizade durante o tempo de mestrado, sendo o último, desde os tempos de graduação.

Aos amigos, professores e funcionários do Departamento de Engenharia da UFLA, por todas as colaborações.

A todos que colaboraram para realização deste trabalho.

SUMÁRIO

Páginas

RESUMO	i
ABSTRACT.....	ii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO	3
2.1 Variabilidade Espacial em Solos.....	3
2.2 Estatística Clássica	4
2.3 Teoria das Variáveis Regionalizadas (Geoestatística)	6
2.3.1 Semivariograma	9
2.3.2 Ajuste do semivariograma.....	12
2.3.3 Modelos com patamar	13
2.3.4 Modelos sem patamar	15
2.4 Atributos do solo	17
2.4.1 Textura	17
2.4.2 Densidade do solo	17
2.4.3 Densidade de partículas.....	18
2.4.4 Porosidade	18
2.4.5 Permeabilidade Intrínseca (K')	19
2.5 Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo.....	20
3 MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1 Localização e clima do município.....	23
3.2 Característica da área em estudo	23
3.3 Amostragem	24
3.3.1 Permeabilidade intrínseca (K').....	26

3.3.2 Densidade de partículas (Dp) e Textura do solo	27
3.3.3 Densidade do solo (Ds)	28
3.3.4 Porosidade total calculada (VTPc) e porosidade total determinada (VTPd)	28
3.3.4.1 Microporosidade (Micro) e macroporosidade (Macro).....	29
3.4 Análise dos dados.....	29
3.4.1 Análises descritivas e inferências da estatística clássica.....	30
3.4.2 Aplicação da teoria das variáveis regionalizadas	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1 Neossolo Flúvico (RU)	33
4.1.1 Análise descritiva e inferências clássicas.....	33
4.1.1.1 Densidade do solo (Ds), Densidade de Partícula (Dp) e Textura.....	33
4.1.1.2 Porosidades e Permeabilidade Intrínseca (K')	35
4.1.2 Análise da variabilidade espacial por meio de semivariogramas	37
4.1.2.1 Densidade do solo (Ds)	37
4.1.2.2 Densidade de Partícula (Dp)	40
4.1.2.3 Textura	41
4.1.2.4 Volume Total de Poros Calculados (VTPc) e Determinados (VTPd)	44
4.1.2.5 Macroporosidade (Macro) e Microporosidade (Micro)	47
4.1.2.6 Permeabilidade Intrínseca (K')	50
4.2 Cambissolo (C).....	52
4.2.1 Análise descritiva e inferências clássicas.....	52
4.2.1.1 Densidade do solo (Ds), Densidade de Partícula (Dp) e Textura.....	52
4.2.1.2 Porosidades e Permeabilidade Intrínseca (K')	54
4.2.2 Análise da variabilidade espacial por meio de semivariogramas	56
4.2.2.1 Densidade do solo (Ds)	56
4.2.2.2 Densidade de partícula (Dp).....	57

4.2.2.3 Textura	58
4.2.2.4 Volume Total de Poros Calculados (VTPc) e Determinados (VTPd)	62
4.2.2.5 Macroporosidade (Macro) e Microporosidade (Micro)	64
4.2.2.6 Permeabilidade Intrínseca (K')	66
4.3 Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA)	67
4.3.1 Análise descritiva e inferências clássicas	67
4.3.1.1 Densidade do solo (Ds), Densidade de Partícula (Dp) e Textura	67
4.3.1.2 Porosidades e Permeabilidade Intrínseca (K')	69
4.3.2 Análise da variabilidade espacial por meio de semivariogramas	70
4.3.2.1 Densidade do solo (Ds)	70
4.3.2.2 Densidade de partícula (Dp)	73
4.3.2.3 Textura	75
4.3.2.4 Volume Total de Poros Calculados (VTPc) e Determinados (VTPd)	79
4.3.2.5 Macroporosidade (Macro) e Microporosidade (Micro)	83
4.3.2.6 Permeabilidade Intrínseca (K')	86
4.4 Gleissolo Háptico (GX)	87
4.4.1 Análise descritiva e inferências clássicas	87
4.4.1.1 Densidade do solo (Ds), Densidade de Partícula (Dp) e Textura	87
4.4.1.2 Porosidades e Permeabilidade Intrínseca (K')	89
4.4.2 Análise da variabilidade espacial por meio de semivariogramas	91
4.4.2.1 Densidade do solo (Ds)	91
4.4.2.2 Densidade de Partícula (Dp)	93
4.4.2.3 Textura	96
4.4.2.4 Volume Total de Poros Calculados (VTPc) e Determinados (VTPd)	100
4.4.2.5 Macroporosidade (Macro) e Microporosidade (Micro)	102

4.4.2.6 Permeabilidade Intrínseca (K')	105
4.5 Gleissolo Melânico (GM)	107
4.5.1 Análise descritiva e inferências clássicas	107
4.5.1.1 Densidade do solo (D_s), Densidade de Partícula (D_p) e Textura.....	107
4.5.1.2 Porosidades e Permeabilidade Intrínseca (K')	108
4.5.2 Análise da variabilidade espacial por meio de semivariogramas.....	110
4.5.2.1 Densidade do solo (D_s)	110
4.5.2.2 Densidade de Partícula (D_p)	112
4.5.2.3 Textura	114
4.5.2.4 Volume Total de Poros Calculados (VTPc) e Determinados (VTPd)	119
4.5.2.5 Macroporosidade (Macro) e Microporosidade (Micro)	122
4.5.2.6 Permeabilidade Intrínseca (K')	125
4.6 Análise Comparativa da Dependência Espacial.....	127
5 CONCLUSÕES.....	132
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	133

RESUMO

ROQUE, Márcio William. Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos em solos de uma transeção perpendicular a um dreno natural. 2003. 138 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola/Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.*

Utilizou-se dos métodos da estatística clássica e da geoestatística na identificação do tamanho e da estrutura da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos em uma transeção de 196m de comprimento, compreendendo as classes de solo: Neossolo Flúvico (RU), Cambissolo (C), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Gleissolo Háptico (GX) e Gleissolo Melânico (GM). Realizou-se amostragem sistemática com espaçamentos regulares entre pontos variando de 0,25m a 16,00m, totalizando 68 pontos amostrais. Em cada ponto foram feitas medições “in situ” da permeabilidade intrínseca do solo, por meio do permeâmetro de Guelph, e retiradas amostras para determinação em laboratório dos demais atributos estudados. Amostras deformadas foram utilizadas para a análise granulométrica e de densidade de partícula. Amostras indeformadas foram utilizadas para determinação da densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, volume total de poros calculado e volume total de poros determinado. As magnitudes da variabilidade espaciais foram dadas pelos coeficientes de variação, enquanto que a estrutura foi identificada por meio dos semivariogramas. O atributo mais variável foi a permeabilidade intrínseca, sendo também o que apresentou maior desorganização estrutural. Pela estatística clássica, entre os solos estudados, o GX foi o de maior variabilidade espacial, enquanto o PVA o de menor. Ao analisar a estrutura da variabilidade espacial através da geoestatística, o PVA foi o que apresentou maior dependência espacial, obtida para maioria dos atributos. O C foi a classe de solo que obteve a menor estrutura de dependência espacial, onde apenas dois semivariogramas foram ajustados para os atributos argila e silte. A variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos na direção perpendicular ao curso do rio mostrou-se maior do que quando analisados na direção paralelo ao curso do rio.

* Comitê Orientador: Elio Lemos da Silva - UFLA (Orientador), Marcelo Silva de Oliveira - UFLA (Co-orientador), Mozart Martins Ferreira - UFLA (Co-orientador).

ABSTRACT

ROQUE, Márcio William. Spatial variability of physical-hydric attributes in soils of a perpendicular transect to a natural drain. 2003. 138 p. Dissertation (Master of Science in Agricultural Engineering/Irrigation and Drainage) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.*

Classical and geostatistical methods were used to identify the size and structure of the spatial variability of physical-hydric attributes in a transect of 196 meters of five soils: Fluvic Neosol (RU), Cambisol (C), Yellow-Red Argisol (PVA), Haplic Gleysol (GX) e Melanic Gleysol (GM). The sampling was systematic with regular spaced 68 samples points. Measurement of saturated soil hydraulic conductivity was done “in situ” by using Guelph permeameter, before taking soil samples for determination of other studied attributes in laboratory. Disturbed samples were used for the particle-size distribution and particle density analysis. Undisturbed samples were used for determination of bulk density, macro porosity, micro porosity and total volume of pores. The size of the spatial variability was given by the variation coefficients, while the structure was identified by semi-variograms. The highest variation was found for soil permeability, being the one that also presented highest structural disorder. The classical statistics showed the largest spatial variability for GX soil and the smallest one for the PVA soil. When analyzing the structure of the spatial variability by geoestatistic, the PVA soil was that presented highest spatial dependence, obtained for majority of the attributes. The C soil was the class of soil that presented the smallest structure of spatial dependence, where only three semi-variograms was adjusted for the attributes clay, silt and blocked pores. Spatial variability of flood plain soil physical properties in a transect perpendicular to the river is higher than that in a parallel transect.

* Guidance Committee: Elio Lemos da Silva - UFLA (Major Professor), Marcelo Silva de Oliveira - UFLA, Mozart Martins Ferreira - UFLA.

1 INTRODUÇÃO

A variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo constitui, entre os exemplos de aplicação, um dos fatores que possibilita o manejo do solo e da água numa agricultura irrigada.

Devido à sua origem diversa quanto a granulometria, à composição mineralógica e ao conteúdo de matéria orgânica, solos de várzea apresentam, normalmente grande variação, com diferentes limitações e aptidão de uso. Este fato, aliado à falta de informações sobre suas propriedades e características, tem comprometido o sucesso da incorporação destas áreas para a produção de alimentos (Machado 1994).

O planejamento, a escolha e o manejo eficiente de um sistema de irrigação dependem em grande extensão do conhecimento antecedente das características e propriedades físico-hídricos do solo, de tal forma que a sua determinação deve ser feita "in situ", com amostragem realmente representativa e com um mínimo possível de erro. Sendo o solo um sistema extremamente heterogêneo, o conhecimento de sua variabilidade espacial é imprescindível, devendo ser esta considerada no momento da amostragem. A variabilidade espacial do solo, quando não é bem observada, pode comprometer o planejamento do seu uso e manejo, a eficiência de projetos de irrigação e drenagem e a conservação do solo.

A grande variabilidade do solo, relacionada com o processo de infiltração de água, sempre foi objeto de estudo entre os pesquisadores que trabalham com irrigação, principalmente, de superfície. Futuramente, porém, é certo que a variabilidade espacial despertará uma atenção maior, em especial na área ambiental, que envolve água e solo.

A Geoestatística ou Teoria das Variáveis Regionalizadas, apesar de bastante antiga, somente há pouco tempo vem despertando o interesse dos

pesquisadores da ciência do solo e se destacando como uma ferramenta estatística para a avaliação da variabilidade espacial do solo, a qual possibilita a identificação da estrutura da variância, ou seja, conhecer não apenas a magnitude de variação de uma propriedade, mas também como esta variação está ocorrendo espacialmente no campo.

O estudo geoestatístico apresenta um valor econômico, pois, com o conhecimento da estrutura da dependência dos dados, é possível planejar de maneira mais eficaz a implantação de malhas de amostragem. Assim, com o conhecimento das posições relativas das amostragens ou medias feitas a campo, a variabilidade espacial passa a ser utilizada como um fator positivo identificando interações importantes.

Buscando obter maiores informações sobre o tamanho e a estrutura da variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos em solos de várzea, este trabalho foi conduzido ao longo de uma transeção perpendicular ao curso d'água de uma várzea, compreendendo cinco classes de solos: Neossolo Flúvico (RU), Cambissolo (C), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Gleissolo Háptico (GX) e o Gleissolo Melânico (GM). A estatística clássica foi utilizada afim de verificar o tamanho da variabilidade espacial dos atributos, dado pelos coeficientes de variação, enquanto a estrutura de dependência espacial foi analisada pela geoestatística, através dos semivariogramas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Variabilidade Espacial em Solos

A partir do momento em que o solo começa a ser formado até que o mesmo atinja um estado de quase equilíbrio dinâmico, a variabilidade espacial de parâmetros físicos, químicos, biológicos, morfológicos e mineralógicos começa a existir, sendo mais acentuada nos solos mais jovens, quando comparada aos solos mais velhos, os quais tendem a ser mais estabilizados em termos de transformação, Resende (1977).

Segundo Sales (1992), variabilidade espacial do solo pode ser agrupada em duas categorias: sistemática e ao acaso. A variabilidade sistemática se caracteriza por uma mudança explicada dos atributos do solo em função das formas da paisagem, elementos geomórficos, fatores de formação e ou interação desses aspectos, enquanto que a variabilidade ao acaso constitui-se nas mudanças dos atributos do solo que não podem ser relacionadas a uma causa conhecida, podendo ser decorrente da litologia, intensidade diferencial do intemperismo, erosão, fatores biológicos, hidrologia diferencial, erros analíticos e amostrais.

Em solos são usados basicamente dois sistemas de amostragem, ou seja, amostragem simples ao acaso e amostragem sistemática, Reichardt (1985).

A amostragem simples ao acaso é aquela em que n amostras são retiradas de uma população de maneira que cada indivíduo tenha chances iguais de ser amostrado e cada amostra tenha também a mesma possibilidade de ser selecionada, porém sem seguir um critério definido. A amostragem sistemática consiste em estabelecer planos de amostragem seguindo vários critérios de transeções ou malhas (triângulos, retângulos, círculos, etc), com distâncias prefixadas entre uma amostra e outra. Uma amostragem sistemática visa a cobrir

a área com maior representatividade, procurando uma configuração de pontos amostrados mais eficiente, (Reichardt et al., 1986).

Para Beckett & Webster (1971), a variabilidade espacial aumenta significativamente com o tamanho da área amostrada. Segundo esses autores, mais da metade da variância admissível no campo já está presente em cada metro quadrado do solo, não devendo conduzir experimentos em áreas muito extensas com pontos amostrais muito distantes uns dos outros de forma a minimizar a variabilidade espacial.

Para estudo da variabilidade espacial, pode-se utilizar duas metodologias que diferem basicamente na forma de análise da variação dos dados, ou seja, a estatística clássica e a geoestatística.

A Estatística Clássica tem sido utilizada com bastante frequência, principalmente no estudo de parâmetros do solo que tenham distribuição de probabilidade segundo a lei normal e cujas observações sejam independentes, porém, ela pode fornecer apenas o tamanho da variabilidade espacial.

A Geoestatística é uma ferramenta adicional no estudo de atributos do solo espacialmente correlacionados, exatamente porque incorpora em si, a possibilidade de se estudar o comportamento da variabilidade espacial, permitindo a interpretação dos resultados com base na estrutura desta variabilidade, além de poder fazer inferências quanto ao seu tamanho.

Segundo Ortiz (2002), o conhecimento da variabilidade espacial de um solo, além de caracterizar uma região, pode indicar o número e a distribuição de amostras a serem retiradas, possibilitando melhor detalhamento da área e dos resultados.

2.2 Estatística Clássica

Na estatística clássica são usados valores médios para representar o conjunto de dados ou estimar propriedades em locais não amostrados dentro de

unidades amostrais. Para expressar a variabilidade de um conjunto de dados, Bussab & Morettin (1987) propõem que se utilize os momentos estatísticos variância ou desvio padrão, o coeficiente de variação e a amplitude total, por serem fáceis de se calcular e de se interpretar. Estes indicadores de variabilidade, entretanto, devem ser utilizados com certas restrições.

Segundo Guimarães (1993), a variância só poderá ser usada, isoladamente, se forem comparados grupos de dados que possuam unidades e médias iguais. O coeficiente de variação indica o tamanho da variabilidade do parâmetro, não refletindo a estrutura com que esta variabilidade acontece, mas é bastante utilizado para comparar propriedades que possuam unidades diferentes. A amplitude total é pouco utilizada, porque leva em consideração apenas os extremos, não levando em conta do que se tem entre estes valores.

Dourado Neto (1989) sugeriu que parâmetros como a média, variância e coeficiente de variação precisam ser analisados em conjunto e que, para isto, o conhecimento do fenômeno físico é de grande importância para a sua análise.

Segundo Reichardt (1985), quando se utiliza a Estatística Clássica para análise de dados oriundos de campo, e a análise de variância apresenta alto componente residual, indicado por alto coeficiente de variação, a causa pode ser a variabilidade espacial do solo, assumindo muitas vezes que o solo seja homogêneo durante a instalação de experimento no campo. O problema está na impossibilidade de se saber, antes de amostrar, se amostras são dependentes ou independentes. Além disso, quem aplica Estatística Clássica assume independência sem testar. Devido a estas limitações e pelo fato dos solos serem heterogêneos, Silva (1988) afirma ser necessária a utilização de procedimentos estatísticos adicionais que considerem e reflitam essas variações.

A limitação da estatística clássica esta na necessidade de se ter amostras independentes e dados normalmente distribuídos, o que nem sempre ocorre, principalmente em parâmetros relacionados à água no solo.

2.3 Teoria das Variáveis Regionalizadas (Geoestatística)

A Teoria das Variáveis Regionalizadas tem sua origem nos trabalhos desenvolvidos por Krige em 1951 na mineração de ouro na África do Sul. Isso, porque procedimentos da estatística clássica, principalmente no que se refere a estimativa de dados, eram considerados impróprios por não levarem em consideração a dependência espacial das amostras. Desta forma, Matheron, baseado nessas observações, a partir da década de 1960, desenvolveu em Fontaineblau uma teoria, a qual chamou de Teoria das Variáveis Regionalizadas, e que contém os fundamentos da geoestatística, isto é, os conceitos de variáveis regionalizadas, funções aleatórias e estacionaridade, (Vieira, 2000).

As técnicas geoestatísticas levam em consideração a distribuição espacial das medidas, o que permite definir o alcance de correlação espacial entre amostras.

Segundo Vieira (2000), para a posição fixa x_i , identificada por uma coordenada no espaço ou no tempo, cada valor medido da variável em estudo, $z(x_i)$ pode ser considerado como uma realização de certa variável aleatória, $Z(x_i)$.

Tragmar et al. (1985) definem uma variável aleatória como uma medida de particularidades que se espera variar de acordo com alguma lei de distribuição de probabilidade, sendo caracterizada por parâmetros da distribuição (média, variância, etc.). Quando a variável aleatória assume diferentes valores em função da localização que é amostrada no campo, caracteriza-se uma variável regionalizada e, considerando-se o conjunto de todas as possíveis realizações da variável aleatória, em todos os locais do campo, tem-se uma função aleatória. Então, o conjunto de variáveis aleatórias $\{Z(x_i), \text{ para todo } x_i \text{ dentro de } S\}$, é denominado função aleatória e é simbolizado por $Z(\cdot)$ Journel & Huijbregts (1991).

O conceito de variáveis aleatórias, funções aleatórias e estacionaridade fornece a base teórica para a análise da dependência espacial, utilizando-se correlogramas e semivariogramas (Machado, 1994). Em qualquer caso, considera-se um conjunto de valores $Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_n)$ nos locais $x_1, x_2, \dots, x_n$ onde cada local define um ponto em uma, duas ou três dimensões e também cada ponto corresponde a um determinado volume de solo centrado em x_i (Warick et al. 1986). Este conjunto de variáveis aleatórias é caracterizado por uma estrutura em que as observações não são necessariamente independentes, estando espacialmente correlacionadas.

A autocorrelação e a semivariância são duas funções mais freqüentemente utilizadas na “Teoria das Variáveis Regionalizadas” para a determinação da dependência espacial de variáveis espacialmente correlacionadas. O termo auto, utilizado na palavra autocorrelação, é para indicar a correlação entre a mesma variável, separada por um vetor distância (h), diferenciando assim da correlação cruzada, que é a função correlação entre duas variáveis distintas separadas por um vetor distância (h).

A função autocorrelação encontra-se definida em Vieira et al. (1993) e é dada por:

$$\rho = \frac{C [Z(x_i), Z(x_j)]}{[Var(Z(x_i))Var(Z(x_j))]^{\frac{1}{2}}} \quad (01)$$

em que:

ρ é a autocorrelação

C é a covariância

Var é a variância

A semivariância é dada por:

$$\gamma(Z(x_i), Z(x_j)) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x_i) - Z(x_j)] \quad (02)$$

em que:

$\gamma(Z(x_i), Z(x_j))$ é a semivariância.

Para utilização destas funções para o estudo da dependência espacial de uma variável aleatória, devem ser observadas algumas hipóteses.

(i) Hipótese de estacionaridade de 1ª ordem:

Uma variável regionalizada é estacionária se os momentos estatísticos da variável aleatória $Z(x_i+h)$ forem os mesmos para qualquer vetor h . De acordo com o número k de momentos estatísticos que são constantes, a variável é chamada de estacionária de ordem k .

Uma variável aleatória é estacionária de 1ª ordem se:

$E\{Z(x_i)\} = m$, para qualquer x_i dentro da área S , em que m é estimada pela média dos valores amostrais.

Decorre desta definição que, se for tomado um vetor h de separação entre dois pontos, o qual apresenta módulo e direção, para qualquer h , tem-se $E\{Z(x_i) - Z(x_i+h)\} = 0$.

(ii) Hipótese de estacionaridade de 2ª ordem:

$E\{Z(x_i)\} = m$, para qualquer x_i dentro da área S .

$C(h) = E\{Z(x_i)Z(x_i+h)\} - m^2$, para qualquer x_i dentro da área S , em que $C(h)$ é a covariância.

(iii) Hipótese intrínseca:

$E\{Z(x_i)\} = m$, para qualquer x_i dentro da área S .

$\text{Var}\{Z(x_i) - Z(x_i+h)\} = E\{[Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2\} = 2\gamma(h)$, para qualquer x_i dentro da área S .

A existência de estacionaridade dá a oportunidade de repetir um experimento mesmo que as amostras devam ser coletadas em pontos diferentes,

porque todas são consideradas pertencentes a populações com os mesmos momentos estatísticos.

Estes conceitos de estacionaridade podem ser encontrados em Journel & Huijbregts (1991).

A função semivariograma é utilizada para construção dos gráficos semivariogramas, enquanto a autocorrelação é utilizada para construção dos gráficos autocorrelogramas.

Segundo Braga (1990), existem duas principais vantagens do semivariograma em relação ao autocorrelograma:

- (i) não necessidade do conhecimento da esperança da função aleatória ($Z(x)$) para o conhecimento da semivariância;
- (ii) maior abrangência de sua definição, pois incluem-se as funções aleatória com variância infinita. Portanto, a hipótese de estacionaridade de 2ª ordem não é um pré-requisito básico para o seu uso, levando-se em consideração apenas a hipótese intrínseca, que é menos restritiva.

Por ter como pré-requisito somente a hipótese intrínseca, este trabalho foi elaborado utilizando os fundamentos do semivariograma para o estudo da dependência espacial das variáveis estudadas.

2.3.1 Semivariograma

O semivariograma é uma função dentro da geoestatística que caracteriza a estrutura de dependência espacial da variável regionalizada (ou variáveis) sob estudo, ou seja, é uma função que relaciona a semivariância com o vetor distância (h).

O sentido físico do semivariograma $\gamma(h)$ pode ser percebido quando se analisa a sua definição: ele mede a variabilidade das diferenças entre as realizações da variável aleatória de interesse, de tal maneira que, quanto menor a semivariância, menor a variação dessas diferenças, (Eguchi, 2001).

Segundo Vieira (2000), semivariograma por definição é:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E\{[Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2\} \quad (03)$$

a qual pode ser estimada por:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (04)$$

em que $N(h)$ é o número de pares de pontos possíveis distanciados pelo vetor h .

O gráfico de $\gamma^*(h)$ em função dos valores correspondentes de h , chamado semivariograma (Equação 04), é uma função do vetor h e, portanto, de ambos, magnitude e direção de h . Quando o gráfico do semivariograma é idêntico para qualquer direção de h , ele é chamado isotrópico caso contrário ele é anisotrópico. A maioria das variáveis de Ciência do Solo tem um comportamento anisotrópico, isto é, muda de maneira diferente para direções diferentes. É óbvio que isso depende muito do atributo em estudo, das dimensões do campo de estudo e do tipo de solo envolvido.

A Figura 1 ilustra um semivariograma contendo todos os parâmetros possíveis de ocorrer. O seu padrão representa o que, intuitivamente, se espera de dados de campo, isto é, que as diferenças $\{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}$ decresçam à medida que h , a distância que os separa, decresce. É esperado que observações mais próximas geograficamente tenham um comportamento mais semelhante entre si do que aquelas separadas por maiores distâncias. Desta maneira, é esperado que $\gamma(h)$ aumente com a distância h .

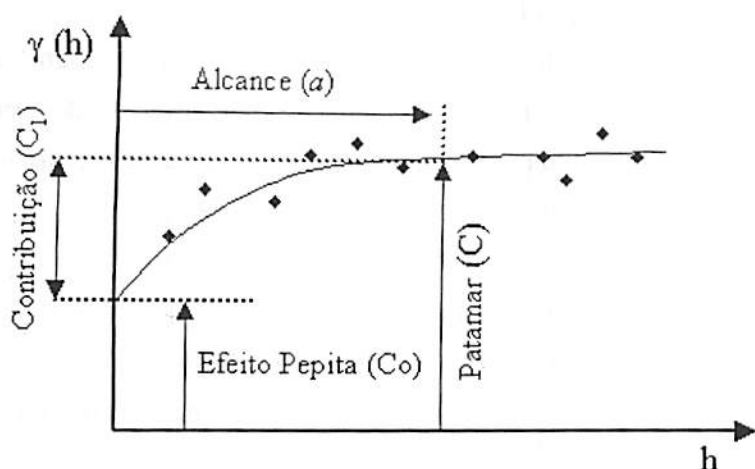


FIGURA 1. Parâmetros de um Semivariograma.

Alcance (a): distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente, também chamada de "range".

Segundo Vieira (2000), medições localizadas a distâncias maiores que a têm distribuição espacial aleatória e, por isso, são independentes entre si. Para essas amostras, a estatística clássica pode ser aplicada sem restrição. Por outro lado, amostras separadas por uma distância menor que a são correlacionadas umas as outras e permitem interpolação para espaçamentos menores do que os amostrados. Dessa maneira, o alcance a é a "linha divisória" para a aplicação da geoestatística e da estatística clássica e, por isso, o cálculo do semivariograma deveria ser feito rotineiramente para amostragem dos dados de campo, para garantir as hipóteses estatísticas sob as quais serão analisados.

Patamar (C): é o valor do semivariograma correspondente a seu alcance (a), também chamado de "sill". Deste ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, porque a variância da diferença entre pares de amostras ($\text{Var}[Z(x) - Z(x+h)]$) torna-se estável com a distância.

Efeito Pepita (C_0): idealmente, $\gamma(0)=0$. Entretanto, na prática, à medida que h ("lag") tende para 0 (zero), $\gamma(h)$ se aproxima de um valor positivo chamado efeito pepita ("nugget effect"), que revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. Parte desta descontinuidade pode ser também devido a erros de medição (Isaaks & Srivastava, 1989), mas é impossível quantificar se a maior contribuição provém dos erros de medição ou da variabilidade de pequena escala não captada pela amostragem.

Contribuição (C_1): é a diferença entre o patamar (C) e o efeito pepita (C_0).

Cambardella et al. (1994) classificaram o grau de dependência espacial de um atributo em função da relação entre o efeito pepita e o patamar. Segundo esses autores, semivariogramas que apresentam essa relação efeito pepita e patamar menor ou igual 25% apresentam forte dependência espacial. Quando essa relação variar de 25% a 75%, a dependência espacial será moderada, sendo fraca quando a relação for superior a 75%.

2.3.2 Ajuste do semivariograma

Segundo Vieira (2000), o ajuste de um modelo teórico ao semivariograma é um dos aspectos mais importantes das aplicações da teoria das variáveis regionalizadas e pode ser uma das maiores fontes de ambigüidades e polêmicas nessas aplicações.

Escolher um modelo mais adequado não é um procedimento automático. Segundo Gonçalves (1997), em geoestatística é comum o ajuste visual do modelo selecionado aos pontos experimentais, o que carece de sustentação estatística. Este ajuste visual dos modelos semivariográficos é também chamado ajuste "a sentimento". Uma vez obtido o semivariograma amostral, este serve de indicação visual sobre a forma e os parâmetros do modelo a ser adotado. Textos

tradicionais de geoestatística, como os de Journel & Huijbregts (1991) e Clark (1979), adotam este procedimento e ainda fazem ressalvas a respeito do uso de métodos automáticos de ajuste. Literaturas como Isaaks & Srisvastava (1989) e Cressie (1993) discutem outras formas de ajuste, mas ainda consideram a utilização do ajuste a sentimento.

De acordo com Ribeiro Junior (1995), o método de ajuste de modelos de semivariogramas por quadrados mínimos ordinários é insensível ao que se pretende no ajuste, porém é o de implementação mais fácil. Por outro lado, um criterioso procedimento é o uso de quadrados mínimos generalizados, que exige um processo iterativo, de implantação mais difícil.

Com a apresentação e discussão de métodos de ajuste mais fundamentados e na medida em que recursos computacionais se tornem mais disponíveis, a tendência é que o método de ajuste a sentimento seja cada vez menos utilizado, devido à demora para se fazer o ajuste.

Já existem softwares adequados à geoestatística que têm atendido às necessidades da modelagem direta do semivariograma, porém, este modelo ajustado pode não ser o melhor para aquela variável em estudo, e isso, só poderá ser visível, quando o ajuste for realizado por softwares que fazem ajustes “a sentimento”.

Dependendo do comportamento da $\gamma(h)$ para altos valores de h , os modelos básicos e usuais podem ser classificados em modelos com patamar (“sill”) e modelos sem patamar.

2.3.3 Modelos com patamar

São ajustes que representam a hipótese de estacionaridade de segunda ordem, onde a semivariância aumenta com o aumento da distância entre amostras, até atingir o patamar, onde se estabiliza (Machado, 1994). Este patamar deve ser teoricamente igual à variância da população.

Segundo Vieira (2000), modelos com patamar apresentam os seguintes parâmetros: C_0 como efeito pepita; C_0+C_1 é o patamar e a é o alcance de semivariograma (Figura 2).

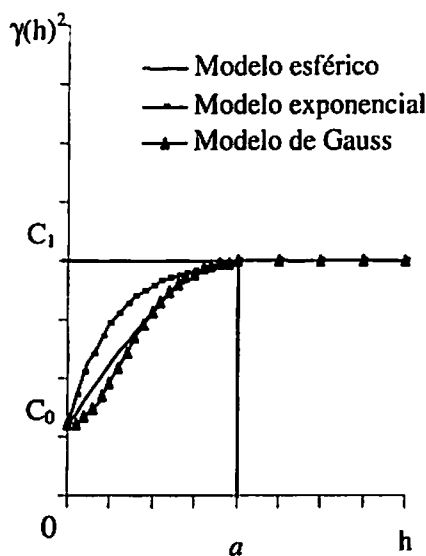


FIGURA 2. Representação gráfica dos modelos esférico, exponencial e Gauss.
Fonte: Modificado de Isaaks & Srivastava, (1989).

Dentre estes modelos destacam-se:

i) Modelo esférico:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right]; 0 < h < a \quad (05)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1; h \geq a \quad (06)$$

Segundo Vieira (2000), o modelo é obtido selecionando-se os valores do efeito pepita (C_0) e do patamar (C_0+C_1). Depois, traça-se uma reta que intercepta o eixo y em C_0 e que seja tangente aos primeiros pontos próximos de $h=0$. Essa

reta cruzará o patamar à distância $a' = (2/3)a$. Assim, o alcance (a) será $a = (3/2)a'$. O modelo esférico é linear até aproximadamente $(1/3)a$.

ii) Modelo exponencial:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-3\frac{h}{a}\right) \right]; 0 < h < d \quad (07)$$

em que d é a máxima distância, na qual o semivariograma é definido. Segundo Vieira (2000), uma diferença fundamental entre o modelo exponencial e o esférico é que o exponencial atinge o patamar apenas assintoticamente, enquanto o modelo esférico atinge no valor do alcance. O parâmetro a é determinado visualmente com distância, após a qual o semivariograma se estabiliza.

iii) Modelo gaussiano:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-3\left(\frac{h}{a}\right)^2\right) \right]; 0 < h < d \quad (08)$$

A característica que distingue o modelo gaussiano é o seu comportamento parabólico próximo à origem. É o único modelo que apresenta, em sua forma, um ponto de inflexão (Isaaks & Srivastava, 1989).

2.3.4 Modelos sem patamar

Segundo Vieira (2000), esses modelos correspondem aos fenômenos que têm uma capacidade infinita de dispersão e, por isso, não têm variância finita e a covariância não pode ser definida, atendendo assim somente a hipótese intrínseca. Os semivariogramas podem ser definidos, mas não se estabilizam em nenhum patamar (Rendu citado por Machado, 1994).

Os modelos potenciais estão representados na Figura 3.

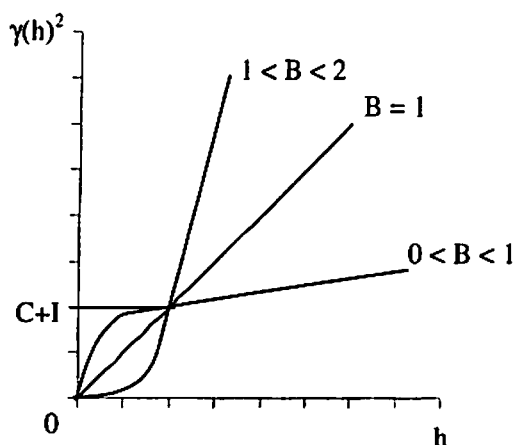


FIGURA 3. Representação gráfica do modelo potencial em h^B (Journel & Huijbregts, 1991).

i) Modelos potenciais:

$$\gamma(h) = C + I \cdot h^B; 0 < B < 2 \quad (09)$$

em que "I" representa a inclinação do modelo

Obtido o semivariograma experimental para o conjunto de valores de uma propriedade e ajustado um modelo matemático para este, tem-se uma função contínua que descreve a dependência espacial da propriedade, sendo de grande utilidade para a compreensão de vários aspectos de variabilidade espacial.

De maneira geral, o ajuste de modelos deve levar em consideração o número de pares de pontos que compõem o semivariograma $\gamma^*(h)$. Não se deve dar importância excessiva às pequenas flutuações, que podem ser artifícios referentes a um pequeno número de dados. É importante que o modelo ajustado represente a real tendência de $\gamma(h)$ em relação a h , que está diretamente ligado à forma de amostragem no campo e sua relação espacial.

2.4 Atributos do solo

O estudo das características e propriedades do solo que afetam direta ou indiretamente o comportamento da água no solo é de fundamental importância para o manejo adequado, principalmente, na solução de problemas relacionados à irrigação, à drenagem e à conservação do solo e da água (Freire, 1979). Segundo Gurovich citado por Moraes (1991), é comum encontrar em um campo que se maneja como uma única unidade agrônômica, diferenças de uma, duas ou três ordens de grandeza no valor de um parâmetro, entre pontos separados de poucos metros. Os valores médios de atributos físicos que variam em intervalos com esta amplitude, podem não apenas ser de pouca utilidade, mas também levar a decisões de manejo de alto risco, podendo causar danos mais ou menos permanentes no sistema solo-água-planta, e mesmo prejuízos econômicos relacionados ao uso de recursos produtivos e a posterior resposta de rendimento das culturas, Machado (1994).

2.4.1 Textura

Segundo Brady (1989), a textura do solo constitui-se numa das características físicas mais estáveis e representa a distribuição quantitativa das partículas do solo quanto ao tamanho (argila, areia e silte), sendo considerada elemento de grande importância na decisão, identificação e classificação do solo.

2.4.2 Densidade do solo

A densidade do solo é um parâmetro importante na caracterização de um solo, fornecendo informação indireta sobre a estrutura, porosidade, armazenamento e condução de água (Reichardt, 1985).

Segundo Archer & Smith (1972), variações na densidade do solo afetam a disponibilidade de água e a capacidade de aeração e influenciam, fortemente, a permeabilidade, taxa de drenagem e a penetração de raízes de plantas.

2.4.3 Densidade de partículas

A densidade de partículas ou densidade real do solo mostra a relação existente entre a massa total de sólidos e o volume total de sólidos, excluindo-se os espaços porosos entre as partículas (Blake, 1965), e dependerá diretamente da constituição química e mineralógica das partículas, do seu grau de hidratação, do teor de matéria orgânica e da presença de outros minerais (Baver et al., 1972).

2.4.4 Porosidade

A porosidade do solo é a propriedade que interfere na aeração, condução e retenção de água, capacidade de penetração e ramificação das raízes no solo e, conseqüentemente, no aproveitamento de água e nutrientes disponíveis, (Tognon, 1991).

Segundo Queiroz (1995), a relação de poros existentes em um dado volume do solo é chamada de porosidade total, a qual está diretamente relacionada com o tamanho de suas partículas sólidas e podem ser classificadas em macro e microporosidade. Oliveira (1968) utiliza como limite de separação entre a macro e microporosidade uma tensão de 6 kPa, a qual corresponde aos poros com diâmetros da ordem de 50 μm , ou seja, poros com diâmetros menores que 50 μm são considerados microporos.

A porosidade do solo está relacionada com sua textura, estrutura e teor de matéria orgânica. Solos de textura fina possuem maior volume total de poros (VTP) e seu alto volume de microporos lhe confere boa retenção de umidade e menor drenagem. Apesar de um solo arenoso apresentar porosidade total relativamente reduzida, a movimentação da água e do ar é mais rápida devido ao

predomínio de macroporos, que permitem maior movimento da água e do ar (Brady, 1989).

De acordo com Grohmann (1975), a porosidade de um solo normalmente apresenta valores entre 40-60%, variando, principalmente, em função da textura e estrutura. Um solo ideal, segundo o autor, seria aquele que tivesse seu espaço poroso dividido de maneira semelhante entre macro e microporos garantindo boas condições de aeração, permeabilidade e retenção de água.

Scardua (1972) cita trabalhos que mostram que a macroporosidade deve situar-se entre 10-20% para a maioria das culturas, sendo que valor abaixo de 5% torna-se deletérios para as plantas.

2.4.5 Permeabilidade Intrínseca (K')

A permeabilidade intrínseca (K') é uma constante para qualquer material permeável com determinadas características de porosidade e é independente das propriedades físicas do líquido percolante, (Luthin, 1978).

A permeabilidade intrínseca do solo (K') pode ser determinada pela equação descrita por Reichardt (1975) e Luthin (1978):

$$K' = \frac{K_o \cdot \eta}{\rho \cdot g} \quad (10)$$

em que:

K' = permeabilidade intrínseca do solo;

Ko = condutividade hidráulica do solo saturado;

ρ = massa específica da água;

g = aceleração da gravidade;

η = viscosidade dinâmica da água.

2.5 Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo

Os atributos físico-hídricos do solo são bem caracterizados em estudos na Ciência do Solo, mas os trabalhos que os relacionam com suas respectivas variabilidades são ainda bastante reduzidos.

Machado (1994), estudando uma hidrosequência de solos bem a muito mal drenados, não conseguiu identificar a estrutura de variação dos dados para o solo Glei Pouco Húmico, para grande parte dos atributos estudados, possivelmente em função da própria natureza de formação deste solo. Já para o Latossolo Vermelho-Amarelo, houve a identificação da estrutura de dependência espacial para a maioria dos atributos estudados, concluindo que o uso da geoestatística se fez necessário para amostragens com espaçamento inferior a 9 m.

Estudando a variabilidade espacial de atributos físico-hídricos em solo Aluvial na mesma área onde foi conduzido este trabalho, Eguchi (2001) conclui que existe uma notória dependência espacial dos atributos obtidos com amostragens deformadas e indeformadas. A argila foi a variável textural que apresentou maior dependência espacial, com base na relação alcance e patamar, com ajuste do modelo Gaussiano e alcance de 49,50 m; já a macroporosidade com ajuste ao modelo esférico apresentou o menor alcance, igual a 2,00 m. Para densidade média de partículas esse autor não conseguiu encontrar um ajuste de modelo teórico de semivariograma.

Estudos realizados por Anderson & Cassel (1986), com o objetivo de determinar a estrutura de autocorrelação, para as propriedades físicas de um solo mal drenado, evidenciaram a presença de dependência espacial a curtas distâncias, geralmente menor ou igual a 2 m, para os parâmetros: condutividade hidráulica, retenção de água, textura e densidade do solo. Foram observados

também coeficientes de variação acima de 30% para silte, areia e condutividade hidráulica.

Estudos sobre a variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho-Amarelo realizados por Carvalho (1991), utilizando a geoestatística, mostram semivariograma, com ajuste dos modelos linear e esférico, obtidos a partir de dados coletados em uma malha quadriculada com 100 pontos amostrais separados por uma distância de 10 m. Este espaçamento em alguns casos não possibilitou a identificação de estrutura no semivariograma, sendo sugerido pela autora uma pré-amostragem com espaçamento de 2m.

Ribeiro Junior (1995) estudou a variabilidade da densidade do solo de 250 pontos dispostos em uma malha regular (10 x 25), separados por 5 m, chegando a conclusão de que malhas regulares, embora muito úteis, podem ser modificadas a fim de captar as estruturas a pequenas distâncias, como no caso da densidade do solo onde não se teve informação do que acontece a distâncias inferiores a 5 m e que o plano amostral adequado pode variar para cada propriedade em estudo.

Gonçalves (1997), em seus estudos da variabilidade espacial de propriedades físicas do solo para fins de manejo da irrigação, concluiu que as propriedades estudadas apresentaram distribuição normal. Densidade de partículas e porosidade total não mostraram dependência espacial. Densidade do solo e umidade na saturação mostraram dependência espacial em pequenas distâncias com efeito pepita acima de 50 % do patamar. Frações granulométricas também apresentaram dependência espacial com alcance em torno de 20 m.

Queiroz (1995) adotou um esquema de amostragem sistemática numa área de 10 m x 90 m, quadriculada, com espaçamento de 3,33 m entre colunas e 5,00 m entre linhas, totalizando 84 pontos, para avaliar os parâmetros hidrodinâmicos de um solo de várzea para fins de drenagem subterrânea. As análises estatísticas mostraram que a condutividade hidráulica do solo saturado

apresentou distribuição log-normal, alta variabilidade e estrutura de dependência espacial com alcance médio de 14 m, enquanto que a porosidade drenável apresentou distribuição normal, variabilidade elevada, porém inferior à condutividade hidráulica e dependência espacial com alcance médio de 22 m.

A quantificação da variabilidade espacial é útil para mapeamento de áreas de interesse com o uso da krigagem, e também permite avaliar e planejar amostragens futuras com menor ou maior intensidade, de acordo com a finalidade desejada.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e clima do município ✓

O município de Lavras está localizado na região Sul do Estado de Minas Gerais, a 21°15' de latitude sul e a 45° de longitude oeste. O tipo climático da região, segundo a classificação de Koppen, é Cwb, com chuvas irregularmente distribuídas ao longo do ano, havendo excesso de água nos meses de novembro a março e deficiência no período de abril a agosto (Villela & Ramalho, 1979).

3.2 Característica da área em estudo ✓

O experimento foi conduzido no Sítio Santa Cruz localizado na margem direita do Ribeirão Santa Cruz, próximo a uma estação elevatória da COPASA, no município de Lavras-MG. Esta área vem sendo utilizada, atualmente, para pastagem, estando coberta por vegetação natural.

Após a classificação dos solos da área experimental, foi traçada uma transeção de 196 m perpendicular ao curso do Ribeirão Santa Cruz, compreendendo as seguintes classes de solos: Neossolo Flúvico (RU), Cambissolo (C), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Gleissolo Háptico (GX) e Gleissolo Melânico (GM), segundo Embrapa (1999). Foi também levantado o perfil da transeção estudada, mostrando o comprimento, a localização de cada classe de solo na transeção e sua topografia (Figura 4).

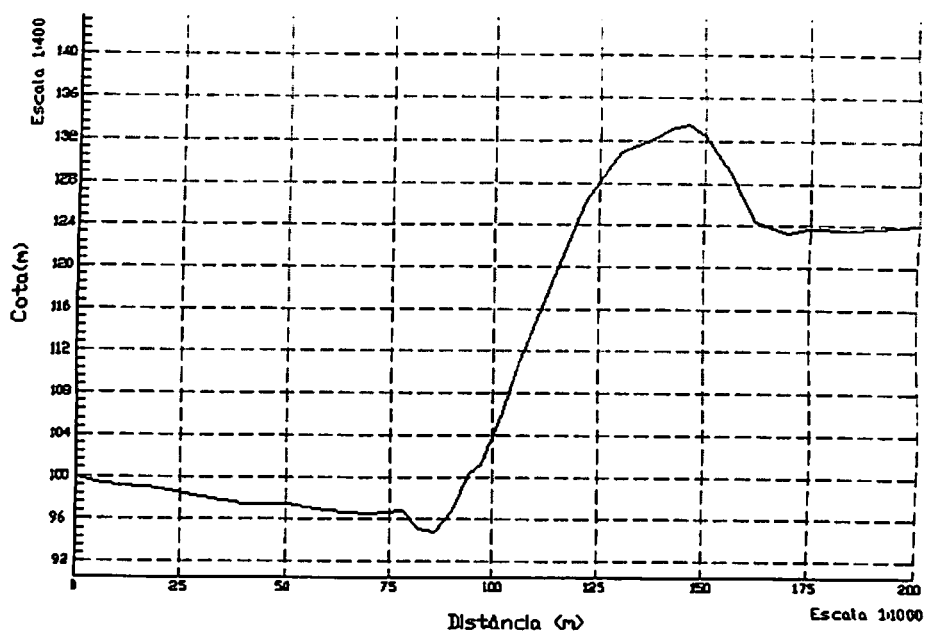


FIGURA 4. Perfil da transeção estudada. Lavras, MG, 2003.

TABELA 1. Comprimento das classes de solos estudadas na transeção. Lavras, MG, 2003.

Distância Horizontal (m)	Classificação Antiga	Classificação Atual (EMBRAPA 1999)
0 --- 92	Aluvial	Neossolo Flúvico (RU)
92 --- 98	Cambissolo	Cambissolo (C)
98 --- 160	Podzólico Vermelho-Amarelo	Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA)
160 --- 172	Glei Pouco Húmico	Gleissolo Háplico (GX)
172 --- 196	Glei Húmico	Gleissolo Melânico (GM)

3.3 Amostragem

As amostragens foram realizadas de forma sistemática, com espaçamentos regulares, variando de 0,25 m a 16,00 m, constituindo uma

transeção de 196 m de comprimento e um total de 68 pontos amostrais (Figura 5).

Em cada ponto experimental, representado na Figura 5, foram realizadas as medições com o permeâmetro de Guelph e as coletas das amostras (deformadas e indeformadas) na camada de 0 – 15 cm, seguindo os procedimentos recomendados para cada atributo.

Os procedimentos para a coleta de amostras e as análises de laboratório foram realizados de acordo com recomendações de Dias Júnior et al. (2000).

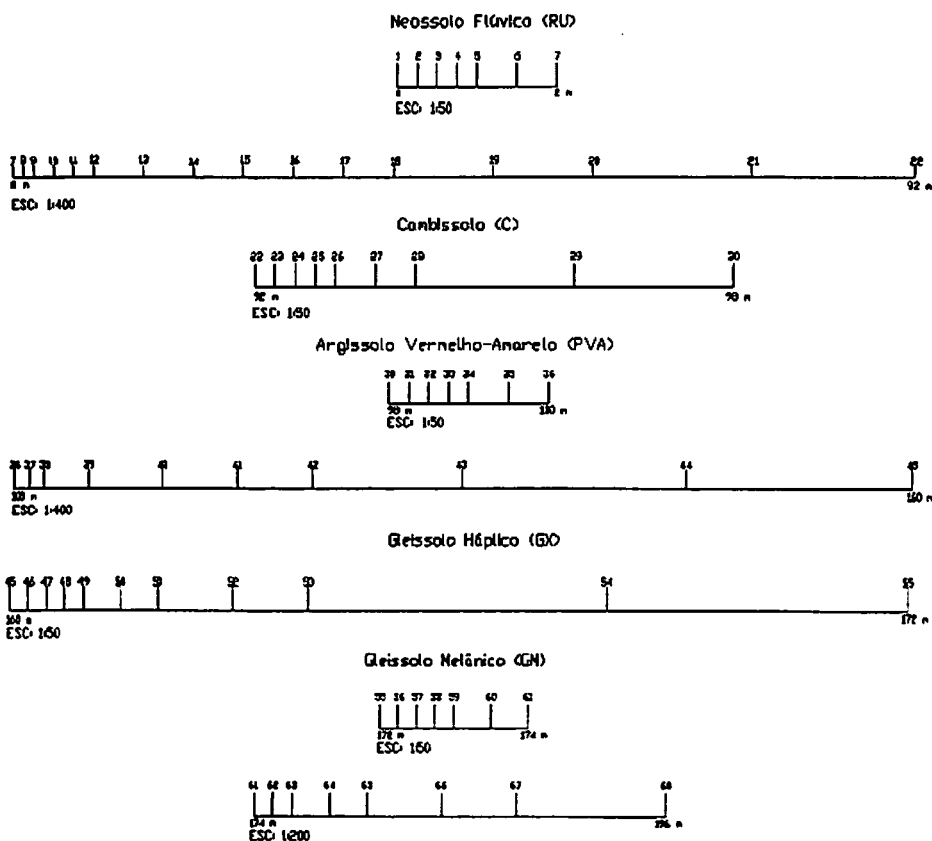


FIGURA 5. Esquema de amostragem na transeção. Lavras, MG, 2003.

3.3.1 Permeabilidade intrínseca (K') ✓

Para a determinação da permeabilidade intrínseca foi primeiramente determinada a condutividade hidráulica do solo saturado (K_o) utilizando o permeâmetro de Guelph modelo 2800 da marca Soilmoisture e os procedimentos descritos em seu manual de utilização. Posteriormente os valores de K_o foram transformados em valores de K' através da Equação 10 descrita anteriormente.

O permeâmetro de Guelph é composto de dois reservatórios concêntricos. O externo funciona com o princípio de “Mariotte”, que controla a carga hidráulica dentro do furo no solo; o reservatório interno possui uma régua graduada, onde se faz o acompanhamento do fluxo da água no solo.

Após algum tempo, que dependerá, dentre outros fatores, da umidade antecedente do solo e da sua textura, uma pequena área em torno do furo estará saturada e, então, o fluxo torna-se constante. Este valor de fluxo (Q) é utilizado no cálculo da condutividade hidráulica saturada (K_o).

Neste trabalho, para cada ponto de amostragem, foi feito um furo de 0,03 m de raio e 0,15 m de profundidade, com trados próprios do permeâmetro, sempre realizado pelo autor, visando a homogeneizar a condição de fluxo.

Para os cálculos da K_o , foram feitos ensaios com duas cargas hidráulicas H_1 e H_2 . Com cada carga aplicada, obtém-se os seguintes fluxos Q_1 e Q_2 . Para este estudo, fixaram-se alturas de colunas de água de 0,05 m (H_1) e 0,10 m (H_2) dentro do furo para a obtenção dos fluxos constantes Q_1 e Q_2 .

A condutividade hidráulica foi obtida pela equação proposta pelo manual de uso do permeâmetro de Guelph, apresentada a seguir:

$$K_o = G_2 Q_2 - G_1 Q_1 \quad (11)$$

em que:

$$G_2 = \frac{H_1 \cdot C_2}{\pi[2 \cdot H_1 \cdot H_2 \cdot (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 \cdot C_2 - H_2 \cdot C_1)]} \quad (12)$$

$$G_1 = G_2 \frac{[H_2.C_1]}{[H_1.C_2]} \quad (13)$$

sendo:

K_o é dada em $(cm.s^{-1})$

G_1 e G_2 é dado em (cm^2)

Q_1 e Q_2 é a recarga, fluxo necessário para manter a altura de água (H_1 e H_2) constante em $(cm^3.s^{-1})$.

H_1 e H_2 é a altura de água no furo (cm).

a é o raio do furo (cm).

C é o coeficiente de forma que considera a textura do solo.

Determinada a condutividade hidráulica saturada (K_o), esta foi utilizada para o cálculo da permeabilidade intrínseca do solo (K'), através da Equação 10.

3.3.2 Densidade de partículas (D_p) e Textura do solo

A densidade de partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico através da relação entre a massa de solo seco e o volume de solo seco (Blake, 1986b). Foi utilizado um balão de 50 ml com 20 g de terra fina seca em estufa (TFSE), cujo volume é completado com álcool etílico, obtendo-se o volume de solo pela diferença entre o volume do balão e o volume de álcool. Assim os valores de densidades de partículas foram obtidas pela relação:

$$D_p = \frac{m_s}{V_s} \quad (14)$$

em que:

D_p = densidade de partículas (g/cm^3)

m_s = massa de solo seco em estufa (g)

V_s = volume de solo seco (cm^3)

A análise textural do solo foi realizada pelo método da pipeta descrito por Day (1965), que trabalha com fração areia separada em tamiz de 0,053mm e com secagem em estufa da suspensão de argila coletada com pipeta, descontada a quantidade de hidróxido de sódio presente na amostra. ✓

3.3.3 Densidade do solo (Ds) ✓

Essa foi obtida conforme metodologia descrita por Blake (1986a), obtendo-se amostras de volume conhecido, acoplados ao cilindro de Uhland. Após serem coletadas, as amostras foram secas em estufa a temperaturas de 105-110°C, durante 24 horas. A densidade do solo foi então calculada pela relação:

$$D_s = \frac{m_s}{V} \quad (15)$$

em que:

D_s = densidade do solo (g/cm^3)

m_s = massa de solo seco em estufa (g)

V = volume do anel (cm^3)

3.3.4 Porosidade total calculada (VTPc) e Porosidade total determinada (VTPd) ✓

A porosidade total calculada ou volume total de poros calculados (VTPc) foram obtidos em percentagem, com base na equação proposta por Vomocil (1965):

$$\text{VTPc} = 100 \left(1 - \frac{D_s}{D_p} \right) \quad (16)$$

A porosidade total determinada (VTPd) foi obtida considerando o volume de água do solo saturado, ou seja, umidade de saturação (θ_s).

3.3.4.1 Microporosidade (Micro) e Macroporosidade (Macro)

A determinação da microporosidade foi realizada em amostras indeformadas, empregando-se unidades de sucção com altura de coluna de água igual a 60cm. A percentagem de água com base em volume retida nas amostras, após equilíbrio, corresponde à microporosidade do solo. A macroporosidade foi obtida pela diferença entre a porosidade total calculada (VTPc) e a microporosidade, Embrapa (1997).

3.4 Análise dos dados

As análises dos dados foram realizadas através de duas metodologias: a estatística clássica e a geoestatística.

Todos os dados dos atributos em estudo foram armazenados em planilhas eletrônicas com o seu respectivo posicionamento geográfico. Estes dados foram processados utilizando-se do software Sisvar (Ferreira, 2000) na análise da estatística clássica, e do software Variowin (Panatier, 1996) na análise da geoestatística. O Variowin foi escolhido por permitir um ajuste "a sentimento" dos modelos esférico, exponencial, gaussiano e potencial na modelagem dos semivariogramas.

3.4.1 Análises descritivas e inferências da estatística clássica

Para cada variável, realizou-se o cálculo de algumas estatísticas, visando a caracterizar a distribuição de probabilidade e verificar a variabilidade dos dados.

Utilizou-se análise descritiva para medidas de posição a média, mediana e a moda. Na análise descritiva para medidas de dispersão utilizou a amplitude total, variância, desvio padrão e o coeficiente de variação.

As normalidades das variáveis foram verificadas pelo teste de Shapiro-Wilk (1965), juntamente com as análises dos coeficientes de assimetria e curtose. Foram consideradas normais as variáveis que apresentaram valores de probabilidade de Shapiro-Wilk maiores que 5%.

Os cálculos das estatísticas utilizadas nessa metodologia foram:

- Moda (Mod)

Mod = Valor mais freqüente

- Média ($\bar{X}$)

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (17)$$

em que: $\bar{X}$ é a média amostral; x_i é o valor da i-ésima observação; n o tamanho da amostra.

- Mediana (Md)

$$Md = \frac{1}{2} [x_k + x_{k+1}] \quad (18)$$

em que: Md é a mediana; x_k e x_{k+1} é o intervalo que contém o ponto mediano dos dados ordenados.

- Amplitude (A)

$$A = x_{\max} - x_{\min} \quad (19)$$

em que: A é a amplitude total dos dados; $x_{\max}$ e $x_{\min}$ correspondem aos valores máximos e mínimos dos dados.

- Variância (s^2)

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n - 1} \quad (20)$$

- Desvio Padrão (s)

$$s = \sqrt{s^2} \quad (21)$$

- Coeficiente de variação (CV)

$$CV = \frac{s}{\bar{X}} \cdot 100 \quad (22)$$

- Coeficiente de Assimetria (Assi.)

$$Assi. = \frac{m_3}{\sqrt{m_2^3}} \quad (23)$$

em que:

$$m_t = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^t}{n} \quad \text{com } t = 1, 2, 3, \dots \quad (24)$$

- Coeficiente de Curtose (Curt.)

$$\text{Curt.} = \frac{m_4}{m_2^2} \quad (25)$$

Os valores mínimos e máximos dos dados também foram obtidos para cada variável.

3.4.2 Aplicação da teoria das variáveis regionalizadas

A geoestatística foi utilizada com o objetivo de definir o modelo de variabilidade espacial e, com isso, a dependência espacial dos atributos dos solos envolvidos na pesquisa.

Foram realizados os cálculos das semivariâncias e construídos os semivariogramas experimentais, cuja representação dos modelos foi mostrada por meio de gráficos de semivariância $\gamma(h)$ como função da distância (h).

O estimador do semivariograma utilizado foi o estimador “clássico” ou do método dos momentos, representado pela Equação 4 já descrita anteriormente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em virtude da grande quantidade de informações obtidas e a serem discutidas, optou-se pela apresentação dos resultados por classe de solo e, separadamente, por método de análise estatística. Também cabe ressaltar que a discussão dos dados para Cambissolo, Gleissolo Háplico e Gleissolo Melânico ficou prejudicada pela pequena disponibilidade de referencial bibliográfico existente.

4.1 Neossolo Flúvico (RU)

4.1.1 Análise descritiva e inferências clássicas

4.1.1.1 Densidade do solo (Ds), Densidade de Partícula (Dp) e Textura

O Neossolo Flúvico compreendeu os primeiros 92 m da transeção em estudo. A Tabela 2 mostra as estatísticas descritivas das propriedades densidade do solo, densidade de partícula e textura, para os dados obtidos em 21 pontos da transeção.

Pelos limites de coeficiente de variação proposto por Warrick & Nielsen (1980) para a classificação de variáveis do solo ($CV < 12\%$), ($12\% < CV < 60\%$) e ($CV > 60\%$) para baixa, média e alta variabilidade, respectivamente, pode-se dizer que esses atributos, mostrados na Tabela 2, são de baixa variabilidade, com exceção do atributo areia que apresentou média variabilidade. Esses resultados diferem dos encontrados por Eguchi (2001), que, estudando as variabilidades espaciais dos atributos físico-hídricos deste mesmo solo em transeção paralelo ao ribeirão, encontrou coeficientes médios para a textura e densidade do solo, sendo semelhante para densidade de partículas, que também apresentou baixo coeficiente de variação. Esperava-se que os valores dos CVs dos atributos estudados fossem maior que os encontrados por Eguchi (2001), pois a transeção

perpendicular a calha do rio favorece uma maior variação dos atributos. Isso, porque, quando todas as áreas baixas da várzea se inundam, a velocidade e a força de arraste da água são maiores quanto mais se aproximam do curso original do rio e vai diminuindo à medida que se afasta do seu leito, onde as partículas com maior tamanho e peso tendem a se precipitar em um tempo menor e se distribuir geralmente próximas a sua calha.

TABELA 2. Estatística descritiva dos dados da densidade do solo (Ds), densidade de partícula (Dp), argila, areia e silte para o Neossolo Flúvico (RU). Lavras, MG, 2003.

Parâmetros	Atributos				
Estatísticos	Ds (g/cm ³)	Dp (g/cm ³)	Argila (%)	Areia (%)	Silte (%)
n	21	21	21	21	21
$\bar{X}$	0,82	2,32	40,65	6,17	53,14
Md	0,82	2,31	40,25	6,28	53,10
Mod	0,83	2,27	39,94	6,07	53,29
s ²	0,004	0,008	5,55	2,78	7,56
s	0,064	0,089	2,35	1,67	2,75
CV	7,79	3,95	5,80	27,02	5,18
Assi.	-1,20	0,86	0,84	0,58	-0,28
Curt.	5,30	2,73	0,32	3,57	2,49
Min.	0,63	2,22	37,55	2,87	47,08
Max.	0,92	2,50	46,69	10,41	58,03
A	0,29	0,28	9,14	7,54	10,95
S.W	0,04156	0,00526	0,08524	0,46030	0,93282

n – tamanho da amostra; $\bar{X}$ – média; Md – mediana; Mod – moda; s² – variância; s – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; Assi. – coeficiente de assimetria; Curt. – coeficiente de curtose; Min. – mínimo; Max. – máximo; A – amplitude; S.W – valor de probabilidade de Shapiro-Wilk.

Na classificação da USDA, pelos valores texturais médios encontrados, o solo se classifica como argilo siltoso.

Observa-se, na Tabela 2, que os valores das medidas de tendência central (média, mediana e moda) são semelhantes para todos os atributos, o que dá indícios de simetria da distribuição dos dados, conforme Costa Neto (1990). Pelas medidas de dispersão assimetria e curtose, que apresentam resultados próximos de 0 e 3, respectivamente, e também pelo valor de probabilidade de Shapiro-Wilk acima de 5%, verifica-se que a distribuição de normalidade se confirma apenas para os atributos texturais. Esses resultados também são diferentes de Eguchi (2001), que obteve normalidade apenas para o atributo densidade de partícula. Essas diferenças nos resultados refletem a grande variabilidade em solos de várzea.

4.1.1.2 Porosidades e Permeabilidade Intrínseca (K')

Na Tabela 3, é apresentada a estatística descritiva dos demais atributos estudadas do Neossolo Flúvico, para os dados obtidos em 21 pontos amostrais, da transeção. Observando-se os coeficientes de variação, constata-se baixa variação dos dados, de acordo com o critério apresentado por Warrick & Nielsen (1980), para os atributos VTPc, VTPd e Micro, os quais apresentaram CVs 5,47 %, 6,23 % e 7,11 %, respectivamente. O atributo Macro apresentou CV médio com valor de 48,31 %. Esses resultados estão de acordo com os obtidos por Eguchi (2001). Para o atributo K' os CVs apresentaram-se altos, na ordem de 100 %. Esses resultados estão de certa forma concordantes com aqueles obtidos também por Queiroz (1995). A elevada variabilidade dos dados pode ser explicada pela heterogeneidade estrutural do solo em estudo, como também pela presença de raízes, atividade microbiana e rachaduras ocasionadas pelas épocas de estiagens, entre outros fatores, o pisoteio do gado, visto que, atualmente, a área esta sendo utilizada como pastagem.

TABELA 3. Estatística descritiva dos dados de volume total de poros calculado (VTPc), volume total de poros determinado (VTPd), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), e permeabilidade intrínseca (K') para o Neossolo Flúvico (RU). Lavras, MG, 2003.

Parâmetros	Atributos				
Estatísticos	VTPc (%)	VTPd (%)	Macro (%)	Micro (%)	K' (cm ²).10 ⁻⁷
n	21	21	21	21	21
$\bar{X}$	64,35	63,18	10,81	52,37	66,561
Md	64,46	62,40	11,34	51,79	51,535
Mod	64,22	62,19	11,95	51,47	26,845
s ²	12,38	15,47	27,28	13,85	3899,836
s	3,52	3,93	5,22	3,72	62,448
CV	5,47	6,23	48,31	7,11	93,82
Assi.	0,53	0,22	-0,28	0,94	1,36
Curt.	3,10	2,94	2,29	3,08	4,52
Min.	59,05	56,43	0,17	47,37	4,849
Max.	73,15	72,56	19,02	60,64	249,953
A	14,10	16,13	18,85	13,27	245,103
S.W	0,64525	0,63079	0,65341	0,03359	0,00487

n – tamanho da amostra; $\bar{X}$ – média; Md – mediana; Mod – moda; s² – variância; s – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; Assi. – coeficiente de assimetria; Curt. – coeficiente de curtose; Min. – mínimo; Max. – máximo; A – amplitude; S.W – valor de probabilidade de Shapiro-Wilk.

A semelhança entre os valores de média, mediana e moda indica a simetria da distribuição dos dados para as propriedades VTPc, VTPd, Macro e Micro, uma vez que na distribuição normal a média aritmética e a mediana são iguais segundo Costa Neto (1990), porém, ao analisar as medidas de dispersão assimetria e curtose, juntamente com o valor de probabilidade de Shapiro-Wilk, constata-se que apenas VTPc, VTPd e Macro possuem distribuição normal dos dados. Essa constatação confirma em parte os resultados obtidos por Eguchi (2001), que não obteve normalidade para o caso dos dados VTPd.

Os valores médios dos atributos VTPc, VTPd, Macro e Micro são também muitos semelhantes aos obtidos por Eguchi (2001).

4.1.2 Análise da variabilidade espacial por meio de semivariogramas

Em função da grande diversidade de atributos estudados, optou-se pela apresentação da análise espacial por atributos do solo.

4.1.2.1 Densidade do solo (Ds)

Na Tabela 4, são apresentados os parâmetros característicos dos modelos ajustados aos semivariogramas, mostrando a dependência espacial obtida da Ds do Neossolo Flúvico ao longo da transeção. Os semivariogramas experimentais são apresentados na Figura 6. A parte A da Figura 6 mostra o semivariograma para toda a extensão do Neossolo Flúvico na transeção. Como se pode observar, não foi possível o ajuste de nenhum modelo teórico. Já na parte B da Figura 6, foi feito um “zoom” nos primeiros 16 m deste solo, onde foi possível ajustar o modelo esférico com alcance de 1,65 m. Eguchi (2001), encontrou em seus estudos um alcance de 8,00 m para densidade do solo. Esses resultados vêm a confirmar o que já era esperado, uma maior variabilidade na estrutura espacial,

quando se estuda uma transeção em solos de várzeas perpendicular a calha do ribeirão.

O efeito pepita relativo foi de 10 %, sendo segundo Cambardella et al. (1994), classificado como forte a dependência espacial para este alcance.

TABELA 4. Parâmetros do semivariograma ajustado aos dados experimentais de densidade do solo (Ds) em g/cm^3 , do Neossolo Flúvico. Lavras, MG, 2003.

Atributo	Geoestatística				
	Modelo	C_0	C_0+C_1	a	$C_0/(C_0+C_1)$
Ds	Esférico	0,0002	0,002	1,65	0,10

C_0 – efeito pepita; $C_0 + C_1$ – patamar; a – alcance (m); $C_0/(C_0 + C_1)$ – efeito pepita relativo (%).

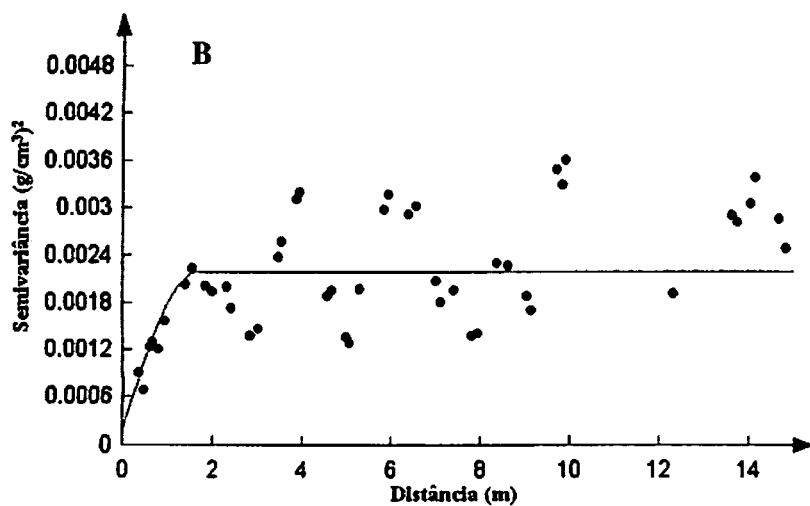
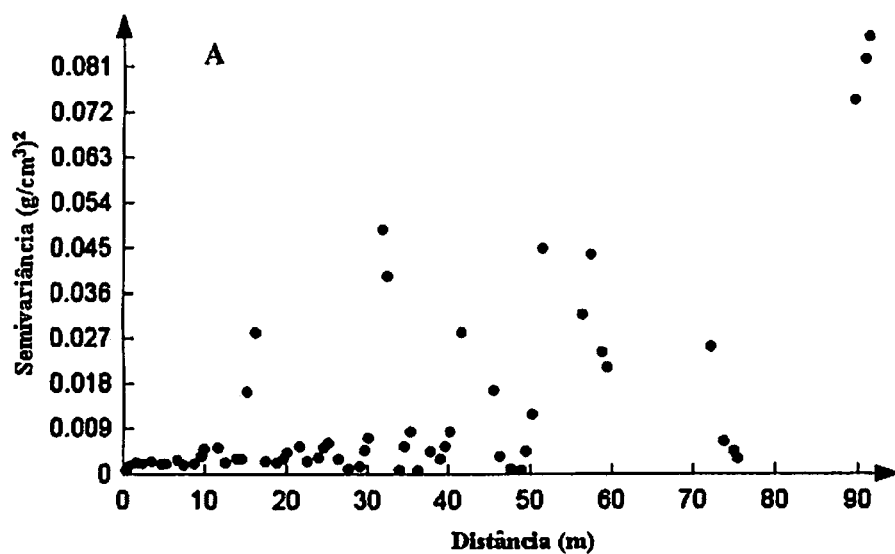


FIGURA 6. Semivariograma sem ajuste (A) e Esférico (B) para a densidade do solo do Neossolo Flúvico. Lavras, MG, 2003.

4.1.2.2 Densidade de Partícula (Dp)

Para a densidade de partícula do Neossolo Flúvico, não foi possível um ajuste (Figura 7). Esta constatação foi feita também por Eguchi (2001). A densidade de partícula é um atributo, que raramente sofre influência do manejo do solo, ou do pisoteio do gado, como é o caso da área estudada. Esse atributo é influenciado pela contribuição dos materiais depositados, vindo com as enchentes que a possível área tenha sofrido. Segundo Silva (1988), para esses dados, onde não se obteve nenhum ajuste de modelo teórico, tem-se uma distribuição completamente aleatória e a única estatística aplicável é a estatística clássica.

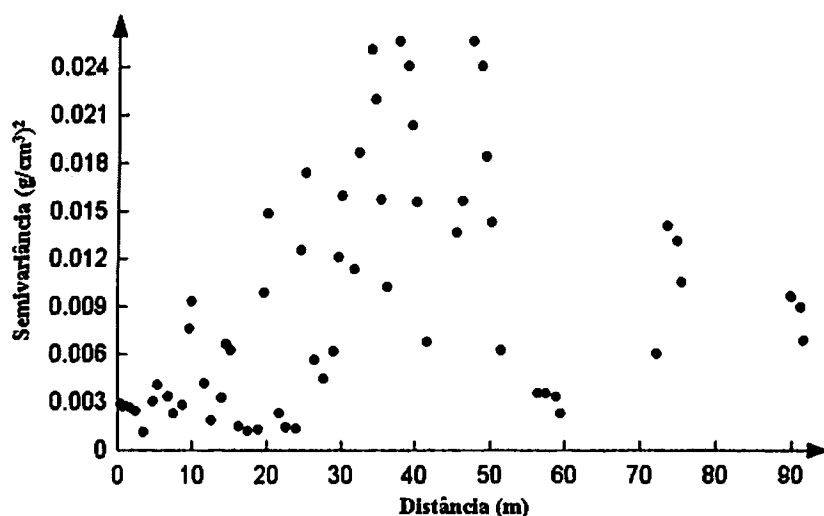


FIGURA 7. Semivariograma sem ajuste para densidade de partícula do Neossolo Flúvico. Lavras, MG, 2003.

4.1.2.3 Textura

Na Tabela 5, são apresentados os parâmetros característicos do modelo ajustado ao semivariograma, mostrando a dependência espacial obtida para o atributo argila do Neossolo Flúvico, ao longo da transeção. Os semivariogramas experimentais encontram-se nas Figuras 8, 9 e 10. Como se pode notar, o único atributo textural, que obteve ajuste a um modelo teórico, foi a argila.

A Figura 8 B mostra um “zoom” realizado para o atributo argila nos primeiros 7 m do Neossolo Flúvico, onde foi possível o ajuste do modelo Gaussiano com alcance de 6,51 m. Pelo valor do efeito pepita relativo 31 %, é classificada como moderada a dependência espacial, segundo Cambardella et al. (1994). Este mesmo “zoom” foi realizado para os outros atributos texturais, mas não obteve nenhum ajuste, o que demonstra aleatoriedade na distribuição dos dados, indicando alta variabilidade espacial. Esses resultados diferem dos encontrados por Eguchi (2001), que obteve uma forte dependência espacial, segundo critério de Cambardella et al. (1994), para todos os atributos texturais, chegando a um alcance de 49,50 m para argila com ajuste do modelo Gaussiano.

Como se observa, modelo Gaussiano ajustado para argila foi o mesmo obtido por Eguchi (2001), mas com uma enorme diferença entre os alcances, isso reforça a grande variabilidade espacial quando se estuda uma transeção de solos de várzeas perpendicular a calha de um rio.

TABELA 5. Parâmetros do semivariograma ajustado aos dados experimentais de argila, em %, do Neossolo Flúvico. Lavras, MG, 2003.

Atributos	Geoestatística				
	Modelo	C_0	C_0+C_1	a	$C_0/(C_0+C_1)$
Argila	Gaussiano	1,46	4,64	6,51	0,31

C_0 – efeito pepita; $C_0 + C_1$ – patamar; a – alcance (m); $C_0/(C_0 + C_1)$ – efeito pepita relativo (%).

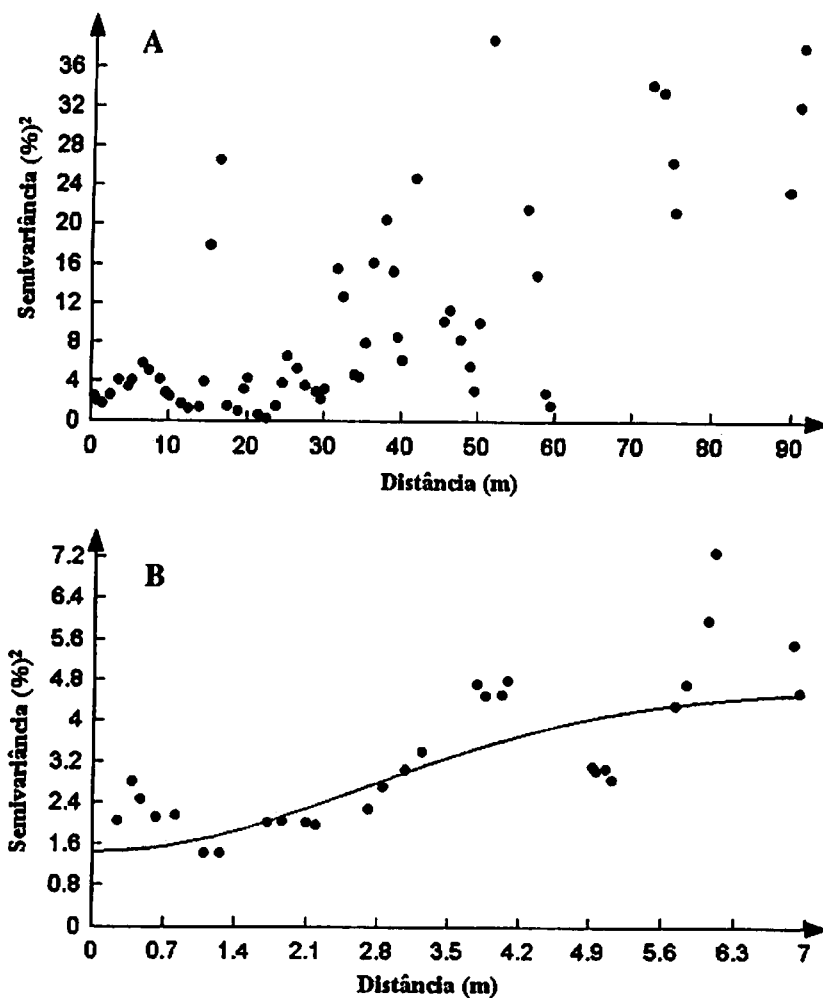


FIGURA 8. Semivariograma sem ajuste (A) e Gaussiano (B) para argila do Neossolo Flúvico. Lavras, MG, 2003.

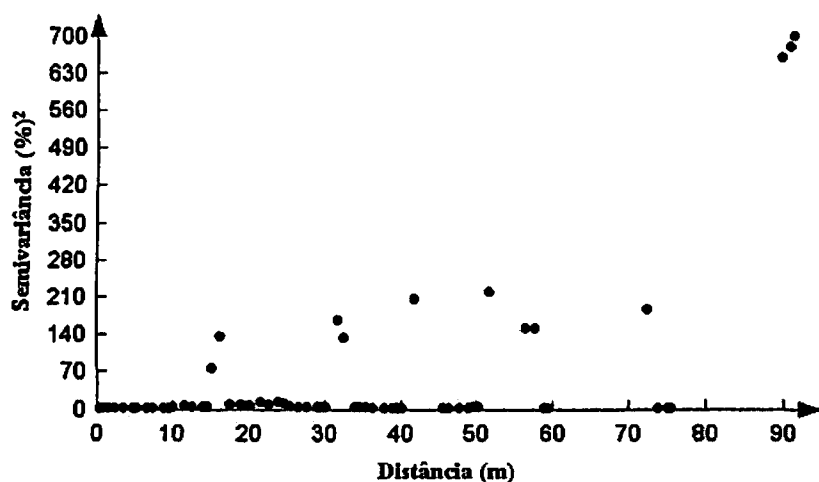


FIGURA 9. Semivariograma sem ajuste para areia do Neossolo Flúvico. Lavras, MG, 2003.

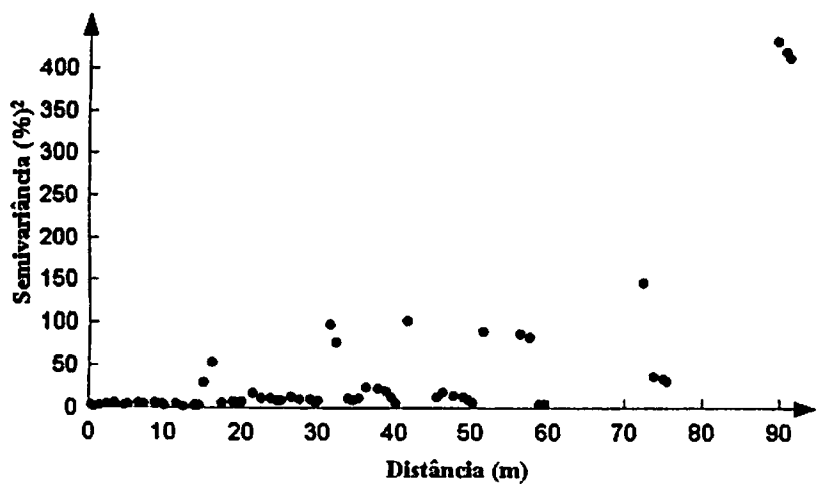


FIGURA 10. Semivariograma sem ajuste para silte do Neossolo Flúvico. Lavras, MG, 2003.

4.1.2.4 Volume Total de Poros Calculados (VTPc) e Determinados (VTPd)

Na Tabela 6, são apresentados os parâmetros característicos dos modelos ajustados aos semivariogramas, mostrando a dependência espacial obtida de VTPc e VTPd para o Neossolo Flúvico, ao longo da transeção. Os semivariogramas experimentais são apresentados nas Figuras 11 e 12.

Nas Figuras 11 B e 12 B, foi realizado um “zoom” nos primeiros 24 m da transeção para se obter um ajuste nos semivariogramas. Obteve-se um ajuste do modelo esférico para VTPc e VTPd com alcance de 2,30 m e 2,16 m, respectivamente.

O mesmo modelo de ajuste e praticamente o mesmo alcance apresentado para VTPc e VTPd mostram ser parâmetros muito parecidos. Observando as Figuras 11 A e 12 A, esta semelhança entre os dois atributos fica mais evidenciada.

A dependência espacial para VTPc e VTPd é classificada, respectivamente, como forte e moderada, segundo Cambardella et al. (1994), pelo critério de efeito pepita relativo.

TABELA 6. Parâmetros dos semivariogramas ajustados aos dados experimentais de volume total de poros calculados (VTPc) e determinados (VTPd) em %, do Neossolo Flúvico. Lavras, MG, 2003.

Atributos	Geoestatística				
	Modelo	C_0	C_0+C_1	a	$C_0/(C_0+C_1)$
VTPc	Esférico	1,38	6,44	2,30	0,21
VTPd	Esférico	5,52	12,00	2,16	0,46

C_0 – efeito pepita; C_0+C_1 – patamar; a – alcance (m); $C_0/(C_0+C_1)$ – efeito pepita relativo (%).

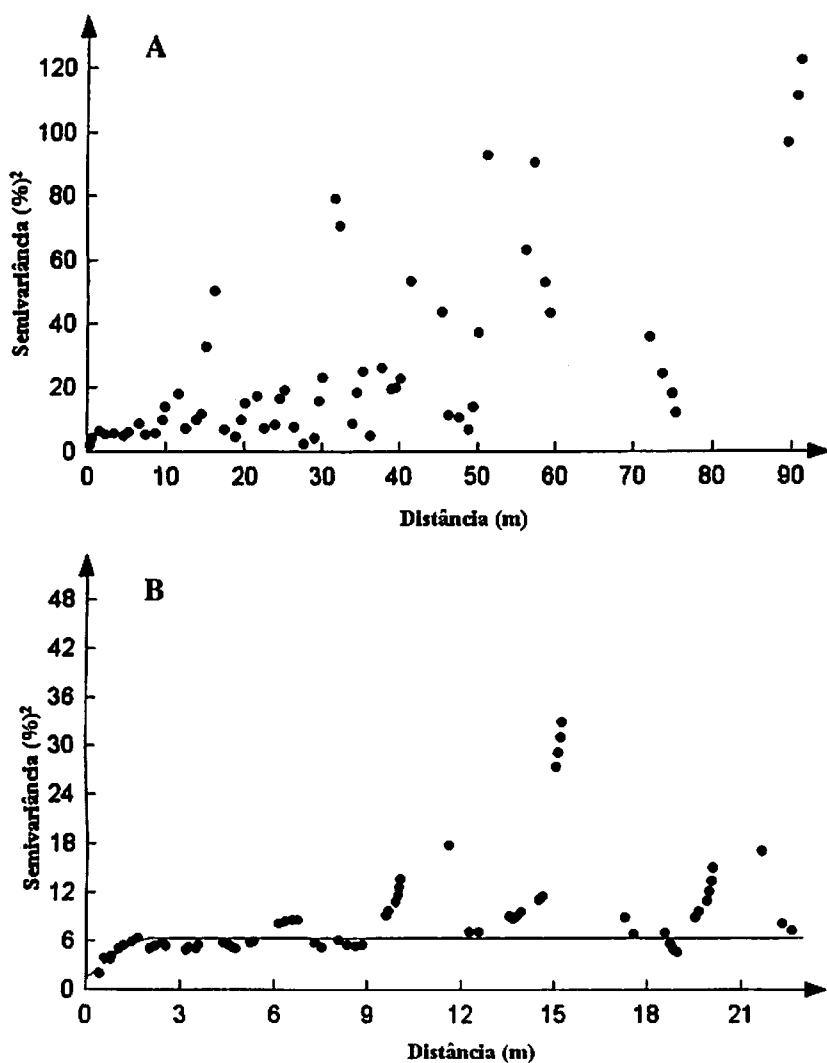


FIGURA 11. Semivariograma sem ajuste (A) e esférico (B) para VTPc do Neossolo Flúvico. Lavras, MG, 2003.

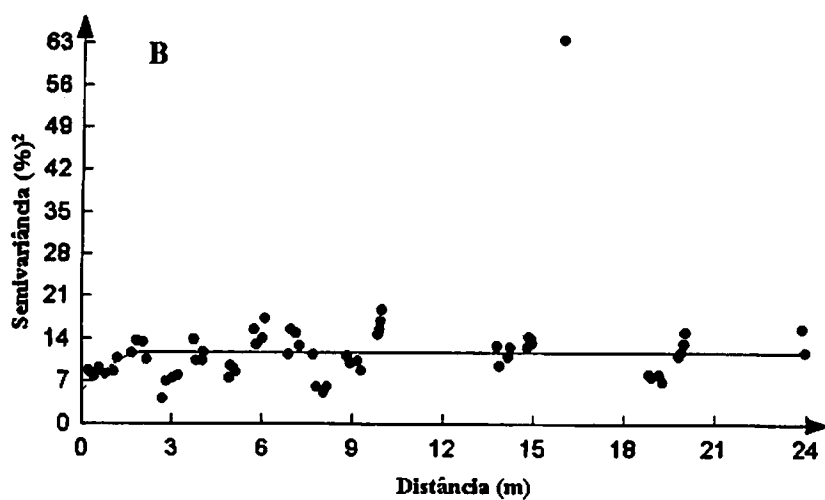
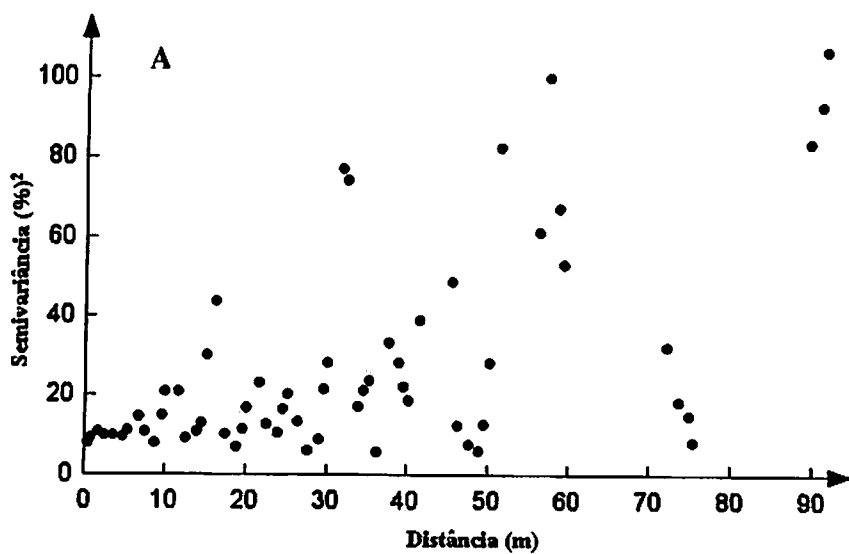


FIGURA 12. Semivariograma sem ajuste (A) e esférico (B) para VTPd do Neossolo Flúvico. Lavras, MG, 2003.

Eguchi (2001) em seus estudos, ajustou um modelo exponencial para estes atributos com uma forte dependência espacial e com alcance superior a 12 m. Isso vem realçar ainda mais o que já foi confirmado anteriormente pelos outros atributos estudados, ou seja, um menor alcance, com isso menor dependência espacial e uma maior variabilidade espacial do solo, quando se estuda atributos físico-hídricos perpendiculares a calha do rio e, principalmente, em solos de várzeas.

4.1.2.5 Macroporosidade (Macro) e Microporosidade (Micro)

Na Tabela 7, são apresentados os parâmetros característicos dos modelos ajustados aos semivariogramas, mostrando a dependência espacial obtida de Macro e Micro para Neossolo Flúvico, ao longo da transeção. Os semivariogramas experimentais são apresentados nas Figuras 13 e 14.

TABELA 7. Parâmetros dos semivariogramas ajustados aos dados experimentais de macroporosidade (Macro) e microporosidade (Micro) em %, do Neossolo Flúvico. Lavras, MG, 2003.

Atributos	Geoestatística				
	Modelo	C_0	C_0+C_1	a	$C_0/(C_0+C_1)$
Macro	Esférico	4,93	24,65	4,60	0,20
Micro	Esférico	0,14	3,50	0,87	0,04

C_0 – efeito pepita; $C_0+ C_1$ – patamar; a – alcance (m); $C_0/(C_0+ C_1)$ – efeito pepita relativo (%).

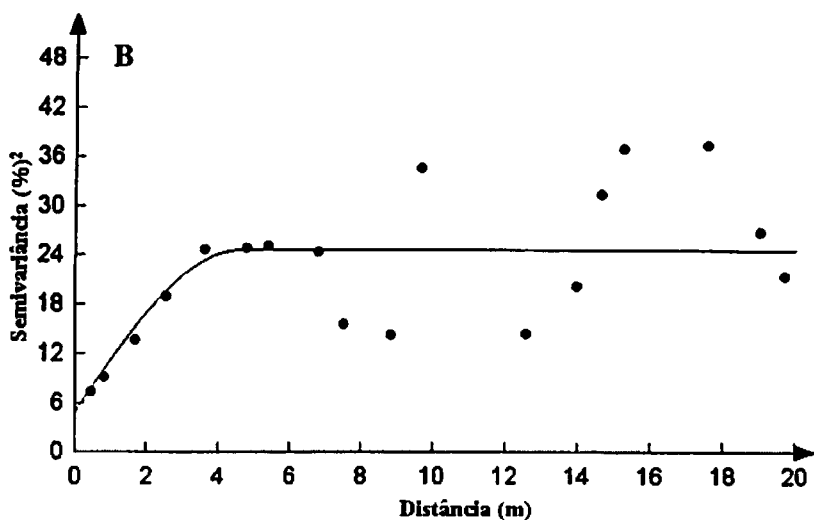
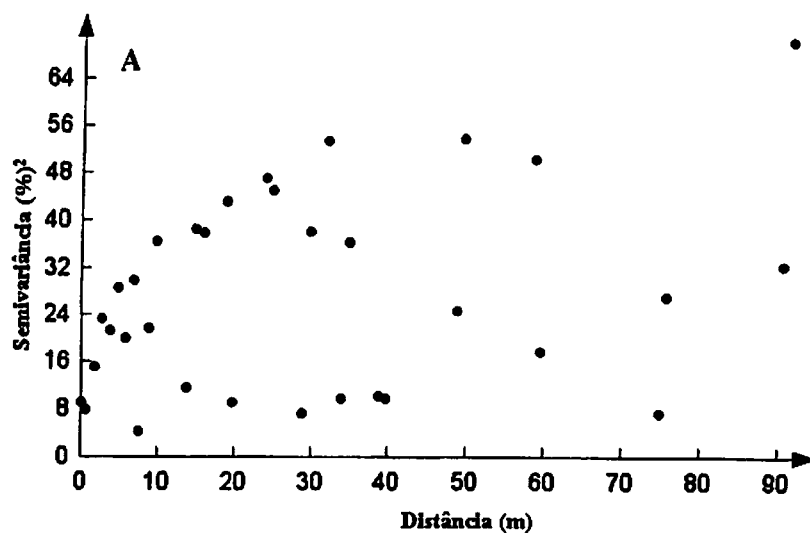


FIGURA 13. Semivariograma sem ajuste (A) e esférico (B) para Macroporosidade do Neossolo Flúvico. Lavras, MG, 2003.

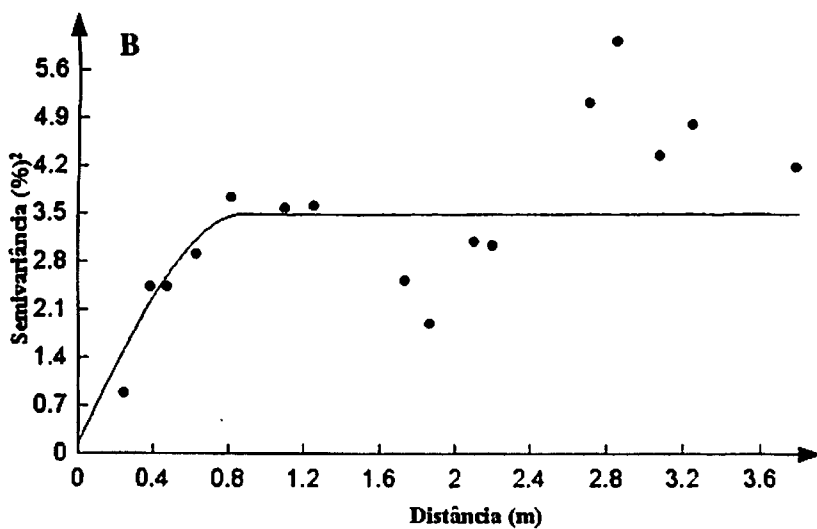
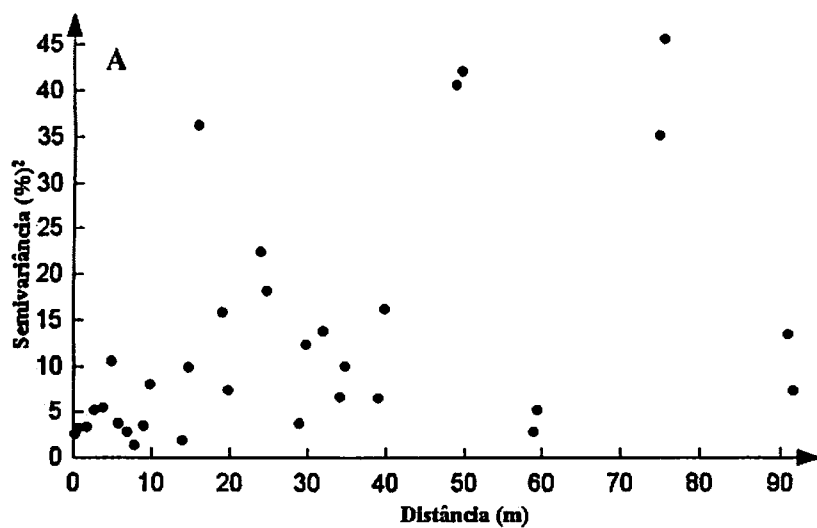


FIGURA 14. Semivariograma sem ajuste (A) e esférico (B) para Microporosidade do Neossolo Flúvico. Lavras, MG, 2003.

Como anteriormente, devido à alta variabilidade espacial, não foi possível ajustar nenhum modelo teórico para toda a extensão do Neossolo Flúvico na transeção (Figuras 13 A e 14 A). Então, foi realizado um “zoom” para procurar dependência espacial a menores distâncias. (Figuras 13 B e 14 B). Para a Macro e Micro, foi ajustado um modelo esférico, com alcance de 4,60 m e 0,87 m, respectivamente, com forte dependência espacial segundo Cambardella et al. (1994). Eguchi (2001), em seus estudos, conseguiu para Macro um ajuste dos dados experimentais ao modelo esférico com alcance de 2,00 m, para Micro um ajuste exponencial com alcance de 12,50 m, todas com forte dependência espacial. A maior dependência espacial obtida neste estudo para o atributo Macro em relação ao trabalho de Eguchi (2001) pode ser devido à influencia do pisoteio do gado, uma vez que a área experimental vem sendo utilizada como pastagem.

4.1.2.6 Permeabilidade Intrínseca (K')

Na Tabela 8, são apresentados os parâmetros característicos do modelo ajustado ao semivariograma, mostrando a dependência espacial obtida de K' para Neossolo Flúvico, ao longo da transeção. O semivariograma experimental é apresentado na Figura 15.

TABELA 8. Parâmetros do semivariograma ajustado aos dados experimentais de permeabilidade intrínseca em (cm²), do Neossolo Flúvico. Lavras, MG, 2003.

Atributo	Geoestatística				
	Modelo	C ₀	C ₀ +C ₁	a	C ₀ /(C ₀ +C ₁)
K'	Esférico	0	2,72.10 ⁻¹¹	0,70	0

C₀ – efeito pepita; C₀+ C₁ – patamar; a – alcance (m); C₀/(C₀+ C₁) – efeito pepita relativo (%).

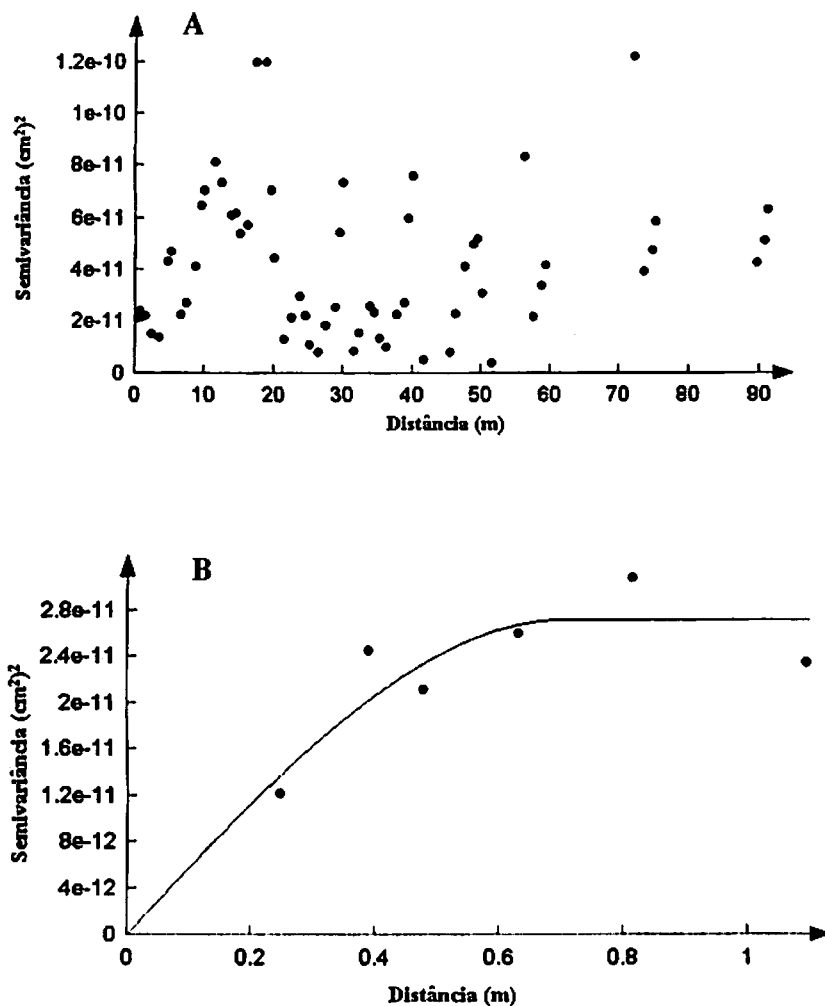


FIGURA 15. Semivariograma sem ajuste (A) e esférico (B) para K' do Neossolo Flúvico. Lavras, MG, 2003.

O semivariograma experimental dos dados de K' foi ajustado ao modelo esférico, com alcance de 0,70 m, este ajuste só foi possível após a realização do "zoom" no semivariograma experimental à distância de 1,0 m.

Segundo a classificação de Cambardella et al. (1994), o semivariograma ajustado para K' apresentou um nível forte de dependência espacial, com relação ao efeito pepita relativo.

O pequeno alcance obtido para K' no ajuste do semivariograma experimental, reflete a pequena estrutura de dependência espacial deste atributo, o que dificulta encontrar um ajuste do modelo teórico de semivariograma.

4.2 Cambissolo (C)

4.2.1 Análise descritiva e inferências clássicas

4.2.1.1 Densidade do solo (Ds), Densidade de Partícula (Dp) e Textura

O Cambissolo foi a classe de solo mais curta na transeção com apenas 6m. A Tabela 09 mostra as estatísticas descritivas das propriedades densidade do solo, densidade de partícula e textura, para os dados obtidos em 8 pontos amostrais na transeção.

Pelos limites de coeficiente de variação proposto por Warrick & Nielsen (1980) para a classificação de variáveis do solo ($CV < 12\%$), ($12\% < CV < 60\%$) e ($CV > 60\%$) para baixa, média e alta variabilidade, respectivamente, pode-se dizer que os atributos mostrados na Tabela 09 são de baixa variabilidade. Essa baixa variabilidade pode ser atribuída a pequenas distâncias amostradas, devido à extensão reduzida deste solo na transeção. Esses resultados são muito parecidos aos encontrados por Machado (1994), que estudou as variabilidades espaciais dos atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distribuídos em uma malha.

TABELA 09. Estatística descritiva dos dados da densidade do solo (Ds), densidade de partícula (Dp), argila, areia e silte para o Cambissolo (C). Lavras, MG, 2003.

Parâmetros	Atributos				
Estatísticos	Ds (g/cm ³)	Dp (g/cm ³)	Argila (%)	Areia (%)	Silte (%)
N	8	8	8	8	8
$\bar{X}$	1,29	2,47	33,06	43,04	23,89
Md	1,28	2,46	32,82	43,45	22,92
Mod	1,28	2,46	32,82	43,45	22,51
s ²	0,004	0,002	1,14	2,98	3,56
S	0,06	0,04	1,06	1,73	1,89
CV	5,13	2,09	3,23	4,01	7,89
Assi.	0,81	0,15	0,10	0,70	0,14
Curt.	3,21	2,06	1,87	2,91	1,47
Min.	1,20	2,41	31,67	40,59	21,49
Max.	1,42	2,56	34,76	46,31	26,26
A	0,22	0,15	3,09	5,72	4,77
S.W	0,57462	0,42499	0,72916	0,27511	0,28391

n – tamanho da amostra; $\bar{X}$ – média; Md – mediana; Mod – moda; s² – variância; s – desvio padrão; CV – Coeficiente de variação; Assi. – coeficiente de assimetria; Curt. – coeficiente de curtose; Min. – mínimo; Max. – máximo; A – amplitude; S.W – valor de probabilidade de Shapiro-Wilk.

Na classificação da USDA, pelos valores texturais médios encontrados, o solo se classifica como franco argiloso.

Observa-se, na Tabela 09, que os valores das medidas de tendência central (média, mediana e moda) são semelhantes para todos os atributos, o que da indícios de simetria da distribuição dos dados, conforme Costa Neto (1990).

Pelas medidas de dispersão assimetria e curtose, que apresentam resultados próximos de 0 e 3, respectivamente, e também pelo valor de probabilidade de Shapiro-Wilk acima de 5%, verifica-se normalidade para todos os atributos.

4.2.1.2 Porosidades e Permeabilidade Intrínseca (K')

Na Tabela 10, é apresentada a estatística descritiva das demais propriedades estudadas do Cambissolo.

Observando-se os coeficientes de variação, constata-se baixa variação dos dados, de acordo com o critério apresentado por Warrick & Nielsen (1980), para os atributos VTPc, VTPd e Micro, os quais apresentaram CVs 6,11 %, 5,03 % e 7,05 %, respectivamente. Os demais atributos apresentaram CVs alto, superiores a 60 %. Essa alta variabilidade pode ser verificada também por meio dos valores extremos (mínimos e máximos) dessas variáveis, apresentados também na Tabela 10. Esses resultados foram bem semelhantes aos encontrados para a classe de solo anterior, com exceção do atributo K', que teve um grande aumento no CV.

Houve uma diminuição da macroporosidade em relação à classe de solo anterior, o que indica uma compactação deste solo, percebida também pelo aumento da densidade do solo.

Os coeficientes de assimetria e curtose, juntamente com o valor de probabilidade de Shapiro-Wilk, revelam a normalidade para apenas os dados de VTPc, Macro e Micro. Resultados semelhantes foram encontrados por Guimarães (2000) estudando variabilidade espacial de Latossolos Vermelho Escuro.

TABELA 10. Estatística descritiva dos dados de volume total de poros calculado (VTPc), volume total de poros determinado (VTPd), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro) e permeabilidade intrínseca (K') para o Cambissolo (C). Lavras, MG, 2003.

Parâmetros	Atributos				
Estatísticos	VTPc (%)	VTPd (%)	Macro (%)	Micro (%)	K' (cm ²).10 ⁻⁷
N	8	8	8	8	8
$\bar{X}$	47,96	46,86	3,90	42,96	10,925
Md	46,98	47,66	4,22	41,71	4,079
Mod	46,98	48,08	4,22	41,08	2,152
s ²	8,58	3,56	6,30	9,18	339,123
S	2,93	2,36	2,51	3,03	18,415
CV	6,11	5,03	64,32	7,05	168,55
Assi.	-0,97	-1,94	0,13	0,29	2,19
Curt.	3,87	5,19	1,29	1,45	5,94
Min.	41,81	41,28	1,18	39,49	2,152
Max.	52,16	48,24	7,26	46,92	56,114
A	10,35	6,96	6,08	7,43	53,961
S.W	0,07499	0,00034	0,13421	0,18789	0,00001

n – tamanho da amostra; $\bar{X}$ – média; Md – mediana; Mod – moda; s² – variância; s – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; Assi. – coeficiente de assimetria; Curt. – coeficiente de curtose; Min. – mínimo; Max. – máximo; A – amplitude; S.W – valor de probabilidade de Shapiro-Wilk.

4.2.2 Análise da variabilidade espacial por meio de semivariogramas

4.2.2.1 Densidade do solo (Ds)

Como se observa pela Figura 16, para densidade do solo não foi possível o ajuste a nenhum modelo teórico. Observando o semivariograma (Figura 16), percebe-se que, com aumento da distância, há uma diminuição da semivariância, ou seja, um aumento da dependência espacial, até uma distância de 2,4 m, onde, a partir deste ponto, a semivariância volta a aumentar e diminuir a dependência espacial entre as amostras de Ds. Esse fato pode ter ocorrido pela pequena distância desta classe de solo na transeção, com o pequeno número de amostras para o cálculo das semivariâncias, e, também, devido à alta estrutura de variabilidade espacial deste solo. Então, para estes dados, tem-se uma distribuição espacial considerada como aleatória, e a única estatística aplicável é a Estatística Clássica.

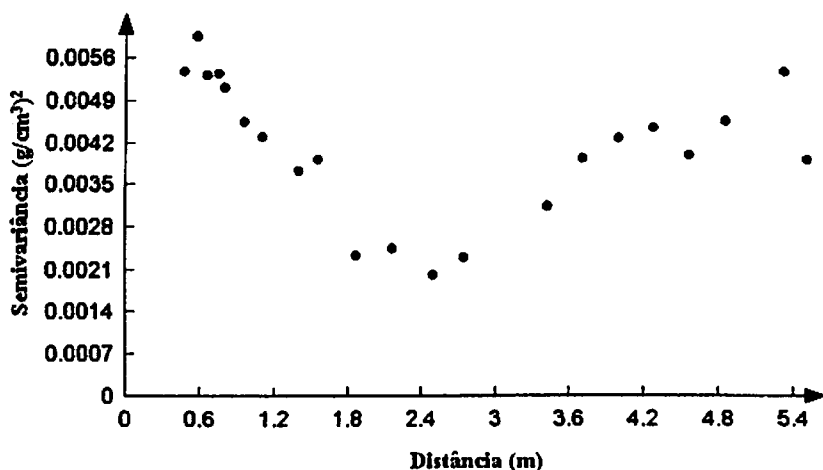


FIGURA 16. Semivariograma sem ajuste para Ds do Cambissolo. Lavras, MG, 2003.

4.2.2.2 Densidade de partícula (Dp)

Como se observa pela Figura 17, para densidade do solo, não foi possível o ajuste a nenhum modelo teórico. Observando o semivariograma (Figura 17), percebe-se uma grande semelhança com o semivariograma para os dados de Ds (Figura 16), o que indica que o tamanho do campo amostrado não foi suficiente para exibir toda a variância, e que é provável que exista a uma distância superior. Também para dados de Dp, tem-se uma distribuição espacial considerada como aleatória, e a única estatística aplicável é a Estatística Clássica.

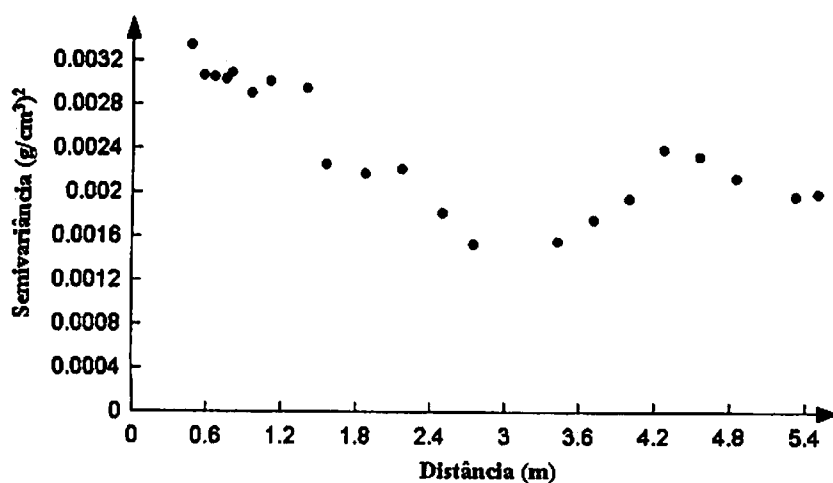


FIGURA 17. Semivariograma sem ajuste para Dp do Cambissolo. Lavras, MG, 2003.

4.2.2.3 Textura

Na Tabela 11, são apresentados os parâmetros característicos dos modelos ajustados aos semivariogramas, mostrando a dependência espacial obtida para os atributos texturais do Cambissolo, ao longo da transeção. Os semivariogramas experimentais encontram-se nas Figuras 18, 19 e 20.

Pelas Figuras 18 A, 19 A e 20, observa-se que os semivariogramas ajustados para estes atributos texturais do Cambissolo indicam que estes atributos possuem capacidade infinita de dispersão, os quais não têm variância finita e para os quais a covariância não pode ser definida, segundo Vieira (2000). Estes semivariogramas indicam também que o tamanho do campo amostrado não foi suficiente para exibir toda a variância, e que, para uma distância superior, talvez fosse possível. Então, para estes semivariogramas, não foi possível detectar a distância a partir da qual as amostras são consideradas independentes. A estes modelos ajustados, não é possível determinar o valor do alcance e patamar, sendo então chamados de semivariogramas sem patamar ou modelos sem patamar. Estes semivariogramas também são encontrados nos trabalhos de Sales (1992), Machado (1994) e Guimarães (2000), para vários atributos e solos diferentes.

Nas Figuras 18 B e 19 B, são mostrados semivariogramas ajustados ao modelo esférico para os atributos argila e silte. Para que fosse possível este ajuste, foi realizado “zoom” para pequenas distâncias amostradas, onde foram encontrados alcances para argila e silte de 0,87 m e 1,51 m, respectivamente. Cabe ressaltar também que, para o atributo areia, não foi possível o ajuste de nenhum modelo teórico com patamar.

TABELA 11. Parâmetros dos semivariogramas ajustados aos dados experimentais de argila, silte e areia em %, do Cambissolo. Lavras, MG, 2003.

Atributos	Geoestatística				
	Modelo	C ₀	Inclinação		Potência
Argila	Potencial	1,03	0,20		1,99
Silte	Potencial	2,25	0,37		1,97
Areia	Potencial	0,33	1,17		1,99
Atributos	Modelo	C ₀	C ₀ +C ₁	a	C ₀ / (C ₀ +C ₁)
Argila	Esférico	0,46	1,36	0,87	0,34
Silte	Esférico	0,18	3,68	1,51	0,05

C_0 – efeito pepita; $C_0 + C_1$ – patamar; a – alcance (m); $C_0/(C_0 + C_1)$ – efeito pepita relativo (%).

Pela relação efeito pepita/patamar, os ajustes para argila e silte são classificados segundo critério de Cambardella (1994), como moderado e forte dependência espacial, respectivamente.

Apesar dos ajustes conseguidos a pequenas distâncias para os atributos argila e silte ao modelo esférico, ficou claro pelos resultados dos semivariogramas sem patamares, que o tamanho da transeção nesta classe de solo não foi suficiente para determinar o alcance destes atributos texturais, e que os alcances encontrados para argila e silte talvez fossem superiores.

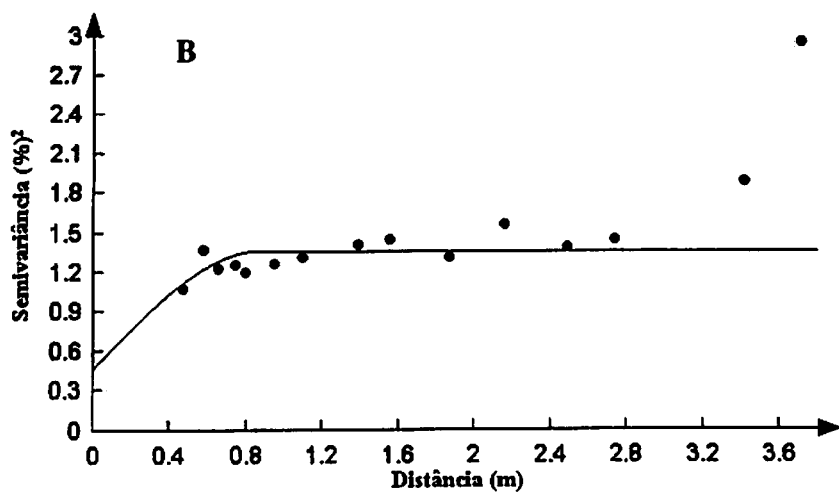
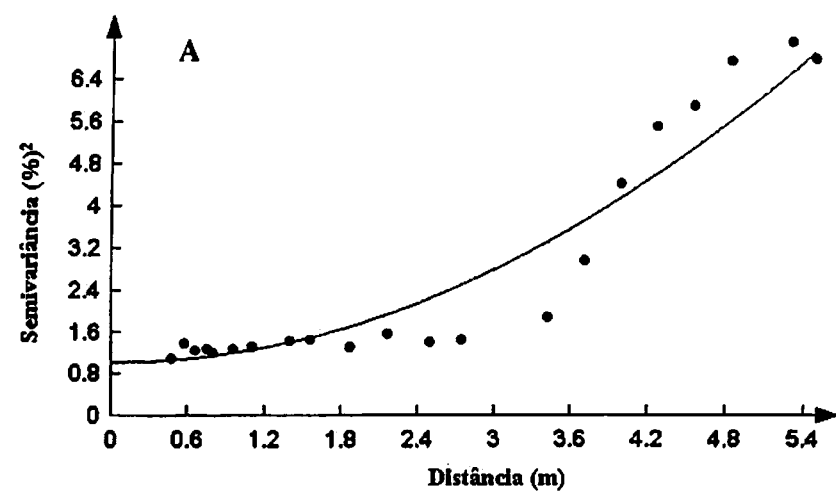


FIGURA 18. Semivariograma com ajuste potencial (A) e esférico (B) para argila do Cambissolo. Lavras, MG, 2003.

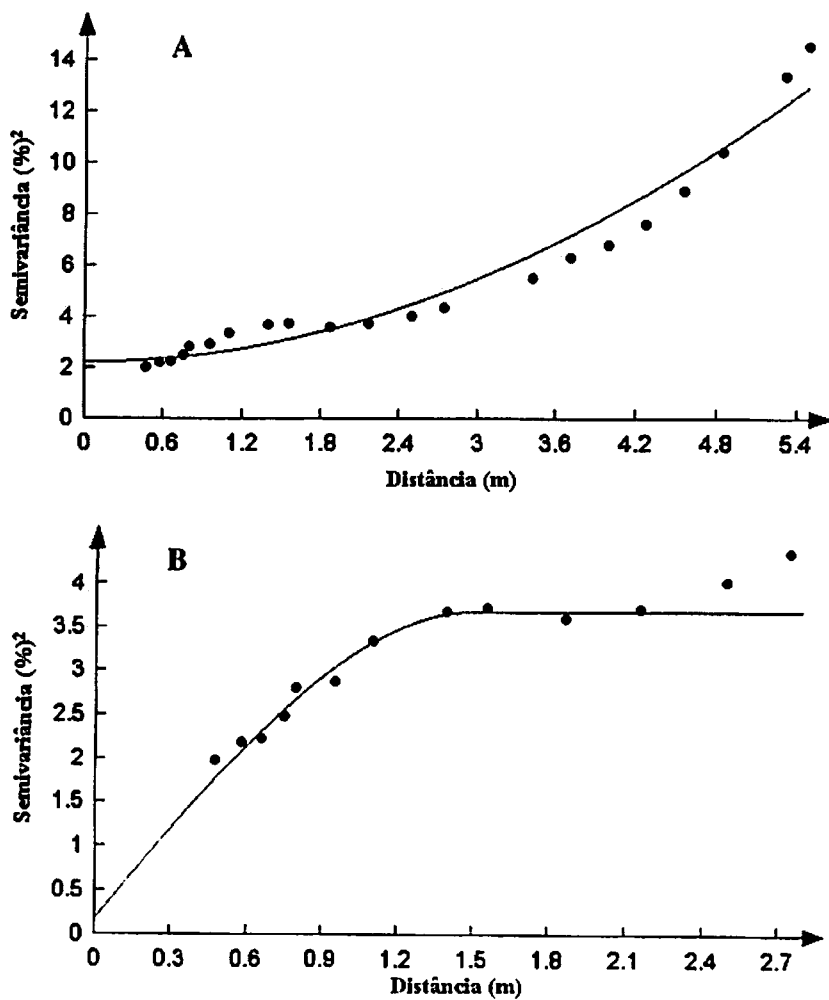


FIGURA 19. Semivariograma com ajuste potencial (A) e esférico (B) para silte do Cambissolo. Lavras, MG, 2003.

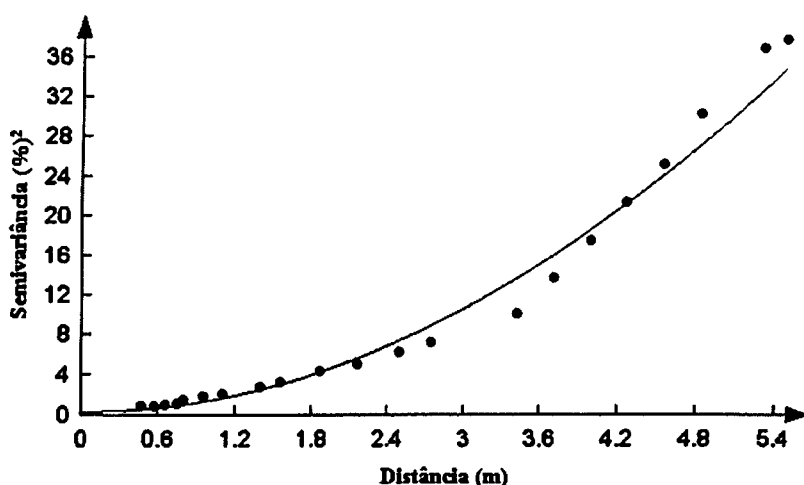


FIGURA 20. Semivariograma com ajuste potencial para areia do Cambissolo. Lavras, MG, 2003.

4.2.2.4 Volume Total de Poros Calculados (VTPc) e Determinados (VTPd)

Os dados experimentais de VTPc e VTPd não se ajustaram a nenhum modelo teórico. Apesar disso, a semelhança entre os semivariogramas apresentados de VTPc e VTPd (Figuras 21 e 22) mostra uma certa relação entre estes dois atributos. Essa semelhança entre os semivariogramas de VTPc e VTPd foi também relatada em estudos realizados por Eguchi (2001).

Observando os semivariogramas dos atributos Ds e Dp (Figuras 16 e 17), também vemos que estes são muito parecidos com VTPc e VTPd. Todos estes semivariogramas apresentaram o inconveniente que, com aumento da distância até cerca de 3 m, a dependência espacial entre os atributos, em vez de diminuir, foi aumentando, fato que não se explica pela geoestatística. Isso pode ter

ocorrido devido ao tamanho desta classe de solo não ser suficiente para os cálculos dos semivariogramas.

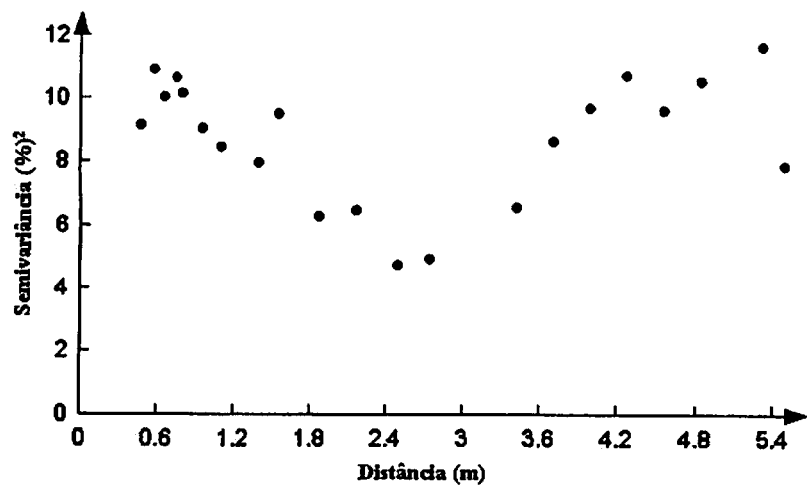


FIGURA 21. Semivariograma sem ajuste para VTPc do Cambissolo. Lavras, MG, 2003.

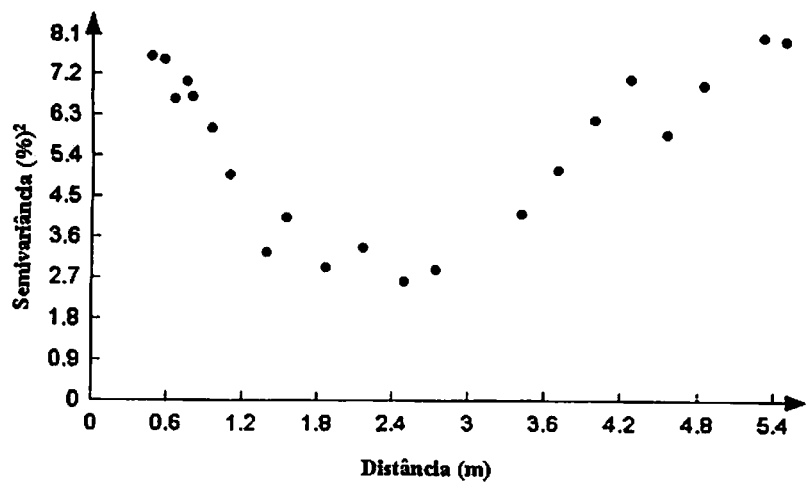


FIGURA 22. Semivariograma sem ajuste para VTPd do Cambissolo. Lavras, MG, 2003.

4.2.2.5 Macroporosidade (Macro) e Microporosidade (Micro)

Na Tabela 12, são apresentados os parâmetros característicos do semivariograma obtido para o atributo Macro para o Cambissolo, ao longo da transeção. Nas Figuras 23 e 24, são apresentados os semivariogramas experimentais para Macro e Micro, respectivamente.

Para o semivariograma ajustado aos dados de macroporosidade, em vez da semivariância ser crescente e dependente da distância (Figura 23), esta foi praticamente constante e igual ao patamar para qualquer distância, então tem-se um efeito pepita puro ou ausência total de dependência espacial. Isso significa que o alcance, para os dados em questão, é menor do que o menor espaçamento entre amostras. Para estes dados, tem-se uma distribuição espacial completamente aleatória, devendo ser tratados apenas pela estatística clássica, segundo Silva et al. (1989).

O semivariograma para Micro não apresentou ajuste a um modelo teórico, mas demonstrou certa semelhança aos semivariogramas de Ds, Dp, VTPc e VTPd (Figuras 16,17,21 e 22). Esta semelhança pode ser atribuída ao pequeno campo amostrado devido à curta distância desta classe de solo na transeção.

TABELA 12. Parâmetros dos semivariogramas ajustados aos dados experimentais de macroporosidade (Macro) em %, do Cambissolo. Lavras, MG, 2003.

Atributos	Geoestatística				
	Modelo	C_0	C_0+C_1	a	$C_0/(C_0+C_1)$
Macro	Efeito Pepita Puro	5,61	5,61	-	1

C_0 – efeito pepita; $C_0+ C_1$ – patamar; a – alcance (m); $C_0/(C_0+ C_1)$ – efeito pepita relativo (%).

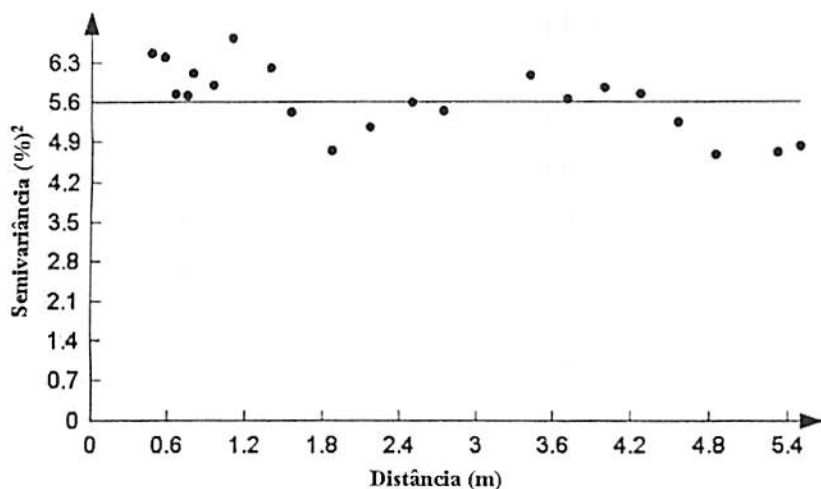


FIGURA 23. Semivariograma ajustado ao efeito pepita puro para Macro do Cambissolo. Lavras, MG, 2003.

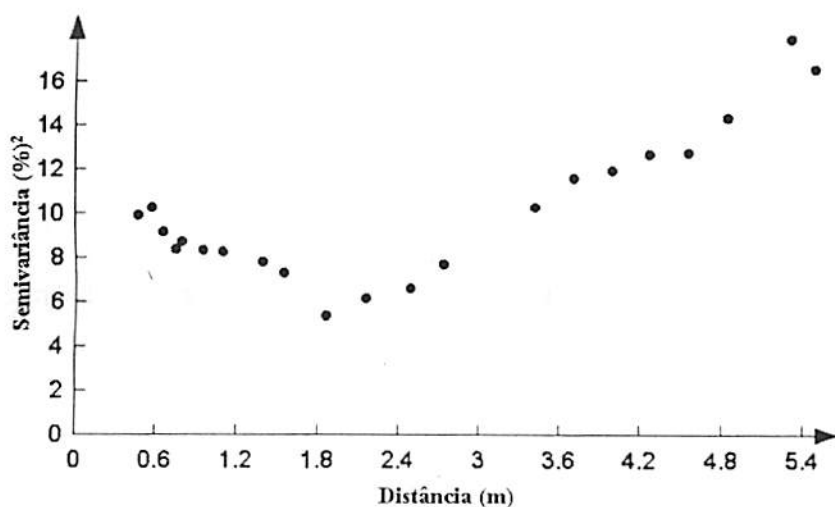


FIGURA 24. Semivariograma sem ajuste para Micro do Cambissolo. Lavras, MG, 2003.

4.2.2.6 Permeabilidade Intrínseca (K')

Observa-se pelo semivariograma da Figura 25, que não foi possível ajustar aos dados experimentais deste atributo um modelo teórico, apesar de uma certa estrutura de distribuição dos dados apresentada pelo semivariograma.

Cabe ressaltar, que o ajuste a um modelo teórico de semivariograma pode não ter sido possível devido à pequena extensão que esta classe de solo proporcionou na transeção.

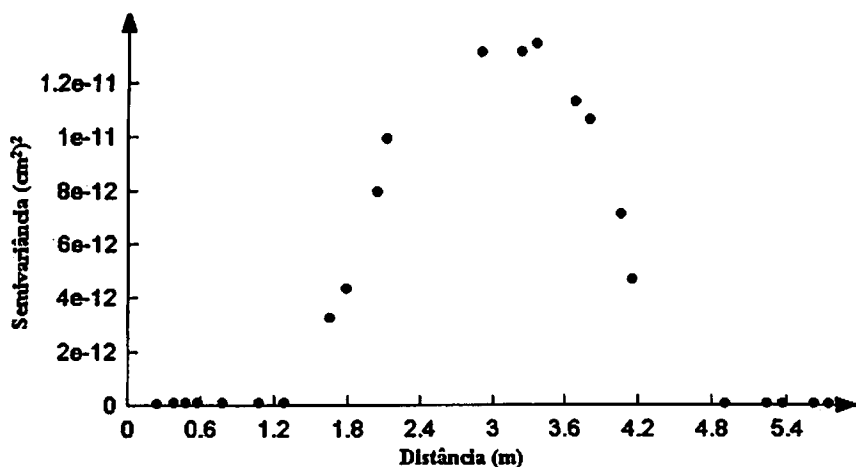


FIGURA 25. Semivariograma sem ajuste para K' do Cambissolo. Lavras, MG, 2003.

4.3 Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA)

4.3.1 Análise descritiva e inferências clássicas

4.3.1.1 Densidade do solo (Ds), Densidade de Partícula (Dp) e Textura

O Argissolo Vermelho-Amarelo teve uma participação de 62 m na transeção em estudo. A Tabela 13 mostra as estatísticas descritivas das propriedades densidade do solo, densidade de partícula e textura, para os dados obtidos em 15 pontos da transeção.

Pelos limites de coeficiente de variação proposto por Warrick & Nielsen (1980) para a classificação de variáveis do solo ($CV < 12\%$), ($12\% < CV < 60\%$) e ($CV > 60\%$) para baixa, média e alta variabilidade, respectivamente, pode-se dizer que os atributos mostrados na Tabela 13 são de baixa variabilidade.

Na classificação da USDA, pelos valores texturais médios encontrados, o solo se classifica como franco argilo-arenoso.

Observa-se, na Tabela 13, que os valores das medidas de tendência central (média, mediana e moda) são semelhantes para todos os atributos, o que dá indícios de simetria da distribuição dos dados, conforme Costa Neto (1990). Pelas medidas de dispersão assimetria e curtose, que apresentam resultados próximos de 0 e 3, respectivamente, e também pelo valor de probabilidade de Shapiro-Wilk acima de 5%, verifica que a normalidade para distribuição dos dados não se confirma apenas para o atributo silte.

Pelos resultados apresentados pela estatística descritiva da Tabela 13, pode-se observar que estes atributos mostraram uma certa organização dos dados revelados pelos baixos CVs e também pela distribuição normal das maioria dos dados. Estes resultados dão indícios de dependência espacial entre atributos, que será verificada mais tarde com o estudo da variabilidade espacial através dos semivariogramas.

TABELA 13. Estatística descritiva dos dados da densidade do solo (Ds), densidade de partícula (Dp), argila, areia e silte para o Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA). Lavras, MG, 2003.

Parâmetros	Atributos				
Estatísticos	Ds (g/cm ³)	Dp (g/cm ³)	Argila (%)	Areia (%)	Silte (%)
N	15	15	15	15	15
$\bar{X}$	1,35	2,53	27,24	51,27	21,49
Md	1,35	2,54	27,50	51,10	21,52
Mod	1,35	2,54	27,76	50,98	21,58
s ²	0,002	0,001	6,02	3,56	3,51
S	0,04	0,03	2,45	1,89	1,87
CV	3,78	1,53	9,01	3,68	8,72
Assi.	0,73	-0,71	-0,62	0,98	1,54
Curt.	2,58	3,64	2,46	3,65	5,57
Min.	1,29	2,44	22,21	48,53	19,41
Max.	1,46	2,60	30,97	55,89	26,87
A	0,17	0,16	8,76	7,36	7,46
S.W	0,19666	0,06132	0,33291	0,25490	0,01597

n – tamanho da amostra; $\bar{X}$ – média; Md – mediana; Mod – moda; s² – variância; s – desvio padrão; CV – Coeficiente de variação; Assi. – coeficiente de assimetria; Curt. – coeficiente de curtose; Min. – mínimo; Max. – máximo; A – amplitude; S.W – valor de probabilidade de Shapiro-Wilk.

4.3.1.2 Porosidades e Permeabilidade Intrínseca (K')

Na Tabela 14, é apresentada a estatística descritiva das demais propriedades estudadas do Argissolo Vermelho-Amarelo.

TABELA 14. Estatística descritiva dos dados de volume total de poros calculado (VTPc), volume total de poros determinado (VTPd), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro) e permeabilidade intrínseca (K') para o Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA). Lavras, MG, 2003.

Parâmetros	Atributos				
Estatísticos	VTPc (%)	VTPd (%)	Macro (%)	Micro (%)	K' (cm ²).10 ⁻⁷
n	15	15	15	15	15
$\bar{X}$	46,54	45,78	8,96	36,83	28,482
Md	46,99	46,34	9,66	37,46	27,360
Mod	48,03	47,56	9,82	37,67	24,761
s ²	4,80	3,90	13,87	7,22	375,935
s	2,19	1,97	3,72	2,69	19,389
CV	4,71	4,31	41,59	7,29	68,07
Assi.	-0,60	-0,64	-0,09	-0,35	0,95
Curt.	2,01	1,99	2,03	1,91	3,37
Min.	42,47	42,38	2,18	31,78	1,376
Max.	48,93	48,14	15,28	40,62	71,532
A	6,46	5,76	13,10	8,84	70,155
S.W	0,08853	0,05299	0,81597	0,24943	0,05069

n – tamanho da amostra; $\bar{X}$ – média; Md – mediana; Mod – moda; s² – variância; s – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; Assi. – coeficiente de assimetria; Curt. – coeficiente de curtose; Min. – mínimo; Max. – máximo; A – amplitude; S.W – valor de probabilidade de Shapiro-Wilk.

Observando-se os coeficientes de variação, constata-se baixa variação dos dados, de acordo com o critério apresentado por Warrick & Nielsen (1980), para os atributos VTPc, VTPd e Micro, os quais apresentaram CVs 4,71 %, 4,31 % e 7,29 %, respectivamente. O atributo Macro apresentou um valor médio de CV e os demais atributos apresentaram altos valores de CVs. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Guimarães (2000).

Os valores relacionados com porosidade foram muitos semelhantes à classe de solo anterior (Cambissolo), com pequena diferença em relação à distribuição de Macro e Micro, onde um aumento de Macro proporcionou a diminuição no valor da Micro.

Os coeficientes de assimetria e curtose, juntamente com o valor de probabilidade de Shapiro-Wilk, revelam a normalidade para todos os atributos da Tabela 14. Resultados semelhantes foram encontrados por Guimarães (2000) estudando variabilidade espacial de Latossolos Vermelho Escuro com dois tipos de manejo.

4.3.2 Análise da variabilidade espacial por meio de semivariogramas

4.3.2.1 Densidade do solo (Ds)

Na Tabela 15, são apresentados os parâmetros característicos do modelo ajustado ao semivariograma, mostrando a dependência espacial obtida da Ds do Argissolo Vermelho-Amarelo para a transeção. Os semivariogramas experimentais são apresentados na Figura 26.

TABELA 15. Parâmetros do semivariograma ajustado aos dados experimentais de densidade do solo (Ds) em g/cm³, do Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA). Lavras, MG, 2003.

Atributo	Geoestatística				
	Modelo	C _o	C _o +C ₁	a	C _o /(C _o +C ₁)
Ds	Gaussiano	0,0005	0,0034	0,88	0,15

C_o – efeito pepita; C_o+ C₁ – patamar; a – alcance (m); C_o/(C_o+ C₁) – efeito pepita relativo (%).

A Figura 26 A mostra o semivariograma para toda a extensão do Argissolo Vermelho-Amarelo na transeção. Como se pode observar, não foi possível o ajuste de nenhum modelo teórico. Já na Figura 26 B, foi feito um “zoom” nos primeiros 7 m deste solo, onde, então, foi possível ajustar o modelo Gaussiano com alcance de 0,88 m. Eguchi (2001), estudando o solo Aluvial, encontrou um alcance de 8,00 m para densidade do solo. Este maior alcance obtido por este autor já era esperado, e só vem a confirmar uma maior variabilidade na estrutura espacial, quando se estuda uma transeção em solos de várzeas perpendicular a calha do ribeirão, que é o caso deste trabalho.

Estudos realizados por Guimarães (2000) em Latossolo Vermelho Escuro com manejo convencional e plantio direto obteve dependência espacial para Ds apenas no manejo convencional. Gonçalves & Folegatti (1995) também verificaram ausência de padrão espacial da densidade do solo em uma Terra Roxa Estruturada. Esses resultados, quando comparados com os resultados obtidos neste trabalho, indicam que a variabilidade espacial desse atributo é altamente influenciada pelo manejo agrícola, pelo tipo de solo e também pela profundidade de amostragem.

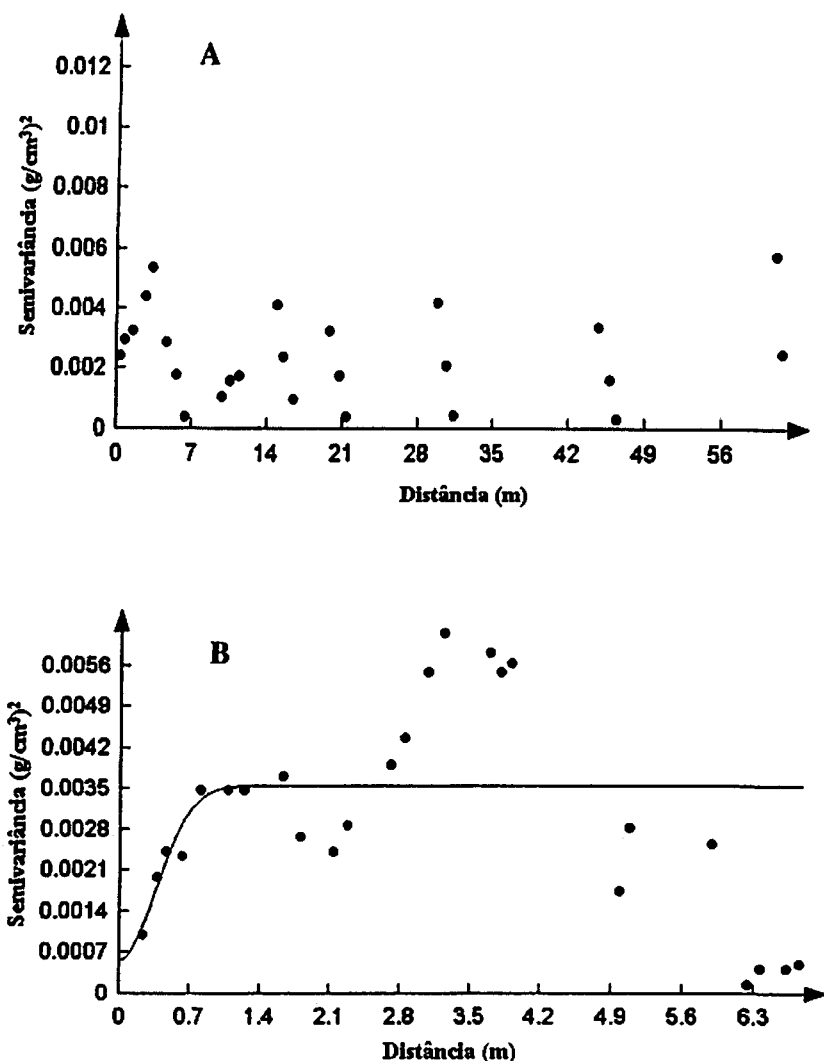


FIGURA 26. Semivariograma sem ajuste (A) e Gaussiano (B) para Ds do Argissolo Vermelho-Amarelo. Lavras, MG, 2003.

O efeito pepita relativo foi de 15 %, sendo segundo Cambardella et al. (1994), classificado como forte a dependência espacial para este atributo. Considerando que esse atributo apresenta grande importância em projetos agrícolas e que também apresenta forte correlação com outros atributos dos

solos, a não determinação do modelo de variação espacial poderá produzir estimativas que carecem de precisão.

4.3.2.2 Densidade de partícula (Dp)

Na Tabela 16, são apresentados os parâmetros característicos do modelo ajustado ao semivariograma, mostrando a dependência espacial obtida da Dp do Argissolo Vermelho-Amarelo para a transeção. Os semivariogramas experimentais são apresentados na Figura 27.

TABELA 16. Parâmetros dos semivariogramas ajustados aos dados experimentais de densidade de partícula (Dp) em g/cm³, do Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA). Lavras, MG, 2003.

Atributo	Geoestatística				
	Modelo	C ₀	C ₀ +C ₁	a	C ₀ /(C ₀ +C ₁)
Dp	Esférico	0,00082	0,00166	2,38	0,49

C₀ – efeito pepita; C₀+ C₁ – patamar; a – alcance (m); C₀/(C₀+ C₁) – efeito pepita relativo (%).

A Figura 27 A mostra o semivariograma para toda a extensão do Argissolo Vermelho-Amarelo na transeção. Como se pode observar, não foi possível o ajuste de nenhum modelo teórico. Para a Figura 27 B, foi feito um “zoom” nos primeiro 7 m deste solo, onde, então, foi possível ajustar o modelo esférico com alcance de 2,38 m. O alcance obtido para densidade de partícula, provavelmente, deve-se ao fato deste atributo, nesta situação e posição topográfica da transeção, depender, principalmente, da constituição mineralógica, sendo pouco influenciada por fatores induzidos pelo manejo do solo e o pisoteio do gado.

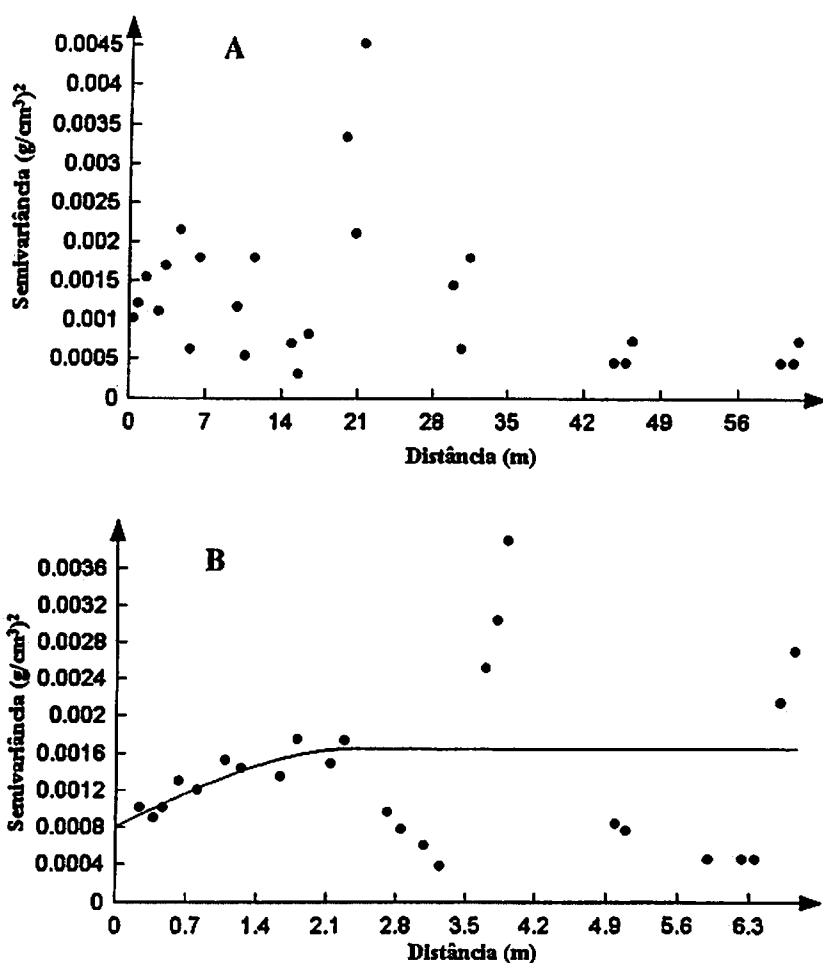


FIGURA 27. Semivariograma sem ajuste (A) e esférico (B) para Dp do Argissolo Vermelho-Amarelo. Lavras, MG, 2003.

Segundo a classificação de Cambardella et al. (1994), o semivariograma, ajustado ao modelo esférico aos dados de densidade de partícula, apresentou um nível moderado de dependência espacial, com relação ao efeito pepita/patamar.

4.3.2.3 Textura

Na Tabela 17, são apresentados os parâmetros característicos dos modelos ajustados aos semivariogramas, mostrando a dependência espacial obtida para os atributos texturais do Argissolo Vermelho-Amarelo, ao longo da transeção. Os semivariogramas experimentais encontram-se nas Figuras 28, 29 e 30.

Nenhum dos atributos texturais foram ajustados a um modelo teórico para o comprimento total de 62 m, desta classe de solo na transeção (Figuras 28 A, 29 A e 30 A).

TABELA 17. Parâmetros dos semivariogramas ajustados aos dados experimentais de argila, areia e silte em %, do Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA). Lavras, MG, 2003.

Atributos	Geoestatística				
	Modelo	C_0	C_0+C_1	a	$C_0/(C_0+C_1)$
Argila	Esférico	1,20	2,20	1,25	0,54
Areia	Esférico	0,29	0,81	0,94	0,36
Silte	Esférico	0,45	2,06	1,68	0,22

C_0 – efeito pepita; $C_0 + C_1$ – patamar; a – alcance (m); $C_0/(C_0 + C_1)$ – efeito pepita relativo (%).

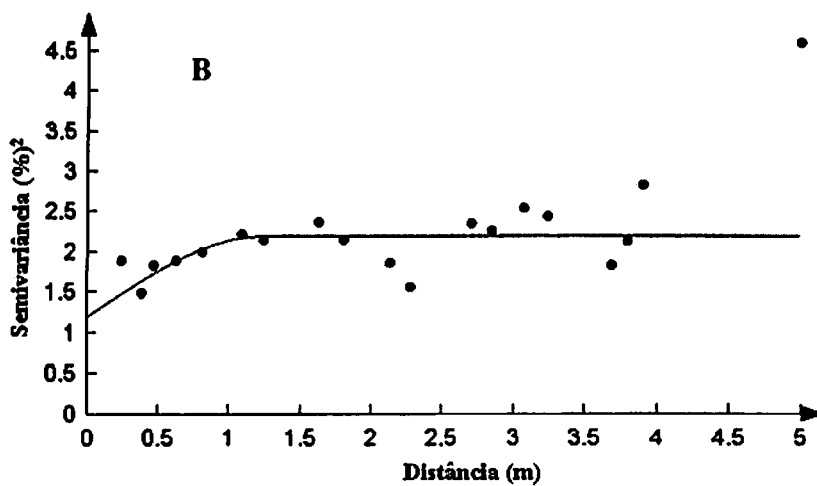
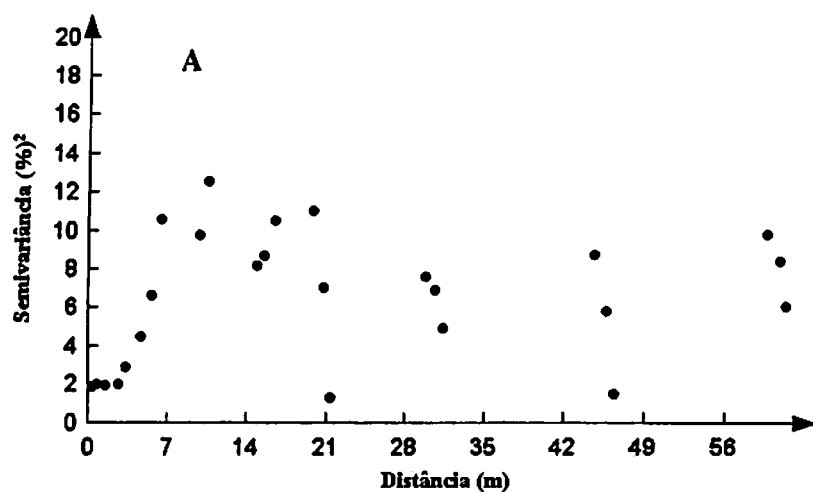


FIGURA 28. Semivariograma sem ajuste (A) e esférico (B) para Argila do Argissolo Vermelho-Amarelo. Lavras, MG, 2003.

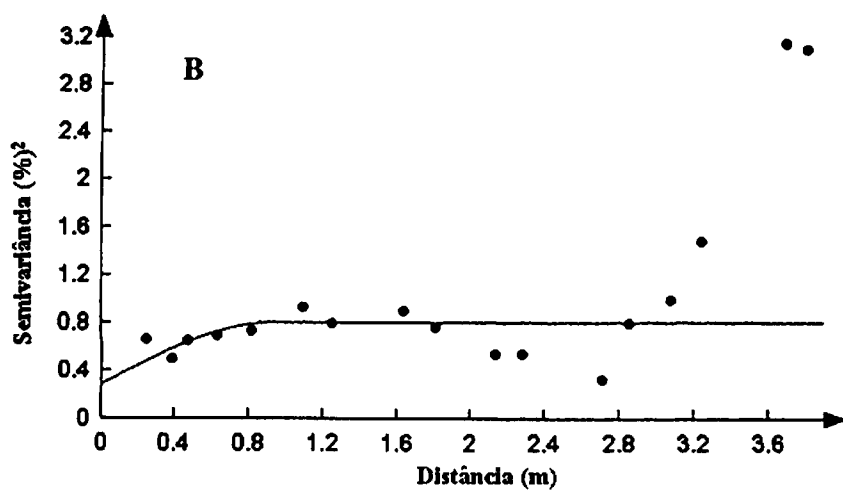
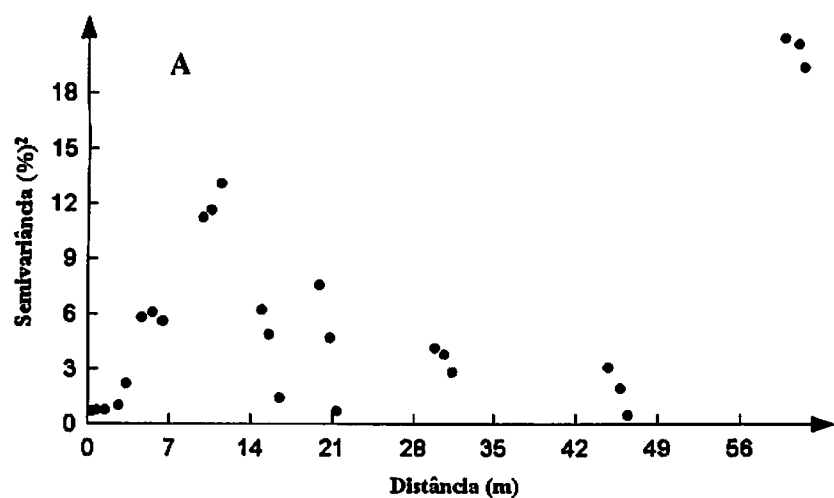


FIGURA 29. Semivariograma sem ajuste (A) e esférico (B) para Areia do Argissolo Vermelho-Amarelo. Lavras, MG, 2003.

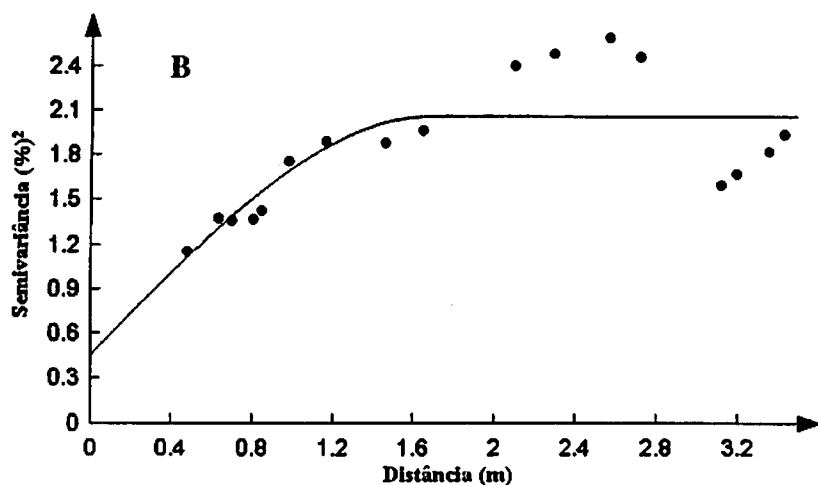
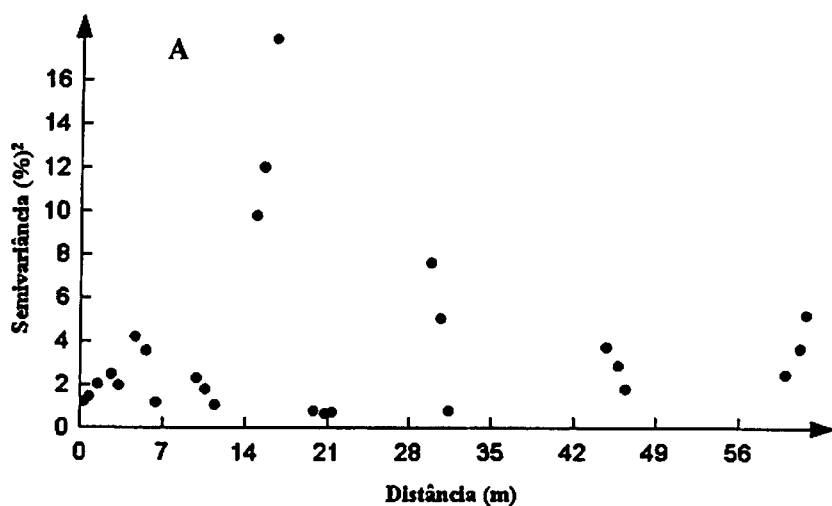


FIGURA 30. Semivariograma sem ajuste (A) e esférico (B) para Silte do Argissolo Vermelho-Amarelo. Lavras, MG, 2003.

As Figuras 28 B, 29 B e 30 B mostraram o “zoom” realizado para os atributos texturais do Argissolo Vermelho-Amarelo, onde foi possível o ajuste do modelo esférico com os alcances de 1,25 m, 0,94 m e 1,68 m, respectivamente, para argila, areia e silte. Apesar do pequeno alcance obtido neste trabalho em relação aos atributos texturais, comparando estes resultados com os obtidos por outros pesquisadores como Eguchi (2001), Guimarães (2000) e Gonçalves & Folegatti (1995), nota-se que as frações granulométricas dos solos apresentam grande diversidade de comportamento espacial não só em relação a classes de solo, mas também em relação ao tipo de manejo e, observa-se, também, que não raramente é possível ajustar modelos teóricos de variabilidade espacial às estimativas de semivariância, demonstrando a importância do estudo e do conhecimento do comportamento espacial destes atributos.

Segundo a classificação de Cambardella et al. (1994), esses semivariogramas apresentaram níveis moderados de dependência espacial para os atributos argila e areia, e forte dependência espacial para silte, com relação ao efeito pepita/patamar (efeito pepita relativo).

4.3.2.4 Volume Total de Poros Calculados (VTPc) e Determinados (VTPd)

Na Tabela 18, são apresentados os parâmetros característicos dos modelos ajustados aos semivariogramas, mostrando a dependência espacial obtida de VTPc e VTPd para o Argissolo Vermelho-Amarelo, ao longo da transeção. Os semivariogramas experimentais são apresentados nas Figuras 31 e 32.

TABELA 18. Parâmetros dos semivariogramas ajustados aos dados experimentais de volume total de poros calculados (VTPc) e volume total de poros determinados (VTPd) em %, do Argissolo Vermelho-Amarelo. Lavras, MG, 2003.

Atributos	Geoestatística				
	Modelo	C_0	C_0+C_1	a	$C_0/(C_0+C_1)$
VTPc	Exponencial	2,70	7,60	3	0,36
VTPd	Esférico	1,56	4,90	0,76	0,32

C_0 – efeito pepita; $C_0 + C_1$ – patamar; a – alcance (m); $C_0/(C_0 + C_1)$ – efeito pepita relativo (%).

Como se observa pelas Figuras 31 A e 32 A, não foi possível um ajuste a modelo teórico aos dados de VTPc e VTPd para comprimento total desta classe de solo na transeção. Para que fosse possível um ajuste a um dos modelos teóricos, foi realizado um “zoom” a curta distância, onde, então, foi possível determinar a dependência espacial para estes atributos.

Os dados de VTPc foram ajustados ao modelo exponencial com alcance de 3 m, e os dados de VTPd foram ajustados ao modelo esférico com alcance de 0,76m (Figuras 31 B e 32 B). Essa diferença entre os modelos ajustados e também a diferença entre os alcances podem ser devido a diferenças entre as metodologias para determinação destes dois atributos. Enquanto que VTPc foi calculado em função da densidade do solo e de partículas, o VTPd foi determinado em função da umidade com base em volume, quando o solo se encontrava saturado.

Pelo efeito pepita relativo do VTPc e VTPd, são classificados como dependência espacial moderada, segundo Cambardella et al. (1994), para os modelos e alcances ajustados.

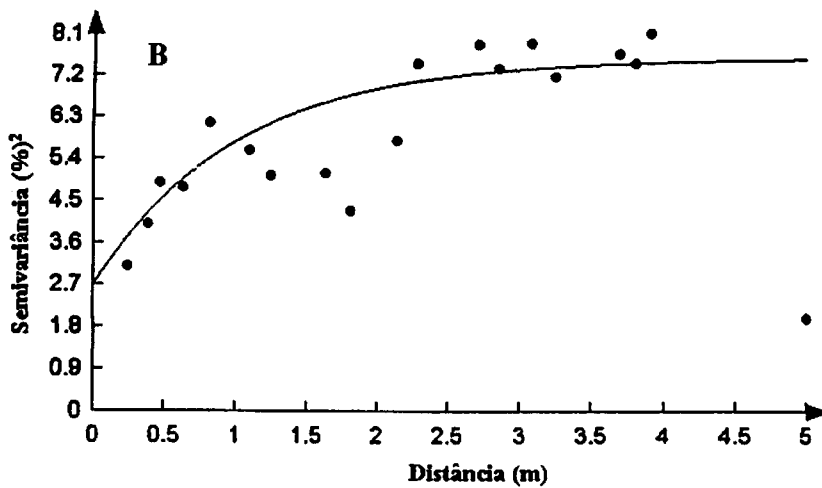
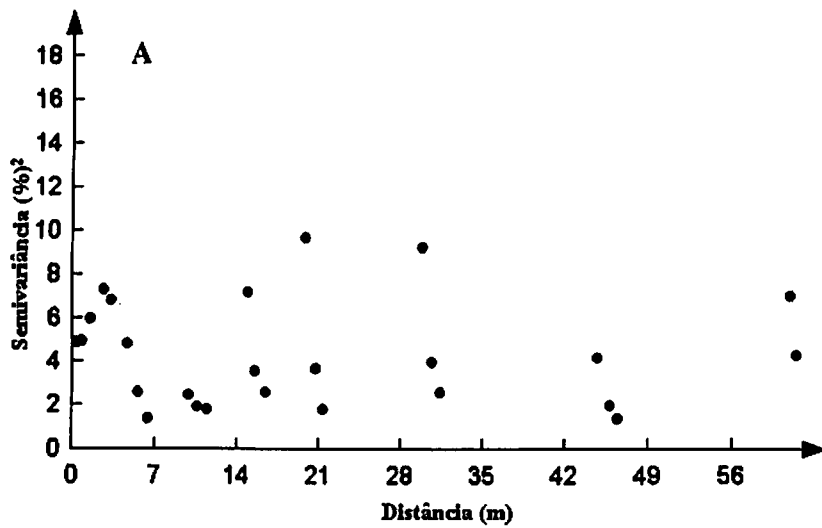


FIGURA 31. Semivariograma sem ajuste (A) e exponencial (B) para VTPc do Argissolo Vermelho-Amarelo. Lavras, MG, 2003.

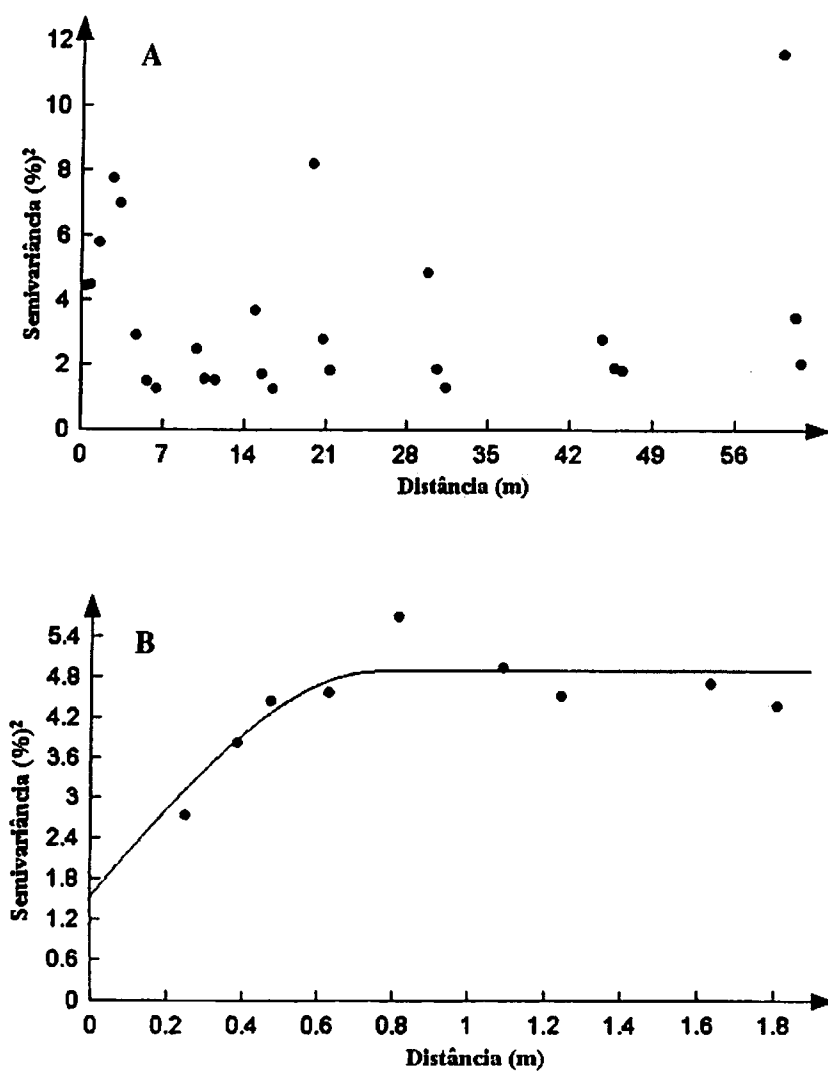


FIGURA 32. Semivariograma sem ajuste (A) e esférico (B) para VTPd do Argissolo Vermelho-Amarelo. Lavras, MG, 2003.

4.3.2.5 Macroporosidade (Macro) e Microporosidade (Micro)

Na Tabela 19, são apresentados os parâmetros característicos dos semivariogramas obtidos para os atributos Macro e Micro para o Argissolo, ao longo da transeção. Os semivariogramas experimentais são apresentados nas Figuras 33 e 34.

Da mesma forma que os atributos anteriores, também não foi possível um ajuste aos modelos teóricos para os atributos Macro e Micro, para toda a extensão do Argissolo Vermelho-Amarelo na transeção (Figuras 33 A e 34 A). Já fazendo um “zoom” para menores distâncias, foi possível ajustar o modelo Gaussiano para os dados de Macro e Micro com alcance de 7,04 m e 8,52 m, respectivamente (Figuras 33 B e 34 B).

Segundo o critério de Cambardella et al. (1994), pela relação efeito pepita/patamar, o atributo Macro apresentou moderada dependência espacial e o atributo Micro forte dependência espacial.

TABELA 19. Parâmetros dos semivariogramas ajustados aos dados experimentais de macroporosidade (Macro) e microporosidade (Micro) em %, do Argissolo Vermelho-Amarelo. Lavras, MG, 2003.

Atributos	Geoestatística				
	Modelo	C_0	C_0+C_1	a	$C_0/(C_0+C_1)$
Macro	Gaussiano	5,33	14,17	7,04	0,38
Micro	Gaussiano	0,90	7,3	8,52	0,12

C_0 – efeito pepita; $C_0 + C_1$ – patamar; a – alcance (m); $C_0/(C_0 + C_1)$ – efeito pepita relativo (%).

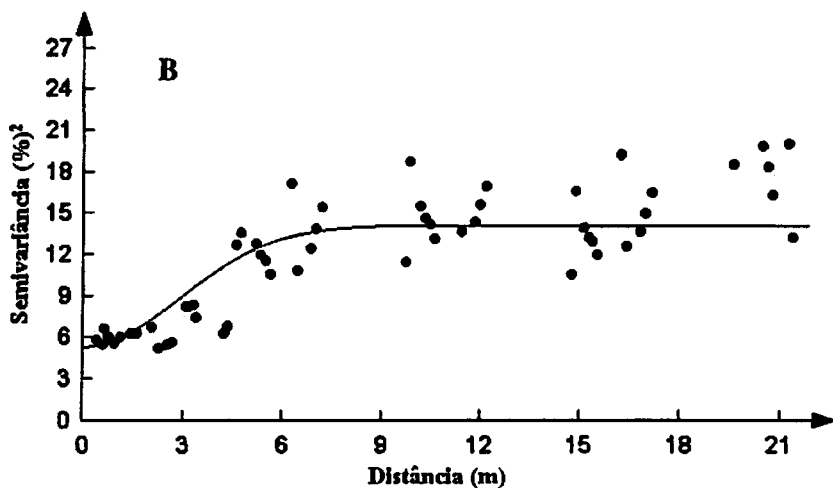
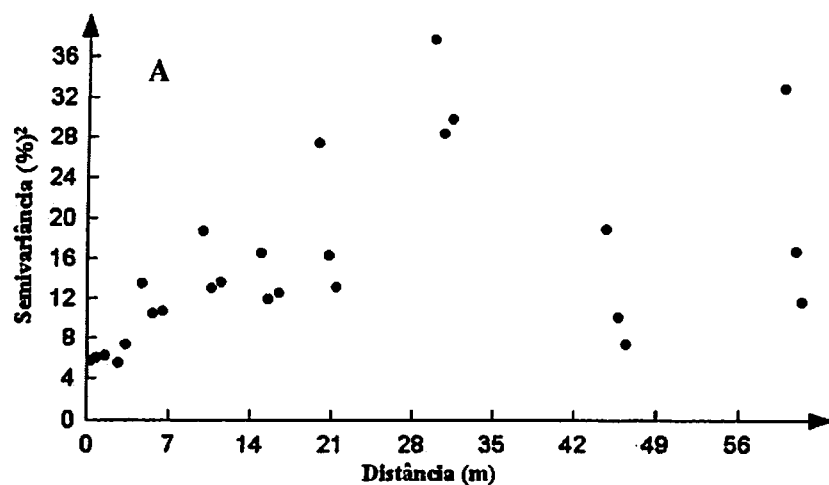


FIGURA 33. Semivariograma sem ajuste (A) e Gaussiano (B) para Macro do Argissolo Vermelho-Amarelo. Lavras, MG, 2003.

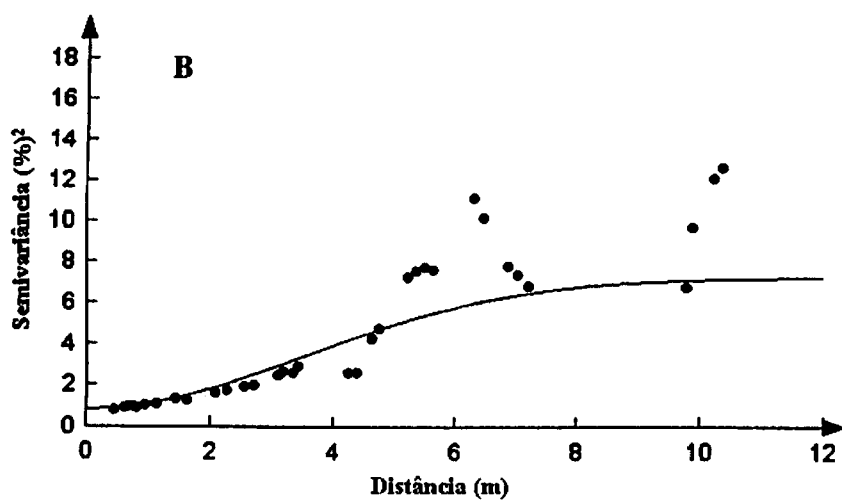
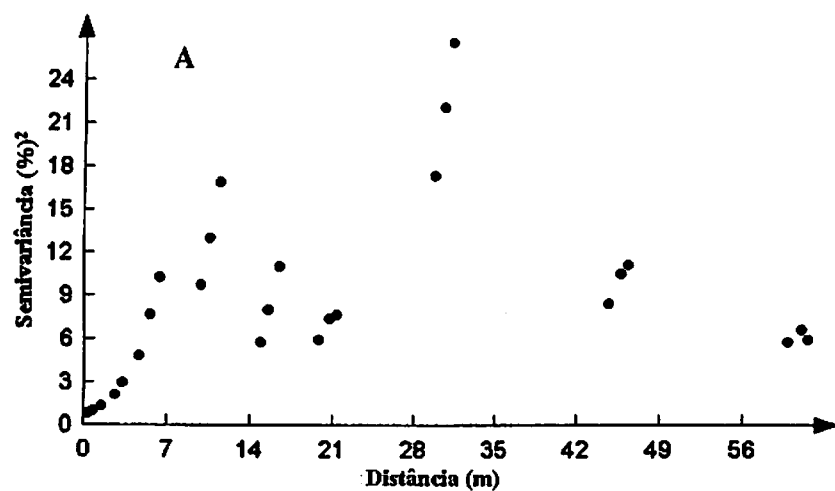


FIGURA 34. Semivariograma sem ajuste (A) e Gaussiano (B) para Micro do Argissolo Vermelho-Amarelo. Lavras, MG, 2003.

Eguchi (2001), estudando a variabilidade espacial de atributos do solo Aluvial paralelo ao rio, conseguiu para Macro um ajuste dos dados experimentais ao modelo esférico com alcance de 2,00 m, e para Micro um ajuste exponencial com alcance de 12,50 m, todas com forte dependência espacial. A maior dependência espacial obtida neste estudo, para o atributo Macro em relação ao trabalho de Eguchi (2001), pode ser devido à influência do pisoteio do gado, uma vez que a área experimental vem sendo utilizada como pastagem, ou pelo fato de se tratarem de classes diferentes de solos.

4.3.2.6 Permeabilidade Intrínseca (K')

A Figura 35, mostra o semivariograma para o atributo K' , para o Argissolo Vermelho-Amarelo, ao longo da transeção.

Observa-se que não foi possível ajustar os dados experimentais deste atributo a um modelo teórico, apesar de uma certa estrutura de distribuição dos dados. A distribuição dos dados tende a um efeito pepita puro ou ausência total de dependência espacial. Para estes dados, tem-se uma distribuição espacial completamente aleatória, e a única estatística aplicável é a Estatística clássica, Vieira (2000).

Segundo resultados obtidos por Guimarães (2000), a alta variabilidade de atributos, como K' , reflete a grande dispersão dos dados verificada nas semivariâncias experimentais, que também dificulta o ajuste do modelo teórico de semivariograma.

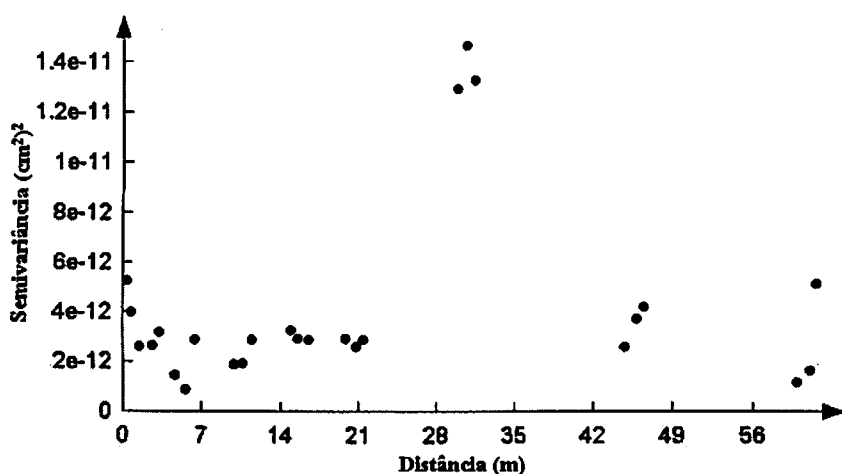


FIGURA 35. Semivariograma sem ajuste para K' do Argissolo Vermelho-Amarelo. Lavras, MG, 2003.

4.4 Gleissolo Háplico (GX)

4.4.1 Análise descritiva e inferências clássicas

4.4.1.1 Densidade do solo (D_s), Densidade de Partícula (D_p) e Textura

O Gleissolo Háplico compreendeu 12 m da transeção em estudo. A Tabela 20 mostra as estatísticas descritivas das propriedades densidade do solo, densidade de partícula e textura, para os dados obtidos em 10 pontos da transeção.

Segundo a classificação de coeficiente de variação proposta por Warrick & Nielsen (1980) para variáveis do solo, verifica que todas as variáveis apresentadas na Tabela 20 são de baixa variabilidade, com exceção do atributo areia, que apresentou média variabilidade. Esses resultados estão de acordo com estudos realizados por Machado (1994) para esta mesma classe de solo.

TABELA 20. Estatística descritiva dos dados da densidade do solo (Ds), densidade de partícula (Dp), argila, areia e silte para o Gleissolo Háplico (GX). Lavras, MG, 2003.

Parâmetros	Atributos				
Estatísticos	Ds (g/cm ³)	Dp (g/cm ³)	Argila (%)	Areia (%)	Silte (%)
N	10	10	10	10	10
$\bar{X}$	1,23	2,48	33,45	38,86	23,06
Md	1,19	2,51	33,25	39,69	23,12
Mod	1,18	2,52	33,25	43,72	23,12
s ²	0,008	0,002	2,19	31,88	4,05
S	0,09	0,04	1,48	5,65	2,01
CV	7,50	1,89	4,42	15,53	8,73
Assi.	-1,70	-1,25	-0,54	0,10	1,43
Curt.	5,66	3,20	2,14	1,40	4,75
Min.	0,99	2,38	30,87	30,87	20,51
Max.	1,34	2,53	35,21	45,99	27,98
A	0,35	0,15	4,34	15,12	7,47
S.W	0,00840	0,00351	0,42385	0,18498	0,04451

n – tamanho da amostra; $\bar{X}$ – média; Md – mediana; Mod – moda; s² – variância; s – desvio padrão; CV – Coeficiente de variação; Assi. – coeficiente de assimetria; Curt. – coeficiente de curtose; Min. – mínimo; Max. – máximo; A – amplitude; S.W – valor de probabilidade de Shapiro-Wilk.

Os menores valores de densidade de solo e de partículas encontrados para o Gleissolo Háplico em relação ao Argissolo Vermelho-Amarelo, classe de solo anterior desta transeção, devem-se a maior presença de matéria orgânica nesta classe de solo e também a diminuição na porcentagem de areia. Entretanto, deve-se ressaltar que os resultados de toda a transeção estudada estão sendo

influenciados pela compactação ocasionada por pisoteio de gado, haja visto que a área em questão vem sendo continuamente usada como pastagem.

Na classificação da USDA, pelos valores texturais médios encontrados, o solo se classifica como franco-argiloso.

Na Tabela 20, os valores das medidas de tendência central (média, mediana e moda) são bem semelhantes para todos os atributos, o que dá indícios de simetria da distribuição dos dados, conforme Costa Neto (1990). Pelas medidas de dispersão assimetria e curtose, que apresentam resultados próximos de 0 e 3, respectivamente, e também pelo valor de probabilidade de Shapiro-Wilk acima de 5%, verifica-se que a distribuição de normalidade se confirma apenas para os atributos texturais argila e areia. Esses resultados diferem de Eguchi (2001), que estudando estes atributos para o solo Aluvial, obteve normalidade apenas para os dados de densidade de partícula.

4.4.1.2 Porosidades e Permeabilidade Intrínseca (K')

Na Tabela 21, é apresentada a estatística descritiva das demais propriedades estudadas do Gleissolo Háplico, para os dados obtidos em 10 pontos amostrais, da transeção. Observando-se os coeficientes de variação, constata-se baixa variação dos dados, de acordo com o critério apresentado por Warrick & Nielsen (1980), para os atributos VTPc e VTPd. Os atributos Macro e Micro apresentaram média variação dos dados, e os demais atributos foram classificados como alta variabilidade dos dados. Resultados semelhantes foram obtidos por Machado (1994), para esta mesma classe de solo. Portanto, para a amostragem com a finalidade de determinação de K', necessita-se de um número maior de medições devido a este atributo apresentar uma maior variação nos dados em relação aos demais atributos estudados. Esta elevada variabilidade dos dados pode ser explicada pela heterogeneidade estrutural do solo em estudo,

como também pela presença de raízes, atividade microbiana e rachaduras ocasionadas pelas épocas de estiagens, entre outros fatores, o pisoteio do gado.

TABELA 21. Estatística descritiva dos dados de volume total de poros calculado (VTPc), volume total de poros determinado (VTPd), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro) e permeabilidade intrínseca (K') para o Gleissolo Háplico (GX). Lavras, MG, 2003.

Parâmetros	Atributos				
Estatísticos	VTPc (%)	VTPd (%)	Macro (%)	Micro (%)	K' (cm ²).10 ⁻⁷
N	10	10	10	10	10
$\bar{X}$	50,62	49,11	11,23	37,88	31,499
Md	49,09	45,95	12,50	34,73	21,271
Mod	48,09	49,95	13,37	33,61	12,911
s ²	10,37	11,73	6,12	24,49	855,884
S	3,22	3,42	2,47	4,95	29,255
CV	6,36	6,97	22,04	13,06	92,87
Assi.	1,94	1,70	-1,04	1,69	1,65
Curt.	6,13	5,41	2,78	4,84	5,07
Min.	47,10	45,72	6,23	32,89	4,551
Max.	59,09	57,83	13,75	50,10	104,870
A	11,99	12,11	7,52	17,21	100,318
S.W	0,00160	0,00930	0,05513	0,00373	0,01397

n – tamanho da amostra; $\bar{X}$ – média; Md – mediana; Mod – moda; s² – variância; s – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; Assi. – coeficiente de assimetria; Curt. – coeficiente de curtose; Min. – mínimo; Max. – máximo; A – amplitude; S.W – valor de probabilidade de Shapiro-Wilk.

Os coeficientes de assimetria e curtose juntamente com o valor de probabilidade de Shapiro-Wilk indicam que apenas o atributo Macro apresentou distribuição normal dos dados.

A distribuição não normal das variáveis e a alta variabilidade revelada pelo CV, para alguns dos atributos apresentados na Tabela 21, podem induzir a inferência que não condizem com a realidade, e que carecem de precisão.

4.4.2 Análise da variabilidade espacial por meio de semivariogramas

4.4.2.1 Densidade do solo (Ds)

Na Tabela 22, são apresentados os parâmetros característicos do modelo ajustado ao semivariograma, mostrando a dependência espacial obtida da Ds do Gleissolo Háplico ao longo da transeção. Os semivariogramas experimentais são apresentados na Figura 36.

TABELA 22. Parâmetros dos semivariogramas ajustados aos dados experimentais de densidade do solo (Ds) em g/cm³, do Gleissolo Háplico. Lavras, MG, 2003.

Atributo	Geoestatística				
	Modelo	C_o	C_o+C_1	a	$C_o/(C_o+C_1)$
Ds	Esférico	0	0,0033	1,92	0

C_o – efeito pepita; $C_o + C_1$ – patamar; a – alcance (m); $C_o/(C_o + C_1)$ – efeito pepita relativo (%).

A Figura 36 A mostra o semivariograma para toda a extensão do Gleissolo Háplico na transeção. Como se pode observar, não foi possível o ajuste de nenhum modelo teórico. Este semivariograma mostra a presença de duas estruturas conjuntas, sendo uma atuando até aproximadamente 7 m e outra, de 7 m em diante. Segundo Vieira et al. (1983), essas estruturas “aninhadas”, com mais de um patamar e mais de um alcance, ocorrem quando existem diferentes escalas de variabilidade nos dados. Nestes casos um único modelo não seria suficiente para representar o semivariograma e o software utilizado não permite este ajuste.

Na Figura 36 B, foi feito um “zoom” nos primeiro 4 m deste solo, onde, então, foi possível ajustar o modelo esférico com alcance de 1,92 m. Machado (1994), estudando esta mesma classe de solo, encontrou um alcance de 5,00 m para dados de densidade do solo retirados em uma malha quadriculada, na camada de 20-40 cm. O maior alcance obtido por este autor, pode ser devido à malha de amostragem ser paralela ao curso d’água. Esses resultados confirmam a presença de maior dependência espacial, quando se estuda solos de várzeas paralelos ao curso d’água.

Pelo efeito pepita relativo à densidade do solo apresentou forte dependência espacial para este alcance, segundo Cambardella et al. (1994).

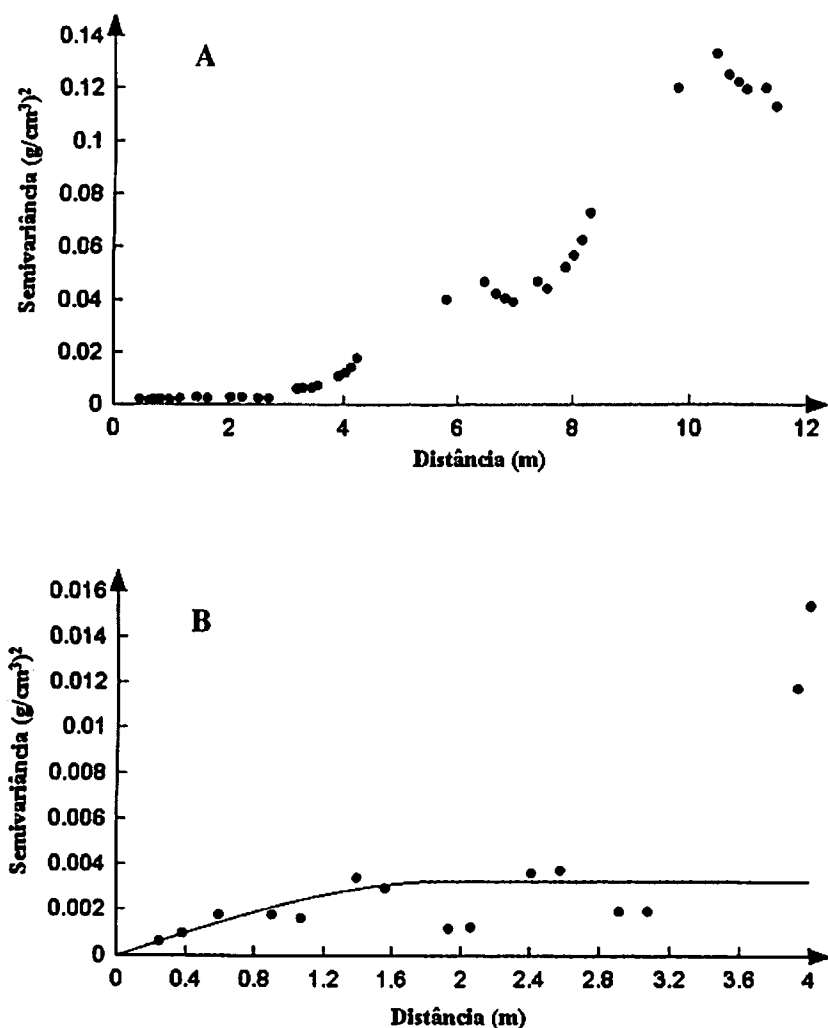


FIGURA 36. Semivariograma sem ajuste (A) e esférico (B) para a densidade do solo do Gleissolo Háplico. Lavras, MG, 2003.

4.4.2.2 Densidade de Partícula (D_p)

Na Tabela 23, é apresentado os parâmetros característicos do modelo ajustado ao semivariograma, mostrando a dependência espacial obtida para D_p

do Gleissolo Háplico ao longo da transeção. Os semivariogramas experimentais são apresentados na Figura 37.

A Figura 37 A mostra o semivariograma para toda a extensão do Gleissolo Háplico na transeção. Este semivariograma apresentou grande semelhança com o semivariograma de Ds (Figura 36 A), mostrando a presença de duas estruturas conjuntas, sendo uma atuando até aproximadamente 7 m e outra, de 7 m em diante. Segundo Vieira et al. (1983), essas estruturas “aninhadas”, com mais de um patamar e mais de um alcance, ocorrem, quando existem diferentes escalas de variabilidade nos dados. Nestes casos um único modelo não seria suficiente para representar o semivariograma.

TABELA 23. Parâmetro do semivariograma ajustado aos dados experimentais de densidade de partícula (Dp) em g/cm^3 , do Gleissolo Háplico. Lavras, MG, 2003.

Atributo	Geoestatística				
	Modelo	C_0	C_0+C_1	a	$C_0/(C_0+C_1)$
Dp	Gaussiano	0,00024	0,0054	4,71	0,044

C_0 – efeito pepita; $C_0 + C_1$ – patamar; a – alcance (m); $C_0/(C_0 + C_1)$ – efeito pepita relativo (%).

Para a Figura 37 B, foi feito um “zoom” nos primeiro 8 m deste solo, onde então, foi possível ajustar o modelo Gaussiano com alcance de 4,71 m.

O alcance obtido para densidade de partícula, provavelmente, deve-se ao fato deste atributo depender, principalmente, da constituição mineralógica, sendo pouco influenciada por fatores induzidos pelo manejo do solo e o pisoteio do gado.

Segundo a classificação de Cambardella et al. (1994), o semivariograma ajustado ao modelo Gaussiano aos dados de densidade de partícula apresentou um nível forte de dependência espacial, com relação ao efeito pepita/patamar.

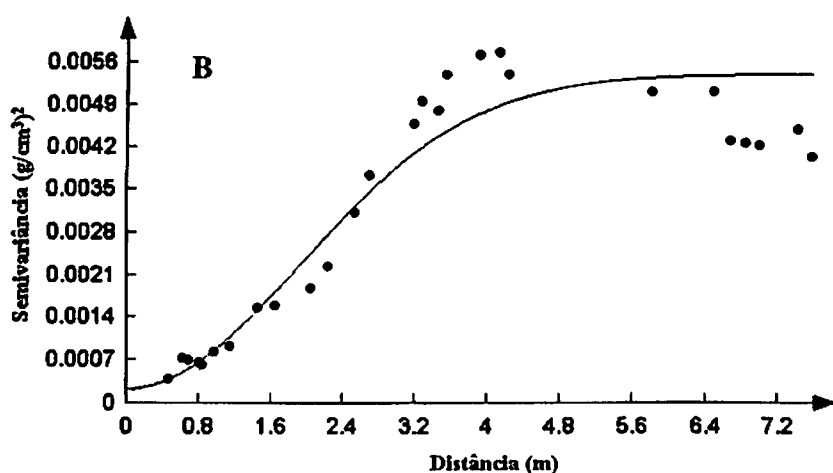
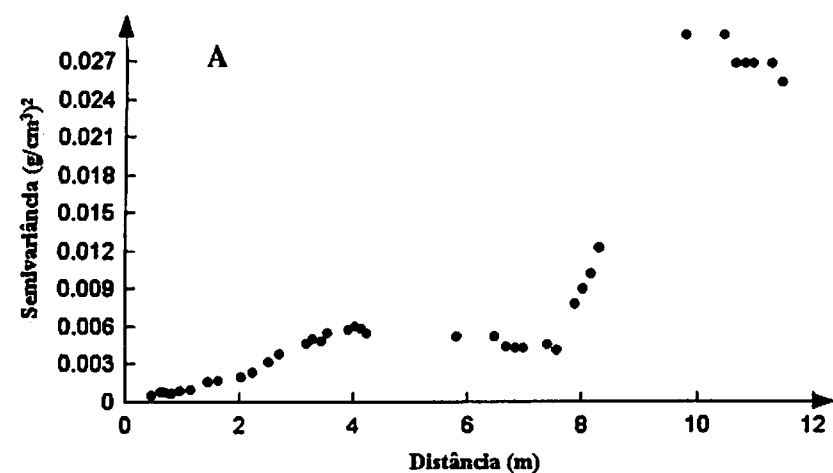


FIGURA 37. Semivariograma sem ajuste (A) e Gaussiano (B) para a densidade de partícula do Gleissolo Háplico. Lavras, MG, 2003.

4.4.2.3 Textura

Na Tabela 24, são apresentados os parâmetros característicos dos modelos ajustados aos semivariogramas, mostrando a dependência espacial obtida para os atributos texturais do Gleissolo Háptico, ao longo da transeção. Os semivariogramas experimentais encontram-se nas Figuras 38, 39 e 40.

TABELA 24. Parâmetros dos semivariogramas ajustados aos dados experimentais de argila, areia e silte em %, do Gleissolo Háptico. Lavras, MG, 2003.

Atributos	Geoestatística				
	Modelo	C_0	C_0+C_1	a	$C_0/(C_0+C_1)$
Argila	Esférico	0	3,95	1,28	0
Areia	Esférico	0,41	1,96	1,08	0,21
Silte	Esférico	0	1,60	0,56	0

C_0 – efeito pepita; $C_0 + C_1$ – patamar; a – alcance (m); $C_0/(C_0 + C_1)$ – efeito pepita relativo (%).

Não foi possível ajustar modelos teóricos para os atributos texturais e para o comprimento total desta classe de solo ao longo da transeção. Entretanto, fazendo-se um “zoom” nos semivariogramas para menores distâncias, foi possível ajustar o modelo esférico para todos os atributos texturais, com alcances 1,28 m, 1,08 m e 0,56 m, respectivamente para argila, areia e silte. O mesmo ajuste de modelo e praticamente o mesmo alcance apresentado pela argila e areia mostram certa dependência destes atributos. Isso, porque, na determinação da composição textural, a fração silte é obtida, indiretamente, por meio de uma combinação linear de argila e areia, medidas, de forma a que as três frações totalizem 100 %, causando possivelmente esta dependência entre os atributos.

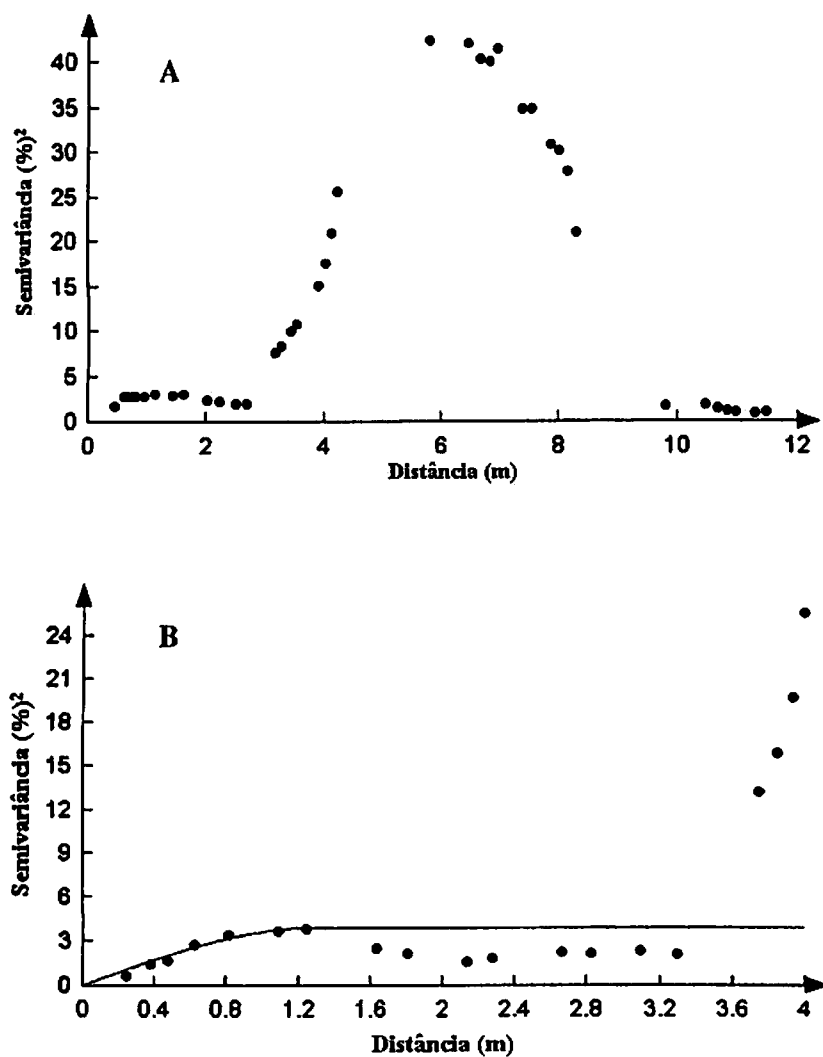


FIGURA 38. Semivariograma sem ajuste (A) e esférico (B) para argila do Gleissolo Háplico. Lavras, MG, 2003.

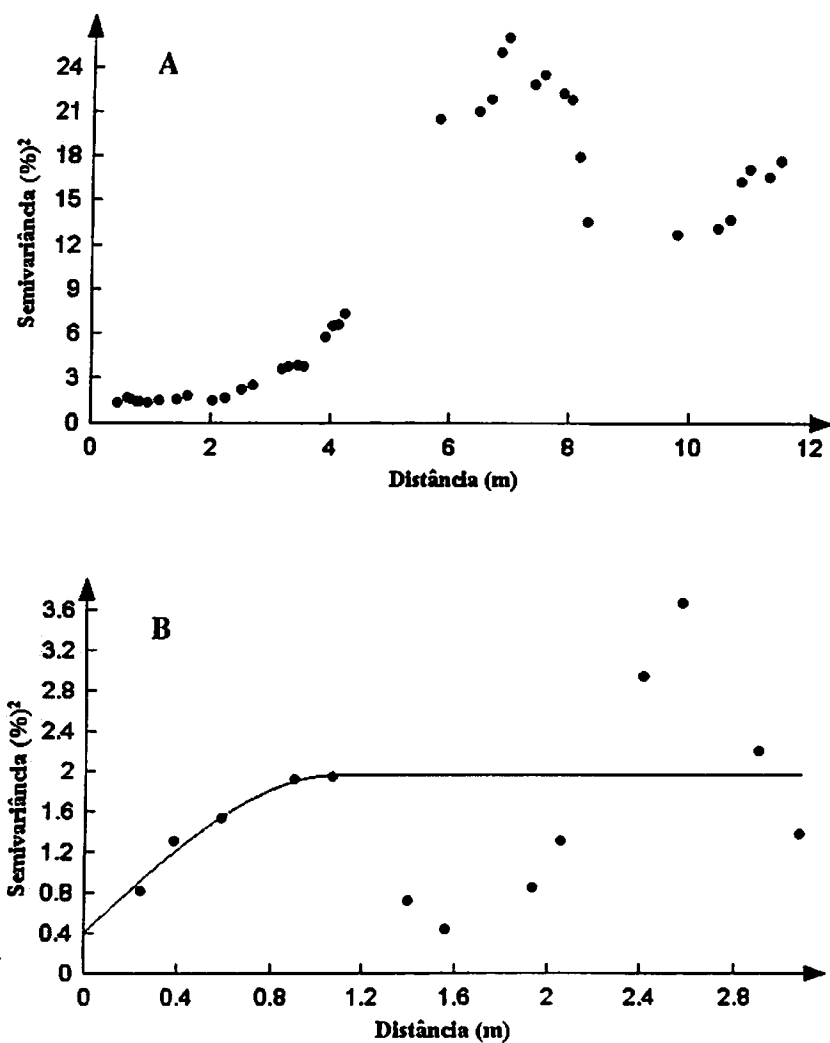


FIGURA 39. Semivariograma sem ajuste (A) e esférico (B) para areia do Gleissolo Háplico. Lavras, MG, 2003.

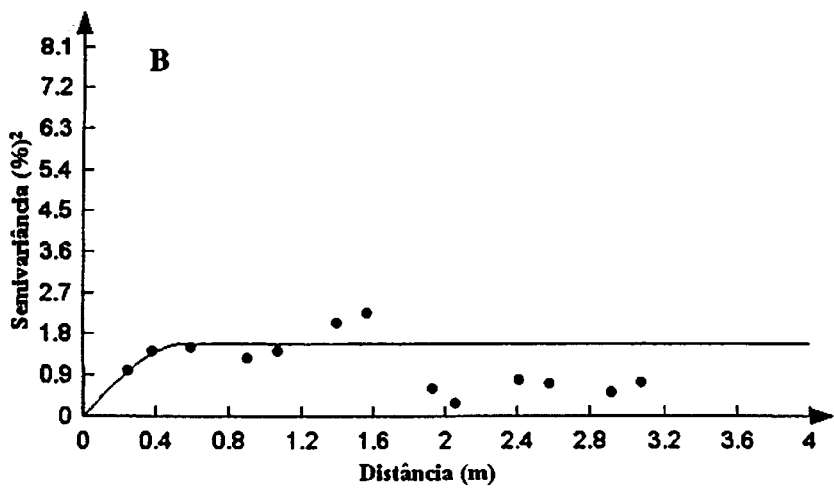
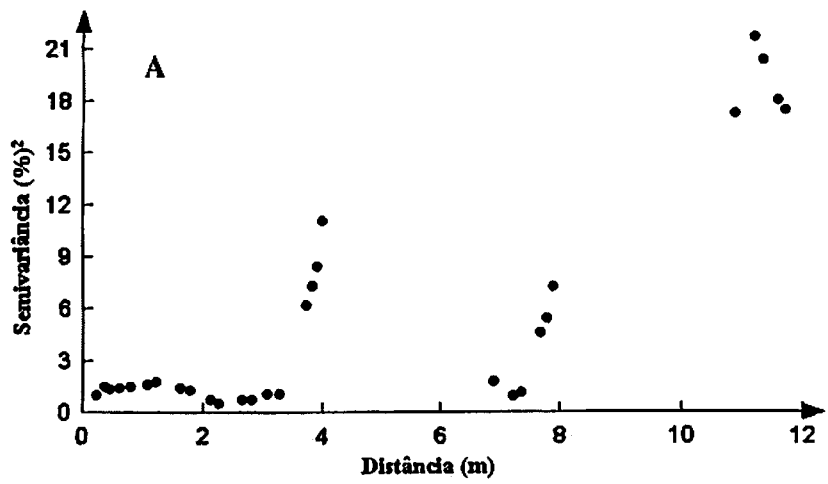


FIGURA 40. Semivariograma sem ajuste (A) e esférico (B) para silte do Gleissolo Háplico. Lavras, MG, 2003.

O pequeno alcance obtido para os atributos texturais em relação aos encontrados por outros autores como Eguchi (2001), Guimarães (2000) e Gonçalves (1997) reflete a grande variabilidade espacial, quando se estuda atributos do solo perpendicular a calha do rio.

Segundo a classificação de Cambardella et al. (1994), os semivariogramas ajustados ao modelo esférico, aos dados texturais, apresentaram um nível forte de dependência espacial, com relação ao efeito pepita/patamar.

4.4.2.4 Volume Total de Poros Calculados (VTPc) e Determinados (VTPd)

Na Tabela 25, são apresentados os parâmetros característicos dos modelos ajustados aos semivariogramas, mostrando a dependência espacial obtida para VTPc e VTPd do Gleissolo Háplico ao longo da transeção. Os semivariogramas experimentais são apresentados nas Figuras 41 e 42.

TABELA 25. Parâmetros dos semivariogramas ajustados aos dados experimentais de volume total de poros calculados (VTPc) e volume total de poros determinados (VTPd) em %, do Gleissolo Háplico. Lavras, MG, 2003.

Atributos	Geoestatística			
	Modelo	C ₀	Inclinação	Potência
VTPc	Potencial	0	1,15	1,99
VTPd	Potencial	1,08	1,03	1,96

C₀ – efeito pepita.

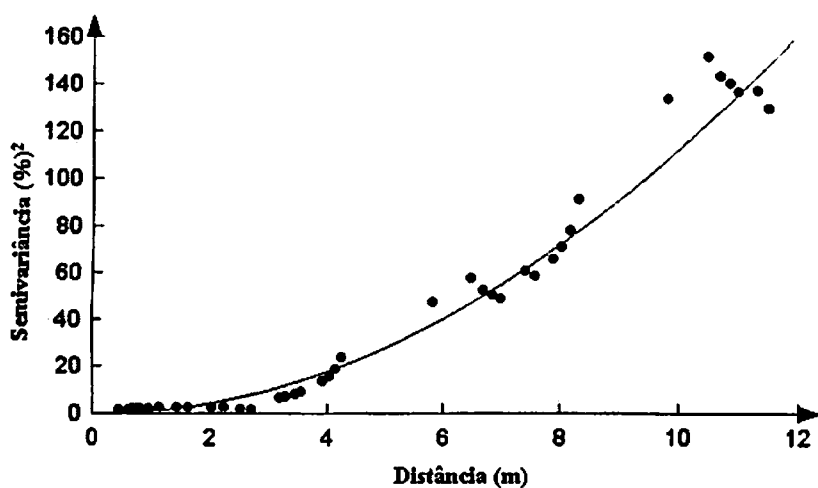


FIGURA 41. Semivariograma ajustado ao modelo potencial para VTPc do Gleissolo Háplico. Lavras, MG, 2003.

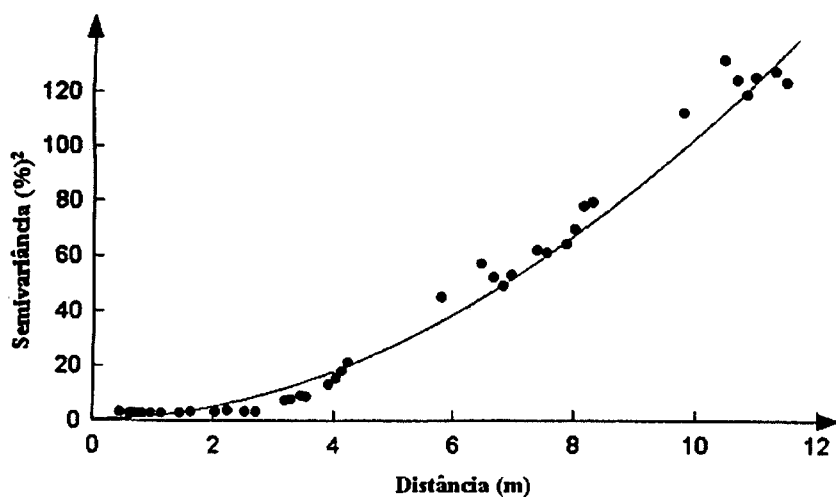


FIGURA 42. Semivariograma ajustado ao modelo potencial para VTPd do Gleissolo Háplico. Lavras, MG, 2003.

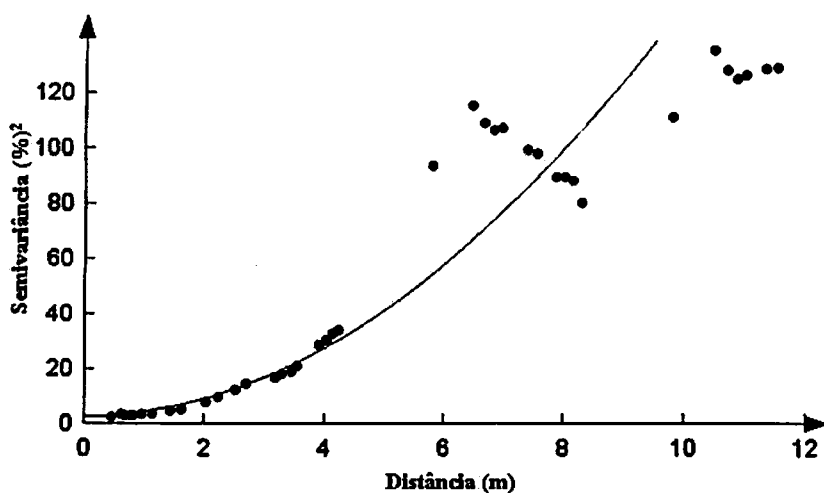


FIGURA 44. Semivariograma ajustado ao modelo potencial para Micro do Gleissolo Háplico. Lavras, MG, 2003.

O atributo Micro foi ajustado ao modelo potencial, pois, mesmo com “zoom”, não foi possível ajustar um semivariograma com patamar para estabelecer o alcance da dependência espacial. Isso pode ter ocorrido devido à pequena extensão desta classe de solo na transeção, fazendo com que o pequeno número de amostras coletadas desta classe de solo não fosse suficiente para determinar a dependência espacial, que pode ter extrapolado para classe de solo posterior da transeção.

4.4.2.6 Permeabilidade Intrínseca (K')

Na Tabela 27 são apresentados os parâmetros do semivariograma, para o atributo K', para o Gleissolo Háplico, ao longo da transeção. Os semivariogramas são apresentados na Figura 45.

TABELA 27. Parâmetros dos semivariogramas ajustados aos dados experimentais de permeabilidade intrínseca em cm^2 , do Gleissolo Háplico. Lavras, MG, 2003.

Atributos	Geoestatística				
	Modelo	C_0	C_0+C_1	a	$C_0/(C_0+C_1)$
K'	Esférico	4.10^{-12}	$1,2.10^{-11}$	1,06	0,33

C_0 – efeito pepita; $C_0+ C_1$ – patamar; a – alcance (m); $C_0/(C_0+ C_1)$ – efeito pepita relativo (%).

Pelo semivariograma, da Figura 45 A, observa-se que não foi possível ajustar aos dados experimentais deste atributo a um modelo teórico para toda a extensão desta classe de solo, apesar de uma certa estrutura de distribuição dos dados. Esta estrutura tende a um efeito pepita puro ou ausência total de dependência espacial.

Segundo a classificação de Cambardella et al. (1994), o semivariograma da Figura 45 B ajustado ao modelo esférico ao atributo K' apresentou um nível moderado de dependência espacial, com relação ao efeito pepita/patamar.

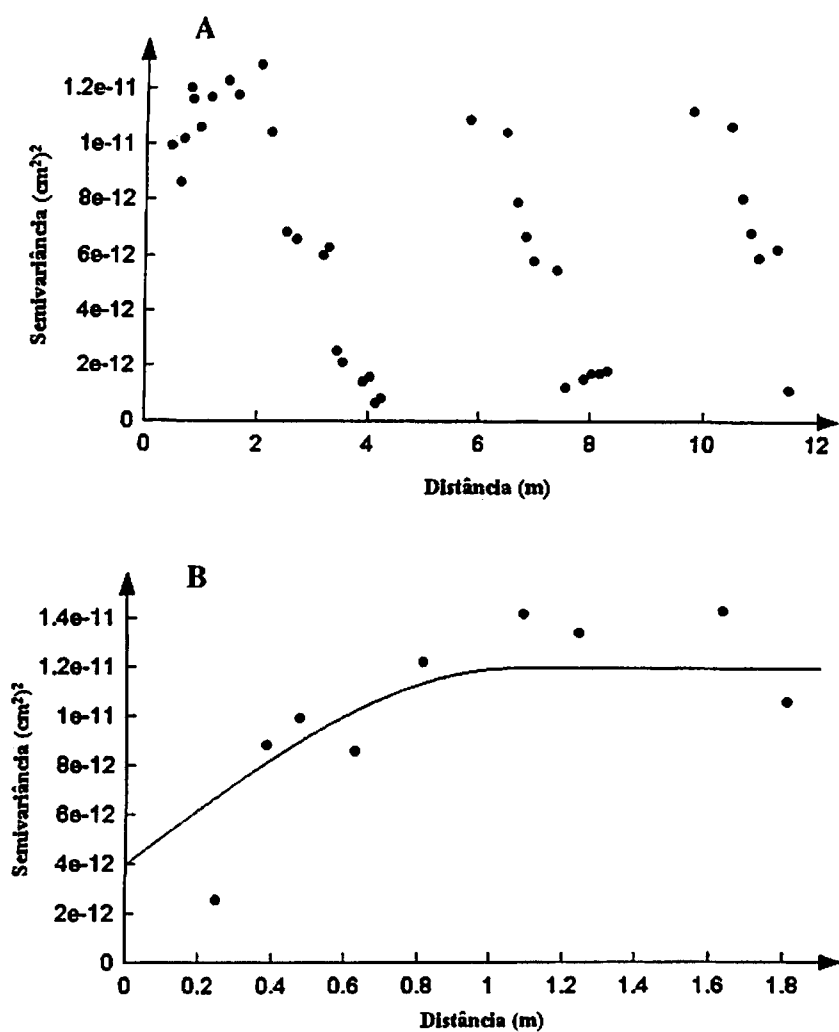


FIGURA 45. Semivariograma sem ajuste (A) e esférico (B) para K' do Gleissolo Háplico. Lavras, MG, 2003.

4.5 Gleissolo Melânico (GM)

4.5.1 Análise descritiva e inferências clássicas

4.5.1.1 Densidade do solo (Ds), Densidade de Partícula (Dp) e Textura

O Gleissolo Melânico compreendeu os últimos 24 m da transeção em estudo. A Tabela 28 mostra as estatísticas descritivas das propriedades densidade do solo, densidade de partícula e textura, para os dados obtidos em 14 pontos da transeção.

Na classificação da USDA, pelos valores texturais médios encontrados, o Gleissolo Melânico (GM) apresenta textura franca.

Pelos limites de coeficiente de variação proposto por Warrick & Nielsen (1980) para a classificação de variáveis do solo ($CV < 12\%$), ($12\% < CV < 60\%$) e ($CV > 60\%$) para baixa, média e alta variabilidade, respectivamente, pode-se dizer que os atributos apresentados na Tabela 28 são de baixa variabilidade, com exceção do atributo argila, que apresentou variabilidade média.

Os valores das medidas de tendência central (média, mediana e moda) são semelhantes para todos os atributos, o que dá indícios de simetria da distribuição dos dados, conforme Costa Neto (1990). Pelas medidas de dispersão assimetria e curtose, que apresentam resultados próximos de 0 e 3, respectivamente, e também pelo valor de probabilidade de Shapiro-Wilk acima de 5%, verifica que a distribuição de normalidade se confirma para todos atributos texturais. Esta foi a única classe de solo pertencente a transeção que apresentou normalidade na distribuição dos dados para todos os atributos da Tabela 28. Esses resultados são diferentes dos obtidos por Eguchi (2001), que apresentou normalidade apenas para o atributo densidade de partícula, e também, diferem dos resultados entre as classes de solos anteriores, refletindo a grande variabilidade entre elas.

TABELA 28. Estatística descritiva dos dados da densidade do solo (Ds), densidade de partícula (Dp), argila, areia e silte para o Gleissolo Melânico (GM). Lavras, MG, 2003.

Parâmetros Estatísticos	Atributos				
	Ds (g/cm ³)	Dp (g/cm ³)	Argila (%)	Areia (%)	Silte (%)
N	14	14	14	14	14
$\bar{X}$	0,76	2,19	23,42	37,33	39,24
Md	0,76	2,19	23,26	37,46	39,09
Mod	0,76	2,18	22,77	37,54	39,02
s ²	0,002	0,007	11,71	6,44	5,61
S	0,04	0,08	3,42	2,54	2,37
CV	5,47	4,03	14,61	6,80	6,04
Assi.	-0,99	0,15	0,59	0,34	-0,23
Curt.	4,30	2,43	3,09	2,41	2,36
Min.	0,65	2,02	17,79	33,17	34,74
Max.	0,81	2,33	30,93	42,27	42,99
A	0,16	0,31	13,14	9,10	8,25
S.W	0,17945	0,71613	0,65145	0,90747	0,97405

n – tamanho da amostra; $\bar{X}$ – média; Md – mediana; Mod – moda; s² – variância; s – desvio padrão; CV – Coeficiente de variação; Assi. – coeficiente de assimetria; Curt. – coeficiente de curtose; Min. – mínimo; Max. – máximo; A – amplitude; S.W – valor de probabilidade de Shapiro-Wilk.

4.5.1.2 Porosidades e Permeabilidade Intrínseca (K')

Na Tabela 29, é apresentada a estatística descritiva das demais propriedades estudadas do Gleissolo Melânico, para os dados obtidos em 14 pontos amostrais, da transeção.

TABELA 29. Estatística descritiva dos dados de volume total de poros calculado (VTPc), volume total de poros determinado (VTPd), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro) e permeabilidade intrínseca (K') para o Gleissolo Melânico (GM). Lavras, MG, 2003.

Parâmetros	Atributos				
Estatísticos	VTPc (%)	VTPd (%)	Macro (%)	Micro (%)	K' (cm ²).10 ⁻⁷
N	14	14	14	14	14
$\bar{X}$	65,39	63,86	10,57	53,29	25,052
Md	65,17	63,37	10,84	52,89	20,907
Mod	65,14	63,06	10,97	52,52	14,849
s ²	2,35	2,23	4,67	6,31	185,532
S	1,53	1,49	2,16	2,51	13,621
CV	2,34	2,34	20,43	4,71	54,37
Assi.	1,31	0,31	-0,96	0,16	0,76
Curt.	4,65	3,00	4,14	3,20	2,23
Min.	63,42	61,03	5,08	48,27	10,811
Max.	69,42	66,66	13,72	58,49	51,196
A	6,00	5,63	8,64	10,22	40,385
S.W	0,07235	0,42697	0,25388	0,94993	0,05223

n – tamanho da amostra; $\bar{X}$ – média; Md – mediana; Mod – moda; s² – variância; s – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; Assi. – coeficiente de assimetria; Curt. – coeficiente de curtose; Min. – mínimo; Max. – máximo; A – amplitude; S.W – valor de probabilidade de Shapiro-Wilk.

Observando-se os coeficientes de variação, constata-se baixa variação dos dados, de acordo com o critério apresentado por Warrick & Nielsen (1980), para os atributos VTPc, VTPd e Micro, os quais apresentaram CVs abaixo de 5 %. Os atributos Macro e K' apresentaram CVs médio. Esses resultados são

semelhantes aos obtidos por Guimarães (2000), em que a elevada variabilidade dos atributos, que apresentaram valores superiores a 50 % dos CVs, pode ser explicado pela heterogeneidade estrutural do solo, como também pela presença de raízes, atividade microbiana e rachaduras ocasionadas pelas épocas de estiagens, entre outros fatores, como o pisoteio do gado, visto que, atualmente, a área esta sendo utilizada como pastagem.

A semelhança entre os valores de média, mediana e moda indica a simetria da distribuição dos dados para os atributos da Tabela 29, uma vez que na distribuição normal a média aritmética e a mediana são parecidas, segundo Costa Neto (1990), porém, ao analisar as medidas de dispersão assimetria e curtose, juntamente com o valor de probabilidade de Shapiro-Wilk, observa-se que todos os atributos apresentaram distribuição normal dos dados.

4.5.2 Análise da variabilidade espacial por meio de semivariogramas

4.5.2.1 Densidade do solo (Ds)

Na Tabela 30, são apresentados os parâmetros característicos do modelo ajustado ao semivariograma, mostrando a dependência espacial obtida da Ds do Gleissolo Melânico ao longo da transeção. Os semivariogramas experimentais são apresentados na Figura 46.

TABELA 30. Parâmetros dos semivariogramas ajustados aos dados experimentais de densidade do solo (Ds) em g/cm^3 , do Gleissolo Melânico. Lavras, MG, 2003.

Atributos	Geoestatística				
	Modelo	C_0	C_0+C_1	a	$C_0/(C_0+C_1)$
Ds	Esférico	0,00014	0,00168	3,46	0,08

C_0 – efeito pepita; C_0+C_1 – patamar; a – alcance (m); $C_0/(C_0+C_1)$ – efeito pepita relativo (%).

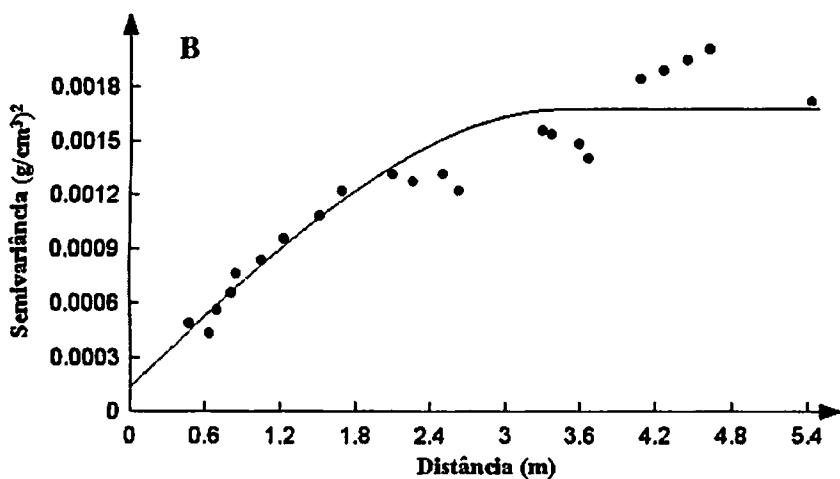
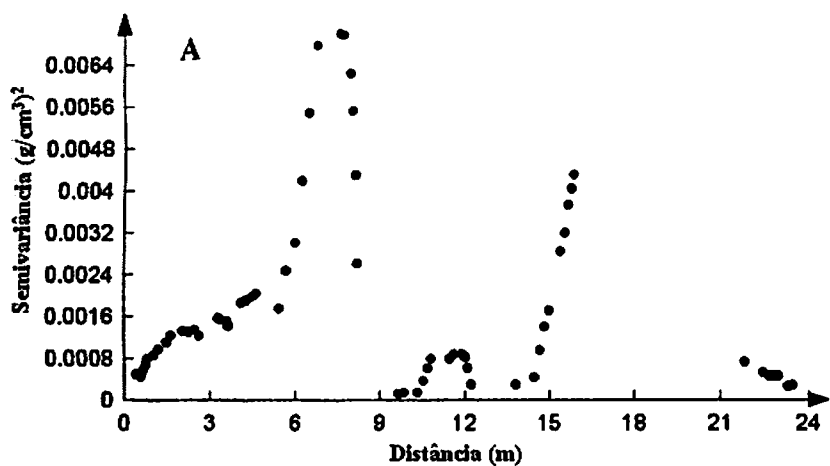


FIGURA 46. Semivariograma sem ajuste (A) e esférico (B) para a densidade do solo do Gleissolo Melânico. Lavras, MG, 2003.

Como as classes de solos anteriores, também não foi possível o ajuste de nenhum modelo teórico aos dados de Ds para toda a extensão deste solo. Foi feito um “zoom” nos primeiros 5,4 m deste solo (Figura 54 B), onde, então, foi possível ajustar o modelo esférico com alcance de 3,46 m. Eguchi (2001), encontrou em seu trabalho um alcance de 8,00 m para densidade do solo Aluvial de dados obtidos paralelos ao curso d’água, e Gonçalves (1997) ajustou um modelo esférico e encontrou para o atributo Ds um alcance de cerca de 25 m, para o solo Podzólico Vermelho Escuro. Esses resultados apontam um maior alcance já esperado, para solos não hidromórficos, e vem a confirmar uma maior variabilidade espacial, quando se estuda uma transeção em solos hidromórficos perpendicular ao curso d’água.

O efeito pepita relativo de 8 % classifica, segundo Cambardella et al. (1994), como forte a dependência espacial para este atributo.

4.5.2.2 Densidade de Partícula (Dp)

Na Tabela 31, são apresentados os parâmetros característicos do modelo ajustado ao semivariograma, mostrando a dependência espacial obtida para densidade de partícula, ao longo da transeção. Os semivariogramas experimentais encontram-se na Figura 47.

TABELA 31. Parâmetros dos semivariogramas ajustados aos dados experimentais de densidade de partícula (Dp) em g/cm³, do Gleissolo Melânico. Lavras, MG, 2003.

Atributo	Geoestatística				
	Modelo	C _o	C _o +C ₁	a	C _o / (C _o +C ₁)
Dp	Gaussiano	0,002	0,01	1,72	0,2

C_o – efeito pepita; C_o+ C₁ – patamar; a – alcance (m); C_o/(C_o+ C₁) – efeito pepita relativo (%).

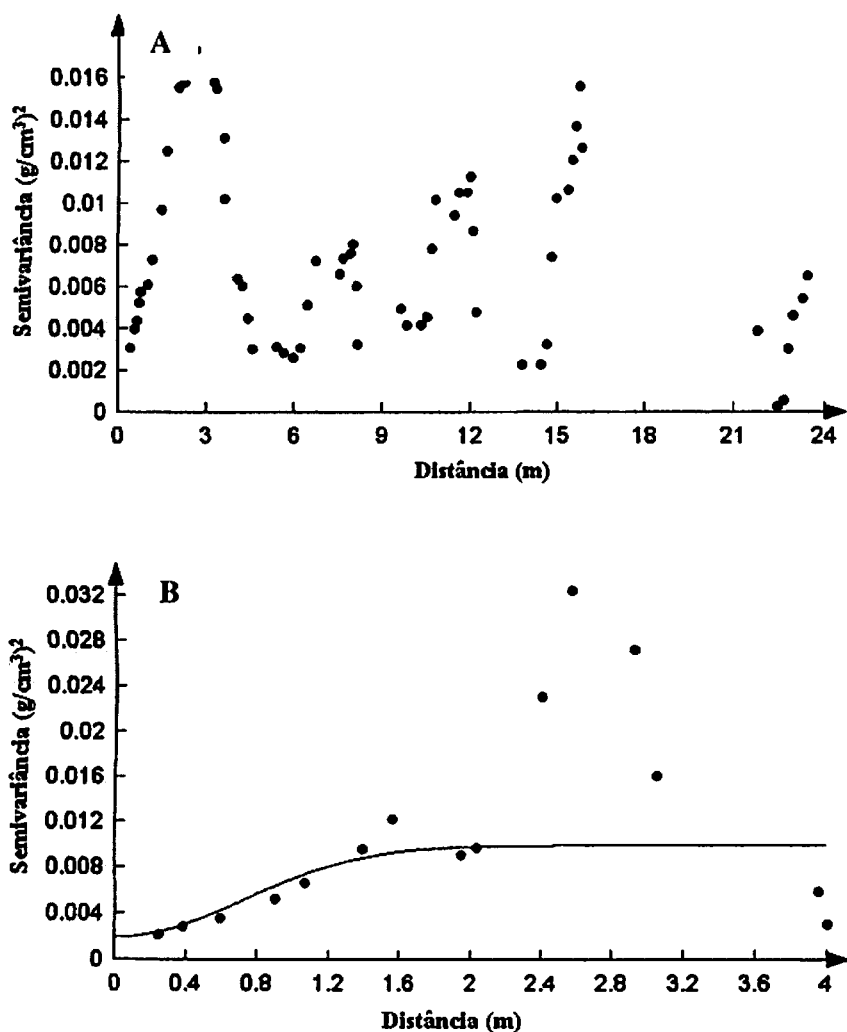


FIGURA 47. Semivariograma sem ajuste (A) e Gaussiano (B) para densidade de partícula do Gleissolo Melânico. Lavras, MG, 2003.

Pela Figura 47 A, observa-se que, assim como para D_s , também não foi possível o ajuste dos dados da D_p a um modelo teórico para toda esta classe de solo na transeção. Os dados deste atributo mostraram coerência na dependência espacial até aproximadamente 3 m, onde a partir daí, com o aumento da

distância, a semivariância vai se tornando cada vez menor, indicando que, com o aumento da distância, a dependência espacial entre as amostras se torna maior, o que contradiz a teoria das variáveis regionalizadas. Segundo Vieira (2000), esse fenômeno é indicação de periodicidade nos dados e requer um tratamento específico chamado de densidade espectral. Esse assunto está descrito em Vieira et al. (1983), com os detalhes necessários. A partir dos 6 m, as distribuições das semivariâncias passam a ser completamente aleatórias.

No semivariograma da Figura 47 B, com o “zoom” realizado à distância de 4 m, foi possível o ajuste do modelo Gaussiano com o alcance de 1,72 m.

O efeito pepita relativo de 20 %, segundo Cambardella et al. (1994), classifica como forte a dependência espacial para este alcance.

4.5.2.3 Textura

Na Tabela 32, são apresentados os parâmetros característicos dos modelos ajustados aos semivariogramas, mostrando a dependência espacial obtida para os atributos texturais do Gleissolo Melânico, ao longo da transeção. Os semivariogramas experimentais encontram-se nas Figuras 48, 49 e 50.

TABELA 32. Parâmetros dos semivariogramas ajustados aos dados experimentais de argila, areia e silte em %, do Gleissolo Melânico. Lavras, MG, 2003.

Atributos	Geoestatística				
	Modelo	C_0	C_0+C_1	a	$C_0/(C_0+C_1)$
Argila	Esférico	8,58	19,58	1,29	0,44
Areia	Esférico	4,50	7,44	0,69	0,60
Silte	Gaussiano	5,25	10,55	1,03	0,50

C_0 – efeito pepita; $C_0 + C_1$ – patamar; a – alcance (m); $C_0/(C_0 + C_1)$ – efeito pepita relativo (%).

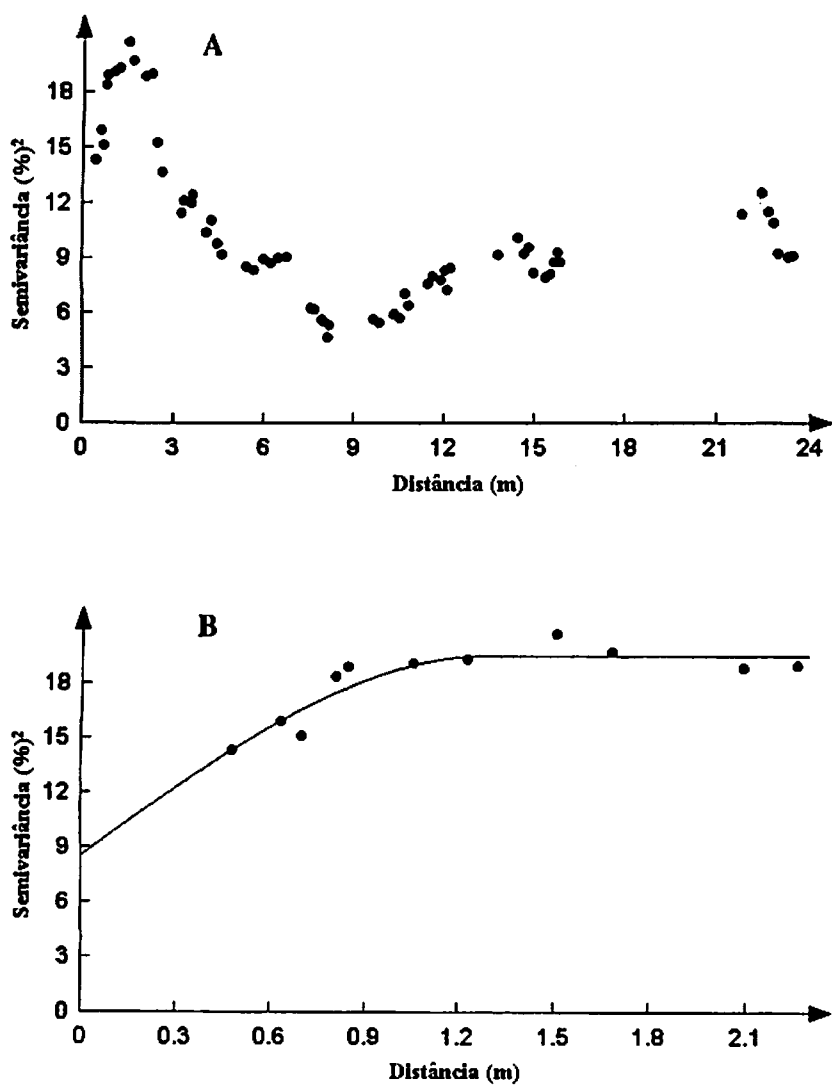


FIGURA 48. Semivariograma sem ajuste (A) e esférico (B) para argila do Gleissolo Melânico. Lavras, MG, 2003.

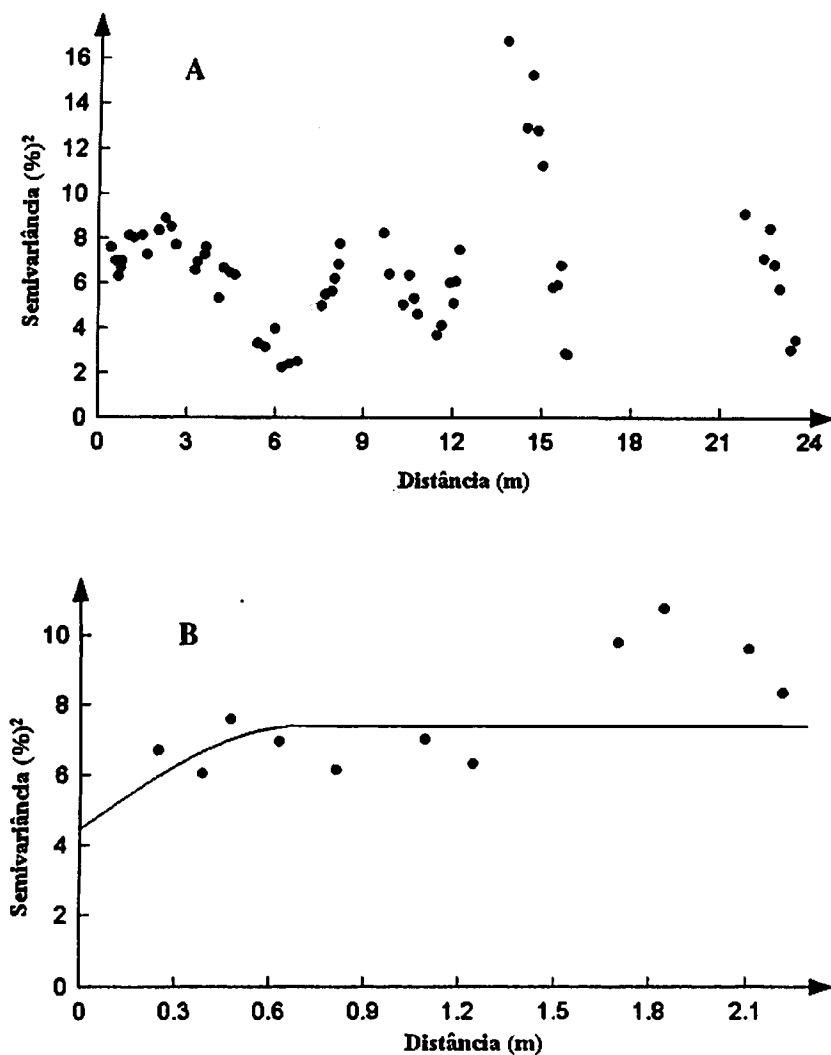


FIGURA 49. Semivariograma sem ajuste (A) e esférico (B) para areia do Gleissolo Melânico. Lavras, MG, 2003.

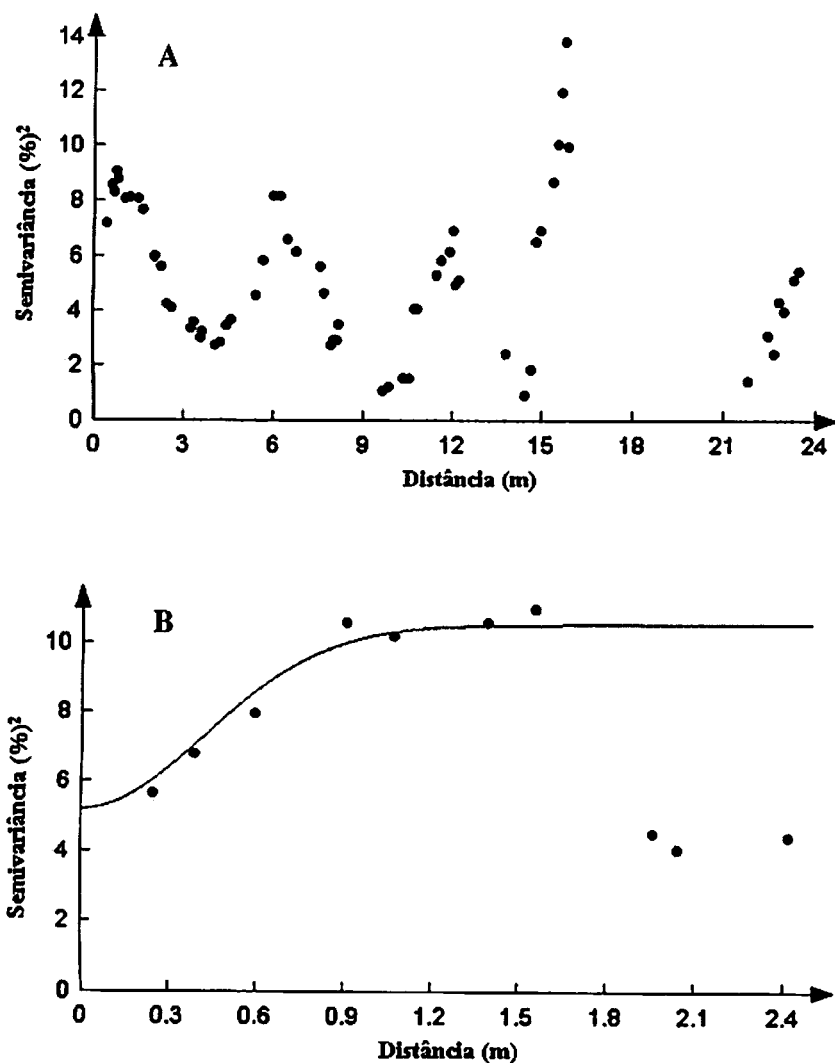


FIGURA 50. Semivariogramas sem ajuste (A) e Gaussiano (B) para silte do Gleissolo Melânico. Lavras, MG, 2003.

Pelos semivariogramas, nota-se que não foi possível um ajuste ao modelo teórico para nenhum atributo textural para o comprimento total desta classe de solo na transeção. Percebe-se, nos semivariogramas de areia e silte (Figuras 49 A e 50 A), uma periodicidade nos dados, o que requer um tratamento específico, chamado de densidade espectral. Esta periodicidade também ocorreu nos dados de Dp. No semivariograma de argila (Figura 48 A), percebe-se um aumento da semivariância até a distância de aproximadamente 1,5 m, onde a partir daí, com o aumento da distância, o valor da semivariância começa a cair, indicando aumento da correlação entre as amostras e contradizendo a teoria das variáveis regionalizadas. Isso pode ter ocorrido devido à influência da classe de solo anterior desta transeção, pois os metros iniciais dos semivariogramas são regiões de transição de uma classe de solo para outra.

Fazendo-se um “zoom”, obteve-se o ajuste ao modelo esférico para os atributos argila e areia (Figuras 48 B e 49 B) e o modelo Gaussiano para silte (Figura 50 B). O atributo textural que obteve maior dependência espacial foi a argila com alcance de 1,29 m.

Segundo Cambardella et al. (1994), pela relação entre efeito pepita/patamar, estes atributos apresentaram dependência espacial moderada.

Guimarães (2000), em seus estudos, obteve para o Latossolo Vermelho Escuro, alcances entre 30 m e 60 m para os atributos texturais, e Eguchi (2001) para o solo Aluvial obteve alcance superior a 14 m chegando aproximadamente a 50 m para o atributo argila. Esses resultados demonstram uma menor dependência espacial em solos hidromórficos e, principalmente, quando se estuda a variabilidade destes atributos perpendicular a calha d'água de um rio.

4.5.2.4 Volume Total de Poros Calculados (VTPc) e Determinados (VTPd)

Na Tabela 33, são apresentados os parâmetros característicos dos modelos ajustados aos semivariogramas, mostrando a dependência espacial obtida de VTPc e VTPd para o Gleissolo Melânico, ao longo da transeção. Os semivariogramas experimentais são apresentados nas Figuras 51 e 52.

Observa-se, nas Figuras 51 A e 52 A, que não foi possível ajustar um modelo teórico para os atributos VTPc e VTPd, para o comprimento total desta classe de solo na transeção. Estes semivariogramas demonstraram grande semelhança, indicando certa correlação entre os atributos, apesar de o VTPc ser calculado em função da densidade do solo e de partículas, e o VTPd ser determinado em função da umidade, com base em volume, quando o solo se encontra saturado. Assim como os atributos anteriores, estes também apresentaram periodicidade dos dados, e requer, segundo Vieira et al. (1983), um tratamento específico chamado de densidade espectral.

TABELA 33. Parâmetros dos semivariogramas ajustados aos dados experimentais de volume total de poros calculados (VTPc) e determinados (VTPd) em %, do Gleissolo Melânico. Lavras, MG, 2003.

Atributos	Geoestatística			
	Modelo	C_0	Inclinação	Potência
VTPc	Potencial	0,62	0,19	1,99
VTPd	Potencial	0,99	0,14	1,99

C_0 – efeito pepita; $C_0 + C_1$ – patamar; a – alcance (m); $C_0/(C_0 + C_1)$ – efeito pepita relativo (%).

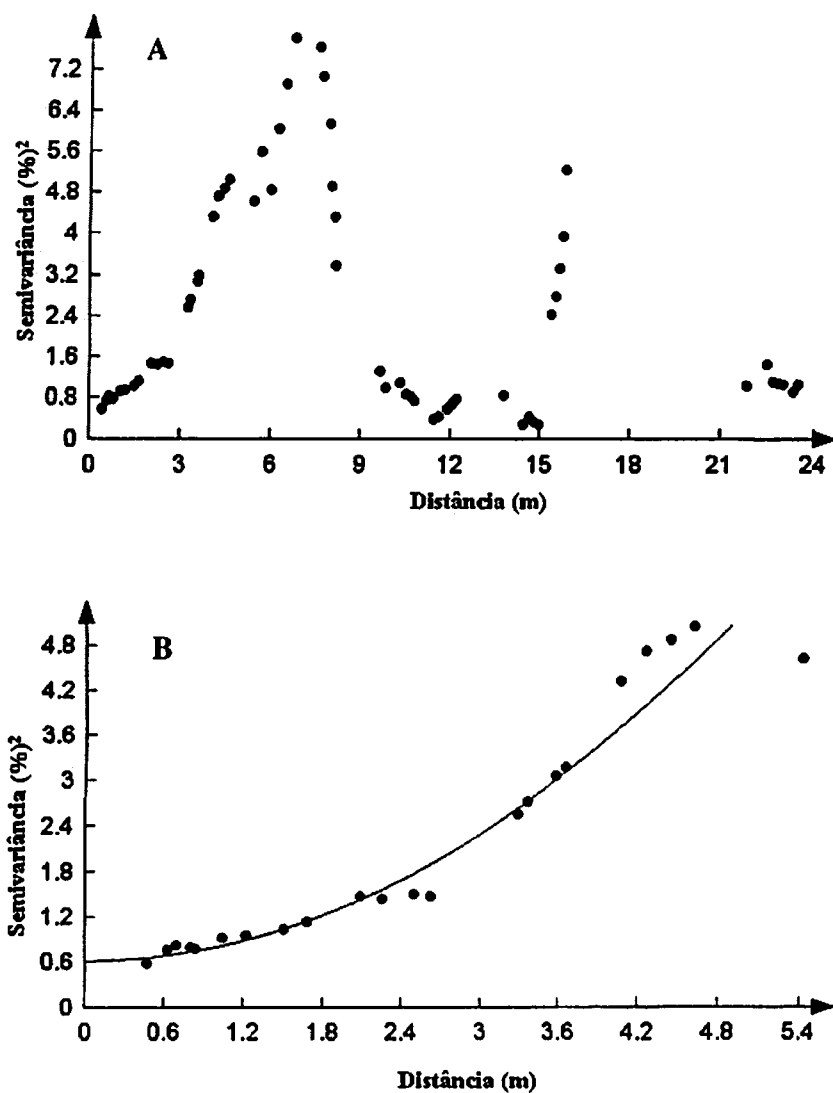


FIGURA 51. Semivariograma sem ajuste (A) e potencial (B) para VTPc do Gleissolo Melânico. Lavras, MG, 2003.

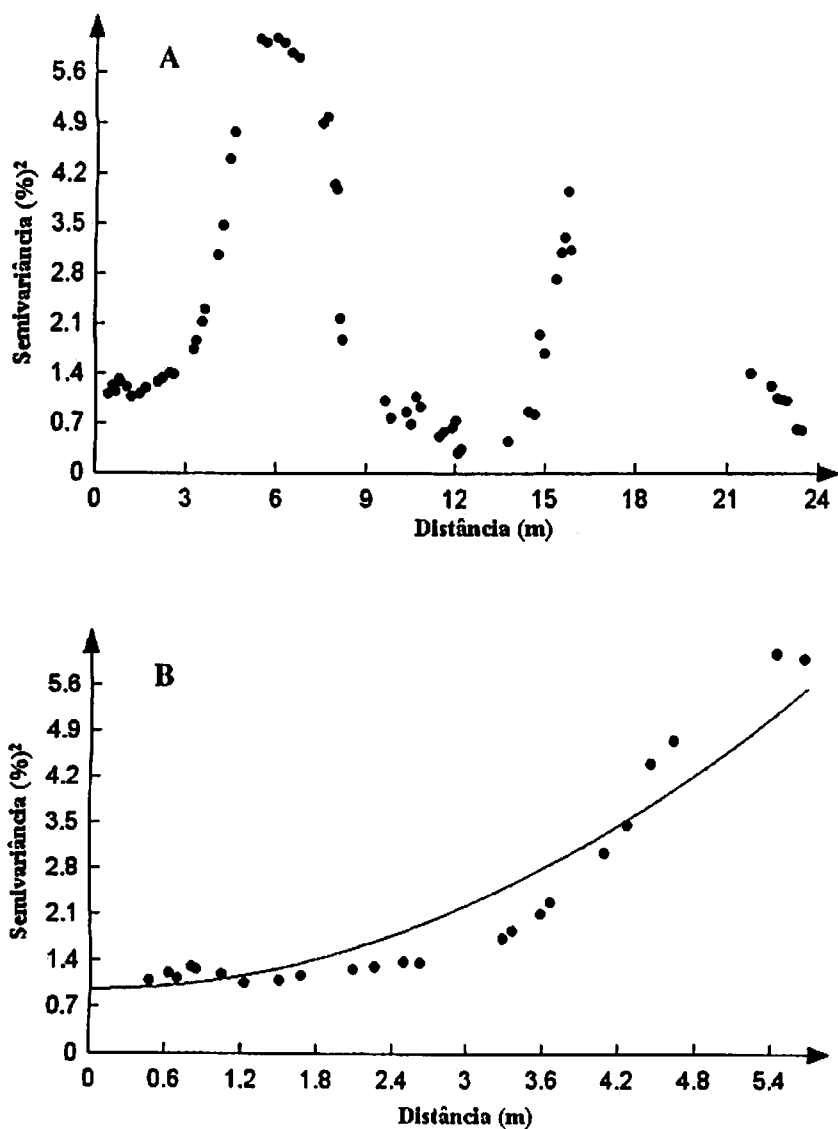


FIGURA 52. Semivariograma sem ajuste (A) e potencial (B) para VTPd do Gleissolo Melânico. Lavras, MG, 2003.

Nos semivariogramas das Figuras 51 B e 52 B, foi realizado um “zoom” para a distância de 5,4 m, e não foi possível ajustar um modelo com patamar, ou seja, não foi possível determinar o alcance destes atributos. O único modelo teórico possível de ajuste para esta distância foi o modelo potencial. Cabe ressaltar que a partir dos 5,4 m a semivariância começa a cair com o incremento da distância, sendo este modelo potencial valido somente até 5,4 m.

4.5.2.5 Macroporosidade (Macro) e Microporosidade (Micro)

Na Tabela 34, são apresentados os parâmetros característicos dos modelos ajustados aos semivariogramas, mostrando a dependência espacial obtida de Macro e Micro para o Gleissolo Melânico, ao longo da transeção. Os semivariogramas experimentais são apresentados nas Figuras 53 e 54.

Como anteriormente, devido à grande variabilidade espacial, não foi possível ajustar nenhum modelo teórico para toda a extensão do Gleissolo Melânico na transeção (Figuras 53 A e 54 A). Os dados destes atributos mostraram forte tendência ao efeito pepita puro, ou seja, distribuição espacial completamente aleatória, e que única estatística provavelmente aplicável é a Estatística Clássica.

TABELA 34. Parâmetros dos semivariogramas ajustados aos dados experimentais de macroporosidade (Macro) e microporosidade (Micro) em %, do Gleissolo Melânico. Lavras, MG, 2003.

Atributos	Geostatística				
	Modelo	C_0	C_0+C_1	a	$C_0/(C_0+C_1)$
Macro	Esférico	2,20	6,60	0,84	0,33
Micro	Esférico	4,48	10,38	1,36	0,43

C_0 – efeito pepita; $C_0 + C_1$ – patamar; a – alcance (m); $C_0/(C_0 + C_1)$ – efeito pepita relativo (%).

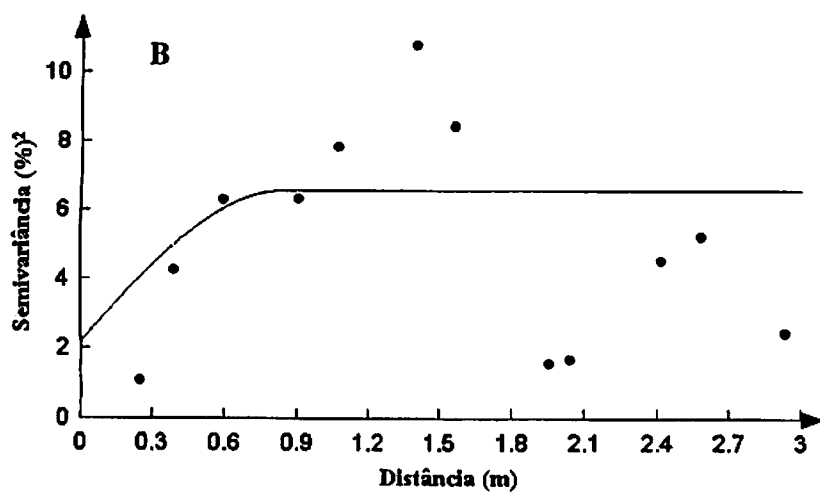
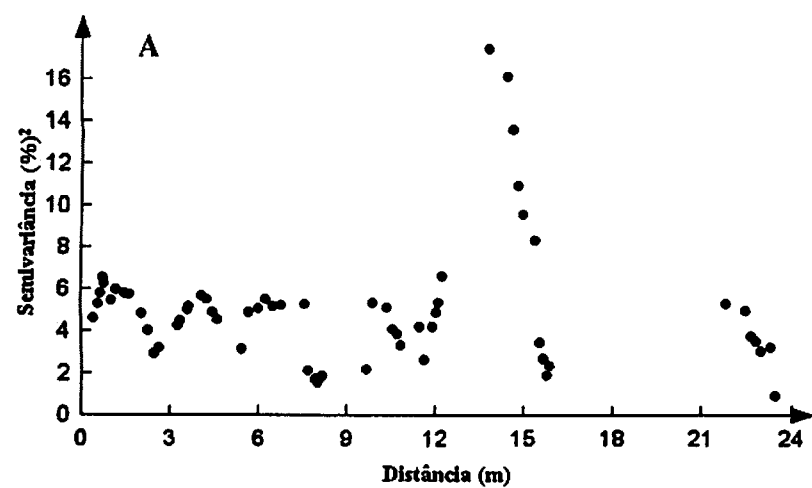


FIGURA 53. Semivariograma sem ajuste (A) e esférico (B) para Macro do Gleissolo Melânico. Lavras, MG, 2003.

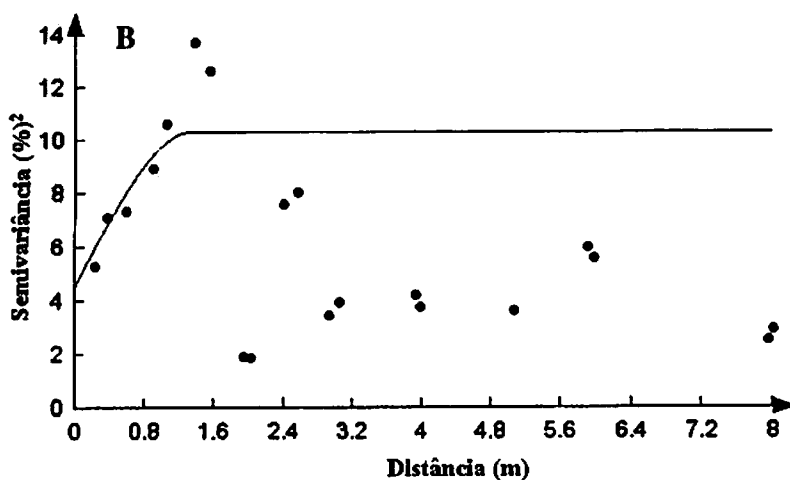
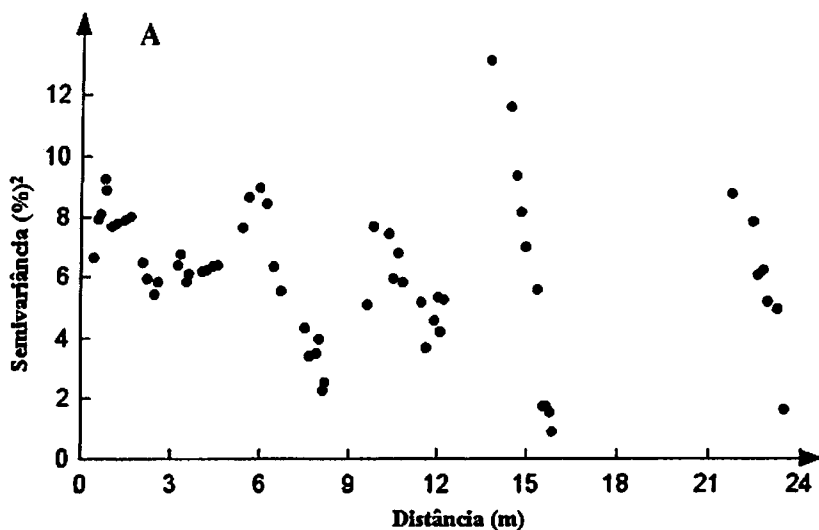


FIGURA 54. Semivariograma sem ajuste (A) e esférico (B) para Micro do Gleissolo Melânico. Lavras, MG, 2003.

Através do “zoom” realizado, foi possível ajustar o modelo esférico aos atributos Macro e Micro (Figuras 53 B e 54 B), com alcance de 0,84 m e 1,36 m, respectivamente, com moderada dependência espacial em relação ao efeito

pepita/patamar, segundo Cambardella et al. (1994). Eguchi (2001), estudando solo Aluvial paralelo ao curso d'água, conseguiu para Macro um ajuste dos dados experimentais ao modelo esférico com alcance de 2,00 m, para Micro um ajuste exponencial com alcance de 12,50 m, todos com forte dependência espacial. Esses resultados demonstram uma maior desorganização na estrutura espacial quando se estuda os atributos do solo perpendicular a calha do rio, que é o caso deste trabalho.

4.5.2.6 Permeabilidade Intrínseca (K')

Na Tabela 35, são apresentados os parâmetros característicos do modelo ajustado ao semivariograma, mostrando a dependência espacial obtida de K' para Gleissolo Melânico, ao longo da transeção. O semivariograma experimental é apresentado na Figura 55.

TABELA 35. Parâmetros dos semivariogramas ajustados aos dados experimentais de permeabilidade intrínseca (K') em cm², do Gleissolo Melânico. Lavras, MG, 2003.

Atributos	Geoestatística				
	Modelo	C ₀	C ₀ +C ₁	a	C ₀ /(C ₀ +C ₁)
K'	Esférico	0	2,0.10 ⁻¹²	1,33	0

C₀ – efeito pepita; C₀+ C₁ – patamar; a – alcance (m); C₀/(C₀+ C₁) – efeito pepita relativo (%).

O semivariograma experimental dos dados de K' foi ajustado ao modelo esférico, com alcance de 1,33 m. Este ajuste só foi possível após a realização do “zoom” no semivariograma experimental à distância de 2,1 m.

Segundo a classificação de Cambardella et al. (1994), esse semivariograma apresentou um nível forte de dependência espacial, com relação ao efeito pepita relativo.

Tabela 36. Coeficiente de variação em %, dos atributos estudados dos solos: Neossolo Flúvico (RU), Cambissolo (C), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Gleissolo Háplico (GX) e Gleissolo Melânico (GM). Lavras, MG, (2003).

Atributos	Classe de Solos				
	RU	C	PVA	GX	GM
Ds (g/cm ³)	7,79	5,13	3,78	7,50	5,47
Dp (g/cm ³)	3,95	2,09	1,53	1,89	4,03
Argila (%)	5,80	3,23	9,01	4,42	14,61
Areia (%)	27,02	4,01	3,68	15,53	6,80
Silte (%)	5,18	7,89	8,72	8,73	6,04
VTPc (%)	5,47	6,11	4,71	6,36	2,34
VTPd (%)	6,23	5,03	4,31	6,97	2,34
Macro (%)	48,31	64,32	41,59	22,04	20,43
Micro (%)	7,11	7,05	7,29	13,06	4,71
K' (cm ²)	93,82	175,56	68,07	92,87	54,37

Pelos resultados das Tabelas 37 e 38, também é notório que existe um padrão na estrutura de variabilidade, sendo o solo PVA, o mais bem estruturado, com um comportamento bem definido da variabilidade espacial, reconhecido através dos semivariogramas. Este solo, apesar de não obtido ajuste a modelos teóricos para um atributo, foi o solo que obteve, juntamente com GM, o maior número de semivariogramas com patamar, apresentando os maiores alcances para os atributos estudados.

O Cambissolo foi o que mostrou maior falta de organização no que diz respeito à estrutura da variabilidade espacial, apresentando seis semivariogramas sem ajuste a um modelo teórico para os atributos estudados.

Em qualquer caso, onde haja dependência espacial, o domínio de cada amostra, dado pelo alcance do semivariograma, é um parâmetro importante a ser considerado em amostragens futuras. Este alcance dá indícios do número de amostragens para se fazer conclusões precisas em futuros manejo e projetos de irrigação e drenagem nestes solos.

Tabela 37. Modelos ajustados aos semivariogramas dos atributos estudados dos solos: Neossolo Flúvico (RU), Cambissolo (C), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Gleissolo Háptico (GX) e Gleissolo Melânico (GM). Lavras, MG, (2003).

Atributos	Classe de Solos				
	RU	C	PVA	GX	GM
Ds (g/cm ³)	Esférico	Sem Ajuste	Gaussiano	Esférico	Esférico
Dp (g/cm ³)	Sem Ajuste	Sem Ajuste	Esférico	Gaussiano	Gaussiano
Argila (%)	Gaussiano	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico
Areia (%)	Sem Ajuste	Potencial	Esférico	Esférico	Esférico
Silte (%)	Sem Ajuste	Esférico	Esférico	Esférico	Gaussiano
VTPc (%)	Esférico	Sem Ajuste	Exponencial	Potencial	Potencial
VTPd (%)	Esférico	Sem Ajuste	Esférico	Potencial	Potencial
Macro (%)	Esférico	EPP	Gaussiano	Gaussiano	Esférico
Micro (%)	Esférico	Sem Ajuste	Gaussiano	Potencial	Esférico
K' (cm ²)	Sem Ajuste	Sem Ajuste	Sem Ajuste	Esférico	Esférico

EPP- efeito pepita puro

Tabela 38. Alcance em metros, dos modelos ajustados aos semivariogramas dos atributos estudados dos solos: Neossolo Flúvico (RU), Cambissolo (C), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Gleissolo Háplico (GX) e Gleissolo Melânico (GM). Lavras, MG, (2003).

Atributos	Classe de Solos				
	RU	C	PVA	GX	GM
Ds (g/cm ³)	1,65	-	0,88	1,92	3,46
Dp (g/cm ³)	-	-	2,38	4,71	1,72
Argila (%)	6,51	0,87	1,25	1,28	1,29
Arcia (%)	-	-	0,94	1,08	0,69
Silte (%)	-	1,51	1,68	0,56	1,03
VTPc (%)	2,30	-	3,00	-	-
VTPd (%)	2,16	-	0,76	-	-
Macro (%)	4,60	-	7,04	0,84	0,33
Micro (%)	-	-	8,52	-	1,36
K' (cm ²)	-	-	-	1,06	1,33

Nota-se que o padrão para o tamanho e para a estrutura da variabilidade espacial não é o mesmo nestes solos (Tabela 39), mostrando que os dois enfoques para o estudo da variabilidade são complementares e se prestam para mostrar aspectos diferentes do solo.

Observa-se ainda, na Tabela 39, que mais variável não é sinônimo de mais desorganizado.

Tabela 39. Tamanho e estrutura da variabilidade espacial dos cinco solos estudados na transeção. Lavras, MG, (2003).

Variabilidade Espacial	
Tamanho	Estrutura
GX	PVA
RU	GM
GM	GX
C	RU
PVA	C

As setas indicam o sentido do aumento

Essas descrições e quantificações da variabilidade espacial são interessantes e informativas, pois permitem inferir ou ainda confirmar a maneira como os processos de formação desses solos definem suas estruturas de dependência espacial. Por exemplo, observa-se que o PVA apresenta maior organização da variabilidade espacial em relação ao Cambissolo, podendo ser explicado por este último solo ser mais jovem e a presença de muito mineral primário ainda por intemperizar, fazendo com que este solo ainda não apresente uma estrutura estável na variabilidade espacial. Outro fato pode ser a própria localização destes solos no perfil da transeção e o comprimento com que cada classe de solo contribuiu na transeção.

5 CONCLUSÕES

O atributo permeabilidade intrínseca foi o mais variável ao longo da transeção para todas as classes de solos, com base no coeficiente de variação. Esse atributo foi também o que apresentou maior desorganização estrutural, com base nos semivariogramas.

De modo geral, o Gleissolo Háplico foi o que apresentou maior variabilidade espacial, enquanto o Argissolo Vermelho-Amarelo a menor.

O Argissolo Vermelho-Amarelo foi a classe de solo que mostrou maior organização, ou seja, maior dependência espacial obtida para maioria dos atributos estudados. O maior alcance obtido foi para microporosidade com 8,52 m. A classe de solo que apresentou a menor estrutura no estudo da variabilidade espacial foi o Cambissolo.

A variabilidade espacial para atributos físico-hídricos de solos de várzea estudados perpendicular à calha do rio é maior, do que quando analisados paralelo à calha do rio.

A estatística clássica e a geoestatística são ferramentas complementares no sentido de se obter, no primeiro caso, a magnitude da variação e no segundo, a estrutura da variabilidade espacial. Através destas duas ferramentas, faz-se a pedometria auxiliando à pedologia na identificação dos limites entre classes de solos diferentes.

É difícil a aplicação da geoestatística em transeções perpendiculares à calha d'água de um rio, principalmente em solos de várzea, visando-se a fazer inferências nas amostragens do solo para efeito de manejo e projetos de irrigação e drenagem.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, S. H.; CASSEL, D. K. Statistical and autoregressive analysis of soil physical properties of Portsmouth Sandy Loam. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, n. 5, p. 1096-1104, Sep./Oct. 1986.

ARCHER, S. R.; SMITH, P. D. Relation between bulk density, available water capacity, and air capacity of soils. **Journal of Soil Science**, Edinburgh, v. 23, n. 4, p. 475-480, Dec. 1972.

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil physics**. 4. ed. New York: J. Wiley, 1972. p. 498.

BECKETT, P. H. T.; WEBSTER, R. Soil variability: review. **Soil and Fertilizers**, Farnham Royal, v. 34, n. 1, p. 1-15, Feb. 1971.

BLAKE, G. R. Bulk density. In: BLACK, C. A. **Methods of soil analysis; physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. pt. 1, p. 374-390.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, 1986a. pt. 1, p. 363-375.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, 1986b. pt. 1, p. 377-382.

BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989. p. 879

BRAGA, L. P. V. Geoestatística e aplicações. **Minicurso do 9º Simpósio Brasileiro de Probabilidades e Estatística**. São Paulo: IME/USP, 1990. p. 36.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. 4. ed. São Paulo: Atual, 1987. p. 321.

LUTHIN, J. N. Drainage engineering. Florida: Robert E. Krieger Publishing Company, 1978. p. 281.

MACHADO, R. V. Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos em uma hidrossequência de solos bem à muito mal drenados. 1994. 88 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, MG.

MORAES, S. O. Heterogeneidade hidráulica de uma Terra Roxa Estruturada. 1991. 141 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

OLIVEIRA, L. B. Determinação da macro e microporosidade pela "mesa de tensão" em amostra de solo com estrutura indeformada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 3, n. 1, p. 197-200, jan. 1968

ORTIZ, G. C. Aplicação de métodos geoestatísticos para identificar a magnitude e a estrutura da variabilidade espacial de variáveis físicas do solo. 2002. p. 75. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agrônômica) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

PANATIER, Y. Variowin: software for spatial data analysis. 2. d. New York: Springer-Verlag, 1996. 93 p.

QUEIROZ, J. E. Parâmetros hidro-dinâmicos de um solo de várzea para fins de drenagem subterrânea. 1995. 167 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

REICHARDT, K. Sistema solo - planta - atmosfera. 3. ed. Piracicaba: Centro de Energia Nuclear na Agricultura-CNEN e Fundação Cargill, 1975. 286 p.

REICHARDT, K. Processos de transferência no sistema solo planta atmosfera. 4. ed. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 473 p.

REICHARDT, K.; VIEIRA, S. R.; LIBARD, P. L. Variabilidade espacial de solos e experimentação de campo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, SP, v. 10, n. 1, p. 1-6, jan./abr. 1986.

RESENDE, M. Modelo de evolução dos solos. Viçosa: UFV. Imprensa Universitária, 1977. 11 p.

RIBEIRO JUNIOR, P. J. **Método geoestatístico no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo.** 1995. 99 p. 1995. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

SALES, L. E. O. **Variabilidade espacial da velocidade de infiltração básica associada a propriedades físicas das camadas superficial e subsuperficial de dois solos da região de Lavras (MG).** 1992. 103 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, MG.

SCARDUA, R. **Porosidade livre de água de dois solos do município de Piracicaba.** 1972. 83 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete sample). **Biometrika**, London, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, Dec. 1965.

SILVA, A. P. **Variabilidade espacial de atributos físicos do solo.** 1988. 105 p. 1988. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho-Escuro ao longo de uma transeção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, n. 1, p. 1-5, jan./abr. 1989.

TOGNON, A. A. **Propriedades físico hídricas do Latossolo Roxo da região de Guairá-SP sob diferentes sistemas de cultivo.** 1991. 67 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistic to spatial studies of soil properties. **Advance in Agronomy**, New York, v. 38, p. 45-94, 1985.

VIEIRA, S. R. **Geoestatística em estudo de variabilidade espacial do solo: tópicos em ciência do solo.** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2000. v. 1, p. 1-55.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v. 51, n. 3, p. 1-75, July 1983.

VILELA, E. A.; RAMALHO, M. A. P. Análise das temperaturas e precipitações pluviométricas de Lavras, MG. **Ciência e Prática**, Lavras, v. 3, n. 1, p. 71-78, jan./jun. 1979.

VOMOCIL, J. A. Porosity. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. pt. 1, p. 499-510.

WARRICK, A. W.; MYERS, D. E.; NIELSEN, D. R. Geoestatistical methods applied to soil science. In: **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy – Soil Science Society of America, 1986. p. 53-82.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980.