

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
DEPARTAMENTO DE ÁGUA E SOLO**

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DE UM LATOSSOLO
VERMELHO ESCURO TEXTURA ARGILOSA DA REGIÃO DO
CERRADO, SUBMETIDO AO PLANTIO DIRETO E AO PLANTIO
CONVENCIONAL**

EDNALDO CARVALHO GUIMARÃES

Prezados

Este exemplar corresponde a redação final da tese de doutorado defendida por Ednaldo Carvalho Guimarães e aprovada pela Comissão Julgadora em 03 de dezembro de 1999. Campinas, 10 de abril de 2001.


Presidente da Banca

Tese de Doutorado apresentada à FEAGRI/UNICAMP como cumprimento parcial dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola – Área de concentração: Água e Solo.

**Campinas – SP
Novembro – 2000**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
DEPARTAMENTO DE ÁGUA E SOLO**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DE UM LATOSSOLO
VERMELHO ESCURO TEXTURA ARGILOSA DA REGIÃO DO
CERRADO, SUBMETIDO AO PLANTIO DIRETO E AO PLANTIO
CONVENCIONAL**

EDNALDO CARVALHO GUIMARÃES

**Orientador:
Prof. Dr. NEWTON ROBERTO BONI**

Tese de Doutorado apresentada à FEAGRI/UNICAMP como cumprimento parcial dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola – Área de concentração: Água e Solo.

**Campinas – SP
Janeiro – 2000**

UNIDADE	FE
N.º CHAMADA:	T/ UNICAMP
	G 947v
V.	Ex.
TOMBO BC/	45069
PROC/	6-392101
C	<input type="checkbox"/>
G	<input checked="" type="checkbox"/>
PRECOS	R\$ 11,00
DATA	03/07/01
N.º CPD	

CM00157795-4

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

G947v Guimarães, Ednaldo Carvalho
 Variabilidade espacial de atributos de um latossolo
 vermelho escuro textura argilosa da região do cerrado,
 submetido ao plantio direto e ao plantio convencional /
 Ednaldo Carvalho Guimarães.--Campinas, SP: [s.n.], 2000.

Orientador: Newton Roberto Boni.
 Tese (doutorado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Física do solo. 2. Análise espacial (Estatística). 3.
 Solos - Manejo. I. Boni, Newton Roberto. II.
 Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
 Engenharia Agrícola. III. Título.

**À memória do Prof. NEWTON ROBERTO
BONI, que além de ter sido meu orientador e
chefe, foi, sobretudo, meu amigo**

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos a todos aqueles que colaboraram na realização deste trabalho, especialmente:

- Ao programa PICDT/CAPES/UFU, pela concessão de bolsa de estudos.
- À FAPEMIG, pelo auxílio financeiro para a execução da pesquisa.
- À CPG/FEAGRI/UNICAMP, pelo auxílio financeiro para a execução da pesquisa.
- À Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e aos colegas do Departamento de Matemática, que viabilizaram a continuação do meu programa de doutoramento.
- À Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI/UNICAMP), pela oportunidade de realizar minha pós-graduação.
- Ao Prof. Dr. Newton Roberto Boni, pela orientação, dedicação e amizade.
- Ao Prof. Dr. Elias Nascentes Borges e ao Prof. Dr. Jansle Vieira Rocha, pela participação no Comitê de Orientação e pela colaboração na elaboração desse trabalho.
- À Adriana e à Silvana, grandes amigas que além do incentivo, sempre colocaram a minha disposição sua casa nas minhas idas e vindas de Campinas.
- À Ana, Emília, Lucimara, Gerson e José Ricardo, também pela grande amizade e colaboração durante todo o período que vivi em Campinas.
- À Célia pela grande colaboração na realização de algumas análises laboratoriais, assim como por sua amizade e a Suzely que sempre me ajudou como secretária e como amiga.
- Aos meus orientados no programa PIBIC/CNPq/UFU, Altamir e Rui, pela grande colaboração durante os trabalhos de campo e de laboratório.
- Enfim, por todos os lugares que tenho passado, tenho recebido grande manifestação de carinho e amizade, por isso, agradeço a DEUS essa dádiva.

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE QUADROS.....	viii
LISTA DE EQUAÇÕES.....	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
RESUMO.....	xvii
ABSTRACT.....	xix
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. HIPÓTESES E OBJETIVOS.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1. Os solos da região de cerrado e a região de Uberlândia.....	5
3.2. Os sistemas de manejo e os atributos dos solos.....	9
3.3. Densidade do solo, microporos, macroporos, porosidade total e frações granulométricas.....	13
3.4. Condutividade hidráulica e infiltração de água no solo.....	15
3.5. Variabilidade espacial em solos.....	19
3.5.1. O problema de amostragem.....	19
3.5.2. Aspectos básicos da variabilidade nos solos.....	21
3.5.3. A aplicação da variabilidade em Ciência do Solo.....	25
3.6. O sistema de informação geográfica.....	27
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	31
4.1. Localização e caracterização da área experimental.....	31
4.2. Plano amostral.....	34
4.3. Amostragem e obtenção de dados.....	35
4.3.1. Densidade do solo, volume total de poros, microporos e macroporos.....	35

4.3.2. Matéria orgânica.....	35
4.3.3. Condutividade hidráulica do solo saturado e infiltração da água no solo.....	36
4.3.4. Granulometria.....	37
4.4. Análise estatística.....	38
4.4.1. Análise descritiva e inferência clássica.....	38
4.4.2. Geoestatística.....	40
4.4.3. Correlações.....	41
4.5. Mapeamento dos atributos dos solos.....	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
5.1. Análise descritiva, inferência clássica e análise da variabilidade espacial.....	43
5.1.1. Densidade do solo.....	43
5.1.1.1. Análise descritiva e inferências clássicas.....	43
5.1.1.2. Análise da variabilidade espacial através de semivariogramas.....	44
5.1.2. Volume total de poros, microporosidade e macroporosidade.....	46
5.1.2.1. Análise descritiva e inferência clássica.....	46
5.1.2.2. Análise dos semivariogramas.....	49
5.1.3. Matéria orgânica.....	51
5.1.3.1. Análise descritiva e Inferências Clássicas.....	51
5.1.3.2. Análise dos semivariogramas.....	52
5.1.4. Infiltração e condutividade hidráulica do solo saturado.....	54
5.1.4.1. Análise descritiva e inferências clássicas.....	54
5.1.4.2. Análise dos semivariogramas.....	58
5.1.5. Argila, silte, areia fina, areia grossa e areia total.....	60
5.1.5.1. Análise descritiva e inferências clássicas.....	60
5.1.5.2. Análise dos semivariogramas.....	63
5.2. Observações gerais quanto à estatística descritiva.....	67
5.3. Observações gerais quanto aos semivariogramas.....	68
5.4. Correlações da condutividade hidráulica do solo com as demais variáveis.....	69

5.5. Mapas de alguns atributos do solo.....	71
5.5.1. Densidade do solo.....	71
5.5.2. Microporos.....	72
5.5.3. Macroporos.....	73
5.5.4. Matéria orgânica.....	74
5.5.5. Condutividade hidráulica.....	75
5.6. Aplicações e recomendações.....	76
6. CONCLUSÕES.....	77
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

LISTA DE QUADROS

Quadro		Pág.
1	Caracterização química preliminar das áreas experimentais, obtida a partir de uma amostra composta para a área de plantio direto(PD) e uma amostra composta para a área de plantio convencional (PC). UFU/DEAGO/LABAS – novembro/1997.....	33
2	Caracterização granulométrica preliminar das áreas experimentais, obtida a partir da média aritmética de 5 pontos aleatórios da área em plantio direto (PD) e da média aritmética de 5 pontos aleatórios da área em plantio convencional (PC). UFU/DEAGO/LABAS – Novembro/1997.....	33
3	Estatísticas da densidade do solo (kg.dm^{-3}) nos sistemas de manejo em plantio direto (PD) e convencional (PC) – Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	43
4	Modelos de semivariogramas ajustados aos dados experimentais de densidade do solo, nos sistemas de manejo em plantio direto (PD) e convencional (PC).....	45
5	Estatísticas do volume total de poros (VTP) em $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$, microporosidade (MICRO) em $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$ e macroporosidade (MACRO) em $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$, nos sistemas de manejo em plantio direto (PD) e convencional (PC) – Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	46
6	Modelos de semivariogramas ajustados aos dados experimentais de volume total de poros, microporosidade e macroporosidade, nos sistemas de manejo em plantio direto e convencional.....	49
7	Estatísticas da matéria orgânica no solo (g.kg^{-1}), nos sistemas de manejo em plantio direto (PD) e convencional (PC) – Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	51
8	Modelos de semivariogramas ajustados aos dados experimentais de matéria orgânica no solo, nos sistemas de manejo em plantio direto e convencional.....	53

9	Estatísticas da infiltração (INF) em mm.h^{-1} e da condutividade hidráulica saturada (kfs) em m.d^{-1} , nos sistemas de manejo em plantio direto (PD) e convencional (PC) – Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	54
10	Estatísticas dos dados transformados para $\ln(X)$, da infiltração (INF) em mm.h^{-1} e da condutividade hidráulica saturada (Kfs) em m.d^{-1} , nos sistemas de manejo em plantio direto (PD) e convencional (PC) – Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	56
11	Modelos de semivariogramas ajustados aos dados experimentais de infiltração de água no solo (INF) em mm.h^{-1} e de condutividade hidráulica do solo saturado (Kfs) em m.d^{-1} , nos sistemas de manejo em plantio direto (PD) e convencional (PC).....	58
12	Estatísticas da argila (ARG) em g.kg^{-1} , do silte (SIL) em g.kg^{-1} , da areia fina (AF) em g.kg^{-1} , da areia grossa (AG) em g.kg^{-1} e da areia total (AT) em g.kg^{-1} , nos sistemas de manejo em plantio direto (PD) e convencional (PC) – Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	61
13	Modelos de semivariogramas ajustados aos dados experimentais de argila (ARG) em g.kg^{-1} , silte (SIL) em g.kg^{-1} , areia fina (AF) em g.kg^{-1} , areia grossa (AG) em g.kg^{-1} e areia total (AT) em g.kg^{-1} , nos sistemas de manejo em plantio direto (PD) e convencional (PC).....	64
14	Correlações simples entre a condutividade hidráulica do solo saturado (kfs) e a densidade do solo (Ds), volume total de poros (VTP), microporos (MICRO), macroporos (MACRO), matéria orgânica (MO), argila (ARG), silte (SIL), areia fina (AF), areia grossa (AG) e areia total (AT).....	69
15	Correlações simples entre a condutividade hidráulica do solo saturado (kfs) e a densidade do solo (Ds), volume total de poros (VTP), microporos (MICRO), macroporos (MACRO), matéria orgânica (MO), argila (ARG), silte (SIL), areia fina (AF), areia grossa (AG) e areia total (AT), nos sistemas de manejo em plantio direto e convencional.....	70
16	Distribuição porcentual das classes de densidade do solo (Ds) em kg.dm^{-3} , nos sistemas de manejo em plantio direto e convencional.....	72
17	Distribuição porcentual das classes de microporos no solo (Micro) em $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$, nos sistemas de manejo em plantio direto e convencional.....	73
18	Distribuição porcentual das classes de macroporos no solo (Macro) em $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$, nos sistemas de manejo em plantio direto e convencional.....	74

- 19 Distribuição porcentual das classes de matéria orgânica no solo (MO) em g.kg^{-1} , nos sistemas de manejo em plantio direto e convencional..... 74
- 20 Distribuição porcentual das classes de condutividade hidráulica do solo saturado (Kfs) em m.d^{-1} , nos sistemas de manejo em plantio direto e convencional..... 75

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação		Pág.
1	Estacionaridade de segunda ordem.....	22
2	Estacionaridade de segunda ordem.....	22
3	Hipótese intrínseca.....	22
4	Hipótese intrínseca.....	22
5	Função autocorrelação.....	22
6	Estimador de autocorrelação.....	22
7	Função semivariância.....	22
8	Semivariograma linear com patamar.....	23
9	Semivariograma esférico.....	23
10	Semivariograma exponencial.....	23
11	Semivariograma gaussiano.....	23
12	Modelo de semivariograma sem patamar.....	23
13	Fluxo constante de água no solo.....	36
14	Infiltração de água no solo.....	37
15	Estimador da média.....	38
16	Estimador da variância.....	39
17	Estimador do desvio padrão.....	39
18	Coefficiente de Variação.....	39

19	Coeficiente de assimetria.....	39
20	Momento de ordem t em relação à média.....	39
21	Coeficiente de curtose.....	39
22	Estimador da semivariância.....	40
23	Estimador de krigagem.....	41

LISTA DE FIGURAS

Figura		Pág.
1	Área ocupada pela vegetação de cerrado no Brasil.....	5
2	Características das árvores de cerrado.....	6
3	Fisionomia do cerrado.....	6
4	Área ocupada pelo cerrado em Minas Gerais.....	7
5	Localização de Uberlândia – MG.....	8
6	Representação do relevo da área experimental em sistema de manejo em plantio direto: a) Curvas de nível (cm) b) tridimensional (eixo Z em cm).....	32
7	Representação do relevo da área experimental em sistema de manejo convencional: a) Curvas de nível (cm) b) tridimensional (eixo Z em cm)...	33
8	Esquema de amostragem sistemática utilizada nas áreas de manejo em plantio direto e convencional.....	34
9	Histograma e teste de normalidade para a densidade do solo nos sistemas de manejo: a) convencional (PC) b) plantio direto (PD). Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	44
10	Semivariograma da densidade do solo, nos sistemas de manejo convencional (PC) e de plantio direto (PD). Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	45
11	Histograma e teste de normalidade para o volume total de poros, nos sistemas de manejo: a) convencional (PC) b) plantio direto (PD). Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	48
12	Histograma e teste de normalidade para a microporosidade, nos sistemas de manejo: a) convencional (PC) b) plantio direto (PD). Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	48

13	Histograma e teste de normalidade para a macroporosidad, nos sistemas de manejo: a) convencional (PC) b) plantio direto (PD). Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	48
14	Semivariograma do volume total de poros, nos sistemas de manejo convencional (PC) e de plantio direto (PD). Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	49
15	Semivariograma da microporosidade do solo, nos sistemas de manejo convencional (PC) e de plantio direto (PD). Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	50
16	Semivariograma da macroporosidade do solo, nos sistema de manejo convencional (PC) e de plantio direto (PD). Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	50
17	Histograma e teste de normalidade para a matéria orgânica, nos sistemas de manejo: a) convencional (PC) b) plantio direto (PD). Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	52
18	Semivariograma da matéria orgânica, nos sistemas de manejo convencional (PC) e de plantio direto (PD). Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	53
19	Histograma e teste de normalidade para a infiltração de água no solo, nos sistemas de manejo: a) convencional (PC) b) plantio direto (PD). Uberlândia – MG – Janeiro/98	55
20	Histograma e teste de normalidade para a condutividade hidráulica saturada de campo, nos sistemas de manejo: a) convencional (PC) b) plantio direto (PD). Uberlaândia – MG – Janeiro/98.....	55
21	Histograma e teste de normalidade para o ln(infiltração), nos sistemas de manejo: a) convencional (PC) b) plantio direto(PD). Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	56
22	Histograma e teste de normalidade para o ln(condutividade), nos sistemas de manejo: a) convencional (PC) b) plantio direto (PD). Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	56
23	Semivariograma da infiltração da água no solo, nos sistemas de manejo convencional (PC) e de plantio direto (PD). Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	58

24	Semivariograma da condutividade hidráulica do solo saturado, nos sistemas de manejo convencional (PC) e de plantio direto (PD). Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	59
25	Histograma e teste de normalidade para a argila, nos sistemas de manejo: a) convencional (PC) b) plantio direto (PD). Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	61
26	Histograma e teste de normalidade para o silte, nos sistemas de manejo: a) convencional (PC) b) plantio direto (PD). Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	62
27	Histograma e teste de normalidade para a areia fina, nos sistemas de manejo: a) convencional (PC) b) plantio direto (PD). Uberlândia – MG – janeiro/98.....	62
28	Histograma e teste de normalidade para a areia grossa, nos sistemas de manejo: a) convencional (PC) b) plantio direto (PD). Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	62
29	Histograma e teste de normalidade para a areia total, nos sistemas de manejo: a) convencional (PC) b) plantio direto (PD). Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	63
30	Semivariograma da argila, nos sistemas de manejo convencional (PC) e de plantio direto (PD). Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	64
31	Semivariograma do silte, nos sistemas de manejo convencional (PC) e de plantio direto (PD). Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	65
32	Semivariograma da areia fina, nos sistemas de manejo convencional (PC) e de plantio direto (PD). Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	65
33	Semivariograma da areia grossa, nos sistemas de manejo convencional (PC) e de plantio direto (PD). Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	66
34	Semivariograma da areia total, nos sistemas de manejo convencional (PC) e de plantio direto (PD). Uberlândia – MG – Janeiro/98.....	66
35	Mapas de densidade do solo (kg.dm^{-3}) nos sistemas de manejo: a) plantio convencional b) plantio direto.....	71
36	Mapas de microporosidade ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$) nos sistemas de manejo: a) plantio convencional b) plantio direto.....	72

37	Mapas de macroporosidade ($m^3.m^{-3}$) nos sistemas de manejo: a) plantio convencional b) plantio direto.....	73
38	Mapas da matéria orgânica ($g.kg^{-1}$) nos sistemas de manejo: a) plantio convencional b) plantio direto.....	74
39	Mapas de condutividade hidráulica do solo saturado ($m.dia^{-1}$) nos sistemas de manejo: a) plantio convencional b) plantio direto.....	75

GUIMARÃES, E. C. **Variabilidade espacial de atributos de um Latossolo Vermelho Escuro textura argilosa da região do cerrado, submetido ao plantio direto e ao plantio convencional.** [Spatial variability of attributes of a Dark Red Latosol (Oxisol) of *cerrado*, on tillage and no-tillage management systems]. Campinas, 2000. 89 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Água e Solo, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.

RESUMO

Os solos da região do cerrado brasileiro apresentam, em geral, baixa fertilidade, e, quando utilizados com agricultura intensiva, costumam apresentar alterações nos atributos físicos. As culturas de soja e de milho ocupam grandes extensões do Triângulo Mineiro, para as quais tem sido recomendado o uso da rotação de culturas e do plantio direto, com a finalidade de melhorar ou manter a qualidade agrícola dos solos. O objetivo deste trabalho foi verificar, mediante a estatística clássica, diferenças entre a densidade do solo, a porosidade total, a microporosidade, a macroporosidade, a matéria orgânica, a condutividade hidráulica, a infiltração e as frações granulométricas, em um Latossolo Vermelho Escuro textura argilosa, da região de cerrado, submetidos aos sistemas de manejo em plantio direto e convencional, e, usando a geoestatística, caracterizar o comportamento espacial desses atributos nos dois sistemas de manejo. Utilizou-se uma malha quadrada composta de 64 pontos amostrais para a coleta das amostras. O permeâmetro de fluxo constante (permeâmetro de Guelph) foi utilizado na obtenção dos dados de condutividade hidráulica saturada de campo e da infiltração. As análises da estatística clássica consistiram em cálculos de algumas estimativas, análise de histogramas, análise de normalidade das variáveis e correlações entre a condutividade hidráulica e demais atributos. A análise da variabilidade espacial foi feita a partir de semivariogramas, utilizando-se a krigagem para realizar estimativas em locais não amostrados. Estas estimativas formaram a base de dados para o mapeamento dos atributos com o uso do SIG-IDRISI. Observaram-se diferenças entre os valores médios de densidade do solo, volume total de poros, macroporos, microporos, matéria orgânica, condutividade hidráulica e infiltração; não ocorreu diferença significativa entre as médias das

frações granulométricas. A condutividade hidráulica apresentou distribuição log-normal e não apresentou correlação significativa com outros atributos. Foram ajustados modelos de semivariogramas diferenciados para as variáveis, em cada sistema de manejo. Tais resultados permitiram concluir que os sistemas de manejo interferem em alguns atributos dos solos e que estas alterações refletem na variabilidade espacial. A utilização do sistema de informação geográfica associado à técnicas de geoestatística, se mostraram ferramentas que podem contribuir com a agricultura de precisão.

SPATIAL VARIABILITY OF ATTRIBUTES OF A DARK RED LATOSOL OF CERRADO, ON TILLAGE AND NO-TILLAGE MANAGEMENT SYSTEMS

ABSTRACT

The *cerrado*'s soils present, in general, low fertility and when being used with intensive agriculture they can present proprieties and physical characteristics alterations. Soybean and corn cultures are occupying great extensions of agricultural area in *Triângulo Mineiro* and, the use of rotation cultures and no tillage management has been recommended with the intention to maintain or improve the agriculture soil quality. The aim of this work was to verify through classical statistics, differences between bulk density, total porosity, microporosity, macroporosity, organic matter, hydraulic conductivity, infiltration, clay content, silt content and sand content, in a Dark Red Latosol, when submitted to tillage and no-tillage management. It also intended to verify, through geostatistic, the spatial variability of these attributes in two management systems, using semivariogram. A square grid of 64 points was used for the collection of samples. The hydraulic conductivity and infiltration were obtained through constant permeameter flows (Guelph permeameter). Some estimations and histograms as well as normality and correlations analysis were done using classical statistic. The geostatistic analysis was made through semivariograms and kriging. The SIG – IDRISI was used to map attributes. Classical statistics analysis showed differences between the two systems regarding to bulk density, porosity, organic matter, hydraulic conductivity and infiltration, but, it found no difference regarding to clay, silt and sand. The hydraulic conductivity showed log-normal distribution and didn't present correlation with others attributes. Differences between semivariograms were found in both of the management systems. As a conclusion, the management system can modify some of the characteristics and proprieties of the soil and it also changes the spatial variability. The SIG can help making decisions about agriculture management.

1. INTRODUÇÃO

Na região do cerrado brasileiro, nas últimas décadas, a pecuária extensiva tem dado lugar a uma exploração agrícola moderna, tecnificada e empresarial, com as culturas da soja e do milho ocupando grandes extensões das áreas cultivadas.

No cerrado, é comum a ocorrência de problemas físicos e químicos dos solos submetidos a uma agricultura convencional. Esses problemas interferem diretamente na disponibilidade de água e nutrientes e, conseqüentemente, no desenvolvimento e na capacidade produtiva das plantas.

Com raras exceções, o Brasil tem aumentado sua produção agrícola pela expansão da área cultivada, utilizando, para isso, solos da região do cerrado. A escolha dessa fronteira deve-se à sua situação geográfica privilegiada, em relação aos grandes centros consumidores e/ou exportadores, e a existência de pesquisas em fertilidade do solo e nutrição de plantas dando suporte para torná-los solos produtivos.

Práticas de manejo tais como preparo do solo, adubações e calagens intensivas, algumas vezes executadas de modo incorreto, ocasionam alterações físicas do solo, com reflexos nos atributos físicos, químicos, físico-químicos e na atividade biológica. A degradação do solo ou a preservação de suas características e o aumento de sua capacidade produtiva é função do manejo a que ele é submetido.

O uso e manejo, atualmente aplicados, aos solos da região de cerrado na produção de grãos tem comprometido, particularmente na camada arável, suas qualidades físicas, principalmente aquelas que decorrem da porosidade (permeabilidade da água e do ar, água disponível, erodibilidade, densidade do solo, etc.) e, conseqüentemente, o funcionamento destes solos para produções agrícolas satisfatórias.

Os agricultores da região do cerrado vêm substituindo o manejo do solo no sistema convencional pelo plantio direto, com o objetivo de minimizar os problemas físicos advindos de aração e gradagem pesada.

A caracterização da variabilidade espacial dos atributos físicos dos solos, associada a outras técnicas estatísticas de tomada de decisões e à experiência do agricultor, pode contribuir para uma agricultura econômica e ecologicamente sustentável no cerrado.

A amostragem simples ao acaso nem sempre é a forma eficiente de estimar os parâmetros relacionados aos solos, porque a maioria das propriedades, além da variabilidade casual (intemperismo diferencial pontual, erosão e adição diferencial, fatores biológicos e hidrológicos diferenciais, erros analíticos e de amostragem, etc.), possuem também variabilidade espacial (sistemática) que pode ser explicada em função dos componentes de paisagem, como os aspectos geomorfológicos, os fatores pedogenéticos, além do próprio uso e manejo do solo.

O estudo da variabilidade espacial das propriedades e características dos solos permite definir o grau de correlação espacial das amostras; em associação com o sistema de informação geográfica (SIG), que tem se mostrado poderosa ferramenta de aplicação prática, permite obter o mapeamento dos atributos de interesse com o menor erro de estimativa possível.

Com base no exposto acima, este trabalho visou contribuir com o estudo do efeito do manejo agrícola dos solos de cerrado, sobre sua variabilidade espacial.

2. HIPÓTESES E OBJETIVOS

As hipóteses básicas do trabalho são:

A densidade do solo, a porosidade total, a microporosidade, a macroporosidade, a matéria orgânica, a condutividade hidráulica, a infiltração de água e as frações granulométricas, são influenciadas pelo manejo do solo adotado pelo agricultor.

Existe dependência espacial para os atributos dos solos da região do cerrado e esta dependência pode ser descrita por semivariogramas.

A variabilidade espacial desses atributos, em um Latossolo Vermelho Escuro textura argilosa, de cerrado, se altera com o manejo agrícola do solo.

A condutividade hidráulica está correlacionada com a densidade do solo, com a matéria orgânica, com a natureza e teor das frações granulométricas e com a distribuição de poros, e pode ser expressa, em um modelo estatístico, em função dessas variáveis.

A média aritmética pode ser utilizada como representante de todas as variáveis estudadas.

O conhecimento do modelo de variabilidade espacial dos atributos dos solos em áreas de cerrado e a realização de estimativas em locais não amostrados, utilizando a krigagem, contribuem para o mapeamento desses atributos, com o uso do Sistema de Informação Geográfica, e para a visualização da distribuição espacial.

Com base nessas hipóteses, objetivou-se utilizar métodos estatísticos e geoestatísticos para verificar a validade de tais hipóteses; utilizar o sistema de informação geográfica SIG-IDRISI para mapear os atributos de um Latossolo Vermelho Escuro textura argilosa, em área de cerrado, submetido aos sistemas de manejo em plantio direto e convencional, sendo cultivados com as culturas comerciais soja/milho; contribuir para as pesquisas que visam um aproveitamento agrícola sustentável dos solos sob da região de cerrado.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Os solos da região de cerrado e a região de Uberlândia

O cerrado é uma savana tropical coberta por uma vegetação rasteira, formada principalmente por gramíneas. Constitui o segundo maior bioma (conjunto de seres vivos) do Brasil, onde coexistem árvores e arbustos esparsos, com altura máxima de oito metros, cujas copas não se tocam. Ocupa cerca de 20% do território nacional (Figura 1), e estende-se por treze unidades da Federação: Bahia, Ceará, Distrito Federal, Goiás, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Pará, Piauí, Rondônia, São Paulo e Tocantins.

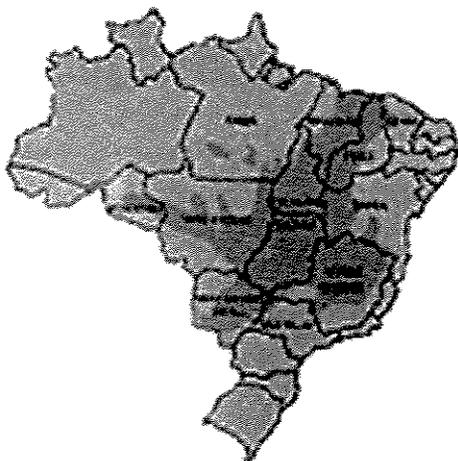


Figura 1. Área ocupada pela vegetação de cerrado no Brasil

O cerrado possui solos antigos, profundos e bem drenados, nutricionalmente de baixa fertilidade, com altos níveis de ferro e alumínio.

O clima é estacionário com duas estações bem definidas: seca e úmida, com precipitação média anual de 1500 mm e grandes variações intrarregionais.¹

¹ <http://www.cefetgo.br/cegeo/caracter.htm>

As árvores e arbustos apresentam galhos e troncos tortuosos, casca grossa e folhas quase sempre coriáceas (Figura 2). Embora o cerrado seja a vegetação dominante desse bioma, há também nele formações campestres (campos limpos, onde predomina o extrato herbáceo) e formações florestais (cerradões, matas secas e matas ciliares), conforme mostra esquema da figura 3.²

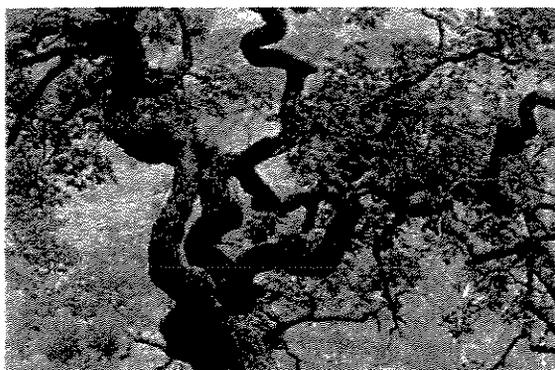


Figura 2. Características das árvores de cerrado.



Figura 3. Fisionomia do cerrado

Em Minas Gerais, a região de cerrado ocupa cerca de 50% da área total do Estado (Figura 4).

² <http://www.bhnet.com.br/ecominas/edu/bio/veg/cer.htm>

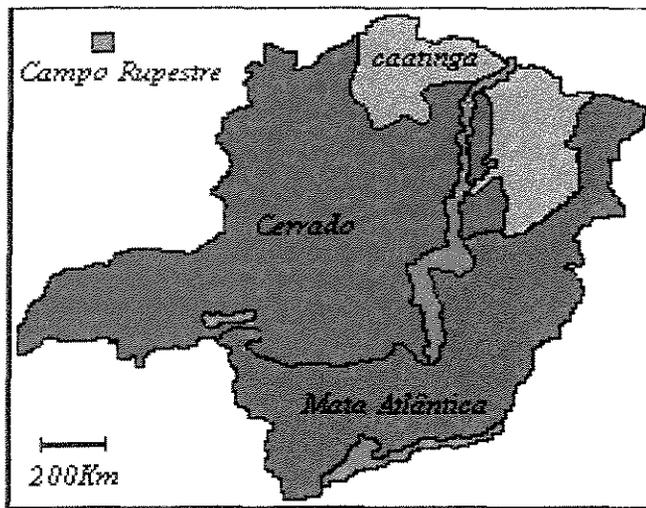


Figura 4. Área ocupada pelo cerrado em Minas Gerais

Com raras exceções, o Brasil tem aumentado sua produção agrícola nas últimas décadas, pela expansão da área cultivada, tendo os solos da região de cerrado grande contribuição para este fato.

MACEDO (1996) afirma que a escolha dessa fronteira agrícola deve-se à sua situação geográfica privilegiada, em relação aos grandes centros consumidores e/ou exportadores, e aos resultados de pesquisas em fertilidade do solo e nutrição de plantas, que tornaram estes solos produtivos.

Estes solos ocupam uma área estimada em 207 milhões de hectares e comportam diversas classes de solos (PEREIRA et al, 1997).

Segundo LOPES (1984) os solos de cerrado apresentam, em geral, características químicas com baixos valores de pH, Ca, Mg e P e altos teores de alumínio e/ou manganês, e fisicamente com alta porosidade e baixa densidade. Revelam, portanto, boas condições físicas para o desenvolvimento de plantas, e, com a correção dos atributos químicos, associada ao melhoramento genético de plantas, o cerrado tornou-se um grande produtor de grãos no País, utilizando uma agricultura tecnificada e empresarial.

O município de Uberlândia situa-se no Triângulo Mineiro (Figura 5) e seus solos são, predominantemente, ocupados por vegetação do tipo cerrado. Grande parte dos solos do município de Uberlândia – MG, são classificados como Latossolos, merecendo destaque a classe dos Latossolos Vermelho Escuro, textura argilosa.³

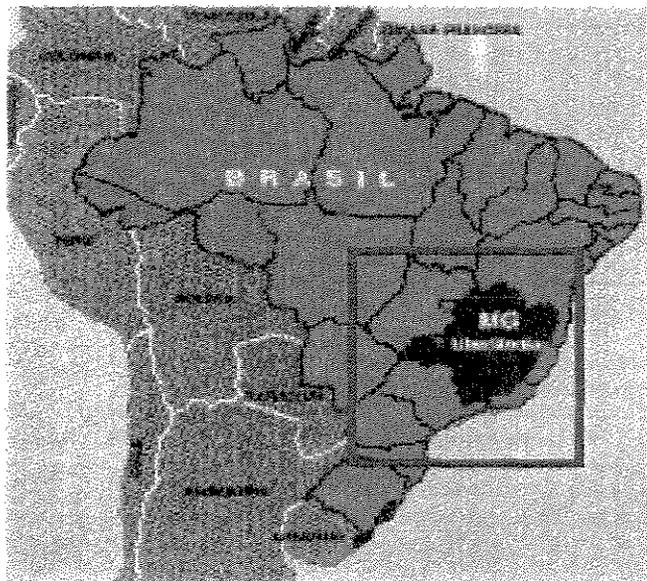


Figura 5. Localização de Uberlândia – MG.

MORAES (1997) mostrou, em uma análise comparativa dos dados dos censos agropecuários de 1980 à 1996, a evolução da agricultura no município de Uberlândia, destacando a evolução da produção de grãos, principalmente a soja e o milho, em substituição às pastagens extensivas e à agricultura de subsistência.

Na safra de 1997/1998 a cultura da soja ocupou área de 40491 ha , com produção de 92320 toneladas e a cultura do milho ocupou uma área de 13493 ha, com produção de 64767 toneladas. As demais culturas ocuparam, individualmente, menos de 5000 ha de área plantada.⁴

³ Comunicação pessoal do Prof. Dr. Gilberto Fernandes Corrêa – DEAGO/UFU

⁴ Secretaria Municipal de Agropecuária e Abastecimento – Uberlândia - MG

3.2. Sistemas de manejo e os atributos dos solos

Segundo CARVALHO Jr. (1995), nos solos da região de cerrado é comum a ocorrência de problemas físicos, químicos e biológicos, que interferem diretamente no desenvolvimento e na capacidade produtiva das plantas.

A caracterização dos atributos dos solos submetidos a diferentes sistemas de manejo adotados pelos agricultores pode ajudar na seleção de condições que induzem a maior produtividade, com menor interferência negativa ao meio ambiente.

FREITAS (1994) e CARVALHO Jr. (1995) comentam que, apesar de se procurar contornar problemas físicos, químicos e biológicos, nos solos submetidos ao uso intensivo, o manejo continua sendo feito de forma inadequada em grande parte da área cultivada. A degradação do solo ou a otimização de seu potencial produtivo é função do manejo a que é submetido.

Os efeitos de uso e manejo sobre propriedades físicas e químicas dos solos têm sido objeto de várias pesquisas, como as realizadas por PIMENTEL & CHAVES (1993), MELO FILHO & SILVA (1993), ANJOS et al (1994), BERTOL (1994), CARVALHO Jr. (1995), LONGO (1999), abrangendo diferentes unidade de solos.

Em comparação ao solo em seu estado natural, o uso agrícola tem aumentado a densidade do solo, dificultando as trocas gasosas, a infiltração e o movimento de água, o crescimento de raízes, a atividade de microrganismos decompositores e/ou fixadores de nitrogênio, conforme enfatizam FREITAS (1994) e BORGES et al (1997).

Para HILLEL (1980), os sistemas de preparo do solo afetam os processos de infiltração, retenção, armazenamento e evaporação de água do solo. A infiltração de água é alterada pelas modificações introduzidas na rugosidade superficial, na porosidade e na cobertura do solo.

RANDO (1981), trabalhando com um Latossolo Roxo no município de Lavras, Minas Gerais, mostrou o efeito negativo do cultivo na estabilidade de agregados, em solos sob manejo convencional por mais de 10 anos.

MORAES (1984), estudando características físicas de um Latossolo Vermelho Escuro muito argiloso sob cerrado, mostrou que o solo não cultivado, utilizado como referência, apresentou maior porcentagem de agregados superiores a 2 mm de diâmetro.

ABRÃO et al (1979), VIEIRA & MUZILLI (1984) e CENTURION & DEMATTÊ (1985) verificaram aumento de densidade do solo na camada arável. Mostraram também essas diferenças de densidade sob diferentes sistemas de manejo.

Nos trabalhos de BERTONI & LOMBARDI NETO (1990) e MELO FILHO & SILVA (1993), verifica-se que os efeitos do plantio direto são notáveis na redução de perdas de solo por erosão. Explicam tal fato pela eliminação das operações de preparo e cultivo, ocorrendo redução na quebra mecânica dos agregados, além dos benefícios da cobertura do solo por resíduos vegetais, na entressafra, aspectos estes muito diferentes dos encontrados no sistema convencional.

HERNANI et al (1997) avaliaram as perdas de solo e de água em um Latossolo Roxo e verificaram que o plantio direto foi o tratamento mais eficiente, tanto no controle de perdas de terra e de água, quanto em rendimentos de grãos de soja e trigo. Os períodos de maiores perdas por erosão foram o do preparo do solo para a semeadura da soja e 30 a 60 dias após a semeadura dessa cultura, demonstrando a importância da cobertura do terreno.

CASSEL (1991) observou que em um Latossolo Roxo com mais de quinze anos sob cultivo agrícola, a compactação do solo provocada pelo sistema de manejo convencional reduziu a macroporosidade para valores inferiores ao mínimo necessário à atividade biológica das raízes e dos microorganismos.

CENTURION & DEMATTÊ (1992) avaliaram os efeitos de sistemas de manejo nas propriedades físicas de um solo da região de cerrado. Constataram que todas as formas de manejo degradam os atributos físicos em relação ao estado natural. Comportamento semelhante foi verificado por MACHADO & BRUM (1981), LEITE & MEDINA (1984) e CORRÊA (1985a e 1985b), em ambientes diferentes dos de cerrado.

GRANT & LAFOND (1993) pesquisaram o efeito do cultivo zero, mínimo e convencional associados à rotação de culturas na densidade do solo e na sua resistência à penetração, em um solo muito argiloso. Concluíram que na camada superficial ocorre acréscimo na densidade e na resistência à penetração, em solos com cultivo zero. Este acréscimo não afetou o desenvolvimento de raízes. A inclusão de ervilha na rotação de cultura, amenizou o efeito de adensamento verificado no cultivo zero.

Em estudos comparativos entre mata nativa, cultivo convencional, plantio direto, cultivo convencional com subsolagem e pastagem nativa e seus efeitos sobre atributos físicos dos solos, ANJOS et al (1994) também verificaram aumento da densidade do solo submetidos aos diferentes manejos em relação à mata nativa. Estes autores concluíram que o aumento da densidade, provocado pelo manejo, não alcançou níveis críticos para o desenvolvimento das plantas. Ocorreu diminuição da condutividade hidráulica na camada arável (0-20 cm), em relação à mata nativa, e a porosidade total foi afetada de forma significativa pelo uso e manejo do solo, porém seus resultados permaneceram dentro ou acima dos limites médios para solos minerais.

Pesquisando um Latossolo Vermelho Escuro textura argilosa, Da ROS et al (1996), verificaram que o tempo de cultivo, em sistema de plantio direto, não afetou a porosidade total, a macro e microporosidade do solo, na camada de 0-20 cm. Áreas com seis e nove anos de plantio direto apresentaram maior porcentagem de agregados na classes de maior diâmetro, quando comparadas com a área de um ano de plantio direto.

SECCO et al (1997) estudaram o efeito de sistemas de manejo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Escuro e verificaram que a densidade, a porosidade total, a microporosidade e a macroporosidade apresentaram diferenças significativas no plantio direto, em relação aos demais tratamentos, principalmente na camada superficial do solo.

CORSINI & FERRAUDO (1999) em estudos sobre os efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade de um Latossolo Roxo, verificaram que a subsolagem e a aração e gradagem aumentaram a macroporosidade na camada superficial, em comparação ao plantio direto. Verificaram ainda que os benefícios do sistema conservacionista de plantio direto na macroporosidade e na densidade do solo deu-se a partir do quarto ano de cultivo.

Comparando solo sob cerrado com áreas de pastoreio, MELO & SILVA (1995) observaram que o sistema de manejo adotado na pastagem promoveu alterações nas propriedades físicas e no conteúdo de matéria orgânica. A compactação provocada pelo pastejo dos restolhos e a redução da matéria orgânica influenciaram negativamente as propriedades do solo, aumentando a densidade e diminuindo o tamanho dos agregados estáveis em água e a macroporosidade.

O efeito de cinco sistemas de preparo do solo em propriedades físicas de uma Terra Roxa Estruturada foi avaliado por MORAES & BENEZ (1994). Os sistemas de preparo do solo não

influenciaram significativamente a densidade do solo e a condutividade hidráulica do solo saturado. A desagregação do solo provocada pela subsolagem + enxada rotativa, aração + gradagem e enxada rotativa aumentou a macroporosidade e o volume total de poros e diminuiu a microporosidade.

SILVA & KATO (1997) realizaram um experimento em Latossolo Vermelho-Amarelo de cerrado, para verificarem o efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada, em três diferentes condições de manejo. Os autores verificaram que a formação de selamento superficial ocorre com maior dificuldade na área de cerrado virgem.

CAMPOS et al (1995) concluíram que o sistema de manejo em plantio direto, apresentou diâmetro médio dos agregados cerca de duas vezes maior do que sob sistema de manejo convencional. Esta diferença está diretamente relacionada ao incremento de carbono orgânico e à atividade microbiana no plantio direto.

Com relação a porosidade, CARVALHO et al (1995) verificaram diferenças significativas entre os sistemas de manejo. Os tratamentos arado de disco, plantio direto e testemunha apresentaram comportamento semelhante, mas se diferenciaram dos demais tratamentos aplicados, como por exemplo aração e gradagem. O estudo foi realizado na camada superficial de um solo Podzólico Vermelho-Amarelo Câmbico.

GOLABI et al (1995), em estudo sobre efeitos do manejo convencional e de plantio direto na macroporosidade, concluíram que ocorreram mais macroporos na superfície do solo sob plantio direto. Estes autores alegaram ainda que a alta taxa de infiltração verificada nesta condição de manejo pode estar relacionada à macroporosidade.

AZOOZ & ARSHAD (1996), comparando a infiltração de água no solo e a condutividade hidráulica em um solo submetido ao plantio direto e ao manejo convencional, observaram que a taxa de infiltração foi significativamente menor neste último; a microporosidade e a condutividade hidráulica foram significativamente maiores no plantio direto.

Em um Latossolo Vermelho Escuro textura argilosa cultivado com milho e soja, CANALLI & ROLOFF (1997) verificaram que ocorreu menor disponibilidade de água na camada arável sob sistema em plantio direto, em relação à camada de 20-40. Tal fato evidenciou a compactação superficial provocada pelo plantio direto. Estes autores verificaram ainda que o

armazenamento real de água foi maior na camada superficial, devido a uma maior proporção de microporos.

LONGO (1999) pesquisou as modificações nas propriedades do solo decorrentes da introdução de pastagem no cerrado, verificando que ocorrem alterações em algumas características e propriedades, especialmente com relação aos atributos físicos. Tal resultado mostra a susceptibilidade dos solos de cerrado ao uso agrícola.

Em estudo sobre o efeito do manejo do solo sobre os teores de matéria orgânica em um Latossolo Roxo, PAIVA et al (1997) encontraram diferença significativa entre o sistema em plantio direto e o sistema convencional. Já MUZILLI (1981) e MUZILLI (1983) não observou diferenças nos teores de matéria orgânica entre estes dois sistemas de manejo, alegando que o manejo dos restos de cultura de verão e de inverno pode ser o fator determinante do comportamento diferencial entre as duas condições.

3.3. Densidade do solo, microporos, macroporos, porosidade total e frações granulométricas

COSTA (1979) e ALVARENGA et al (1993) comentam que o espaço poroso de aeração (macroporosidade efetiva), não deve ficar aquém de 10 a 12% do volume do solo, para que o crescimento de raízes e de microrganismos não seja comprometido.

Em solos compactados ocorre a diminuição na porosidade livre de água, com conseqüente decréscimo em sua permeabilidade, tanto para água como para as trocas gasosas. A baixa aeração induz à ramificação das raízes adventícias superficiais, tornando-as menos eficientes na absorção de água e nutrientes e nas trocas gasosas (CAMARGO & ALLEONI, 1997).

BORGES (1995) ao promover a compactação do solo, elevando os valores de densidade do solo de 1,32 kg/dm³ para 1,77 kg/dm³, em um Latossolo Vermelho Escuro textura média, observou uma redução de 5,80 vezes na porosidade de aeração e um aumento de 1,58 vezes na umidade. Estes valores comprometeram o crescimento das plantas.

Uma redução no espaço de aeração abaixo do mínimo necessário para o crescimento de raízes e para a nodulação da soja, foi observado por CINTRA & MIELNICZUCK (1983). Isso ocorreu quando a densidade do solo foi superior a 1,30 kg/dm³ e ocasionou 50% de redução no comprimento de raízes da soja.

GRABLE (1966) e CAMARGO (1983) mostraram que um desbalanceamento da relação água/oxigênio/gás carbônico pode induzir a produção de substâncias tóxicas para os vegetais, alterações no pH e na disponibilidade de nutrientes. Como esta relação é dependente da porosidade, sua alteração provoca também modificação no ambiente próximo às raízes.

Para VOORHEES (1977), a compactação do solo, refletida pelo acréscimo na densidade, aumenta o conteúdo volumétrico de água, mas não aumenta sua disponibilidade para as plantas e organismos vivos do solo. Tal fato deve-se à quebra de continuidade dos poros e maior força de retenção de água pelos finos poros produzidos pela compactação.

GRABLE (1966) sugere que nenhuma predição deve ser feita entre a densidade do solo e parâmetros químicos e físicos do solo, uma vez que ambos são variáveis com o solo, com o manejo e com as exigências das plantas.

GUPTA et al (1983) mostraram que a distribuição de tamanho e do arranjo dos poros afetam a retenção de água e a condutividade hidráulica do solo.

PATGIRI & BARUAH (1995a), em estudos sobre a porosidade do solo e a umidade de saturação, encontraram valores abaixo de 15% para o coeficiente de variação desses atributos e verificaram também distribuição de probabilidade normal nas condições de estudo.

A textura do solo, resultante da proporção relativa entre os diferentes grupos de partículas primárias existentes no solo (areia, silte e argila) é determinada pela análise granulométrica, classificando-as em classes de diâmetro. Partículas de uma mesma classe de diâmetro podem apresentar estruturas, composições química, tamanhos e formas diferenciadas, podendo ser cristalinas ou amorfas (KIEHL, 1979).

A textura é uma das características mais estáveis do solo e praticamente não sofre alterações com o manejo do solo. Para FERNANDES et al (1983), a textura do solo só pode ser alterada na camada superficial por efeito de erosão eólica e/ou da aplicação maciça de fertilizantes e calcário.

A análise textural pode apresentar subestimativas e/ou superestimativas das frações argila e silte, em função da formação de pseudo-partículas (pseudo-silte e pseudo-areia) decorrentes da microagregação das partículas unitárias. Esta microagregação é causada pela ação de agentes

cimentantes, como sesquióxidos de ferro e componentes orgânicos, além da própria argila (VERHEYE, 1984).

A microagregação possui efeito mais intenso em solos argilosos e ricos em sesquióxidos de ferro. ESPINDOLA & GALHEGO (1981) em Latossolo Roxo, e FERNANDES (1993), em Latossolo Vermelho Escuro argiloso, verificaram que sob mata ocorrem maiores valores de pseudo-partículas do que nos mesmos solos cultivados.

3.4. Condutividade hidráulica e infiltração de água no solo

A condutividade hidráulica do solo saturado, associada a outras propriedades, é de fundamental importância no planejamento do uso agrícola dos solos, sendo um fator de grande importância em projetos como os de irrigação e drenagem.

Segundo ABID (1978), a condutividade hidráulica representa a vazão da água através de uma unidade de seção transversal de solo, sobre gradiente hidráulico unitário, a uma determinada temperatura.

REICHARDT (1985) formulou uma discussão sobre a determinação da condutividade hidráulica pela aplicação da equação de Darcy, sendo comentado que, como a condutividade hidráulica depende da geometria do espaço poroso, ela varia enormemente de solo para solo e para o mesmo solo, a partir de variações estruturais, da compactação, etc..

Lamb e Cury, citados por CARVALHO (1991), verificaram que a condutividade hidráulica do solo é influenciada pelos fatores granulometria, porosidade do solo, forma e dimensão dos poros, grau de saturação do solo e sais dissolvidos na água.

CARVALHO (1991) cita que as propriedades relacionadas ao movimento da água no solo, como a condutividade hidráulica, seguem uma distribuição de probabilidade log-normal, devido à grande variabilidade espacial dessas propriedades, requerendo, portanto, grande número de amostras para uma adequada caracterização do solo.

NIELSEN et al (1973) verificaram que a variação espacial da condutividade hidráulica aumenta com o decréscimo da % de saturação de água no solo.

STOCKTON & WARRICK (1971) apresentaram a equação de Millington-Quirk como uma boa alternativa para descrever a condutividade hidráulica para solos não saturados.

Afirmaram que, devido à grande variação dos valores dessa propriedade, o valor médio pode conduzir a conclusões diferentes sobre as condições reais do solo.

CARVALLO et al (1976) encontraram significativa variabilidade espacial da condutividade hidráulica para a equação de Green e Corey.

CADIMA et al (1980) determinaram a condutividade hidráulica em função da umidade do solo para um Latossolo Vermelho Amarelo textura média. Utilizando a estatística descritiva, encontraram expressiva variabilidade dos dados, sendo, portanto, possível incorrer em erros consideráveis quando se estimam fluxos de água neste solo a partir de valores médios. Também foi observado que nas camadas mais profundas do solo a variabilidade torna-se menor, devido à maior homogeneidade dos mesmos e, assim, os valores médios podem ser utilizados com relativa segurança.

ROGOWOSKI (1972) sugeriu que se o desvio padrão obtido para os dados logaritmados de condutividade hidráulica for menor que 2 cm/dia o solo pode ser considerado uniforme com relação a esta característica.

Segundo Philip (1969) citado por OLIVEIRA e PINTO (1995), o decréscimo da condutividade hidráulica com a umidade deve-se às seguintes razões: a) a seção transversal total disponível ao fluxo diminui rapidamente com a redução na umidade volumétrica; b) os poros maiores do solo são esvaziados primeiramente com o decréscimo da umidade; c) para casos de baixos valores de umidade, aumenta-se a probabilidade da água ocorrer em poros separados, rompendo o contato hidráulico.

Libardi et al (1979), citado por OLIVEIRA e PINTO (1995), propuseram um método para estimar a condutividade hidráulica não saturada a partir de medidas de umidade do solo em função do tempo de drenagem interna, mantendo-se coberta a superfície, a fim de se evitar evaporação.

OLIVEIRA e PINTO (1995) utilizaram o método do perfil instantâneo com colunas de solo e obtiveram equações de condutividade hidráulica em função da umidade para um Latossolo Vermelho-Amarelo. A equação de regressão apresentou um coeficiente de determinação próximo de 1, sendo estatisticamente significativo.

GONÇALVES e FOLEGATTI (1995) comentam que uma alta variabilidade de propriedades físicas do solo, tais como a densidade do solo e o conteúdo de areia, argila e silte,

causam uma alta variabilidade na condutividade hidráulica. Verificaram ainda que as propriedades hidráulicas do solo não variam aleatoriamente no espaço, mas apresentam, na verdade, um arranjo estrutural de variabilidade com uma dimensão característica.

WAGER & DENTON (1989) encontraram redução de até 86% na condutividade hidráulica do solo saturado, quando as determinações foram feitas em diferentes pontos da cultura, como, por exemplo, nas linhas e entrelinhas da cultura. Resultados semelhantes foram encontrados por MOHANTY et al (1994), que utilizaram o métodos dos anéis infiltrômetros para determinar a condutividade, tendo observado CV acima de 60% em todas as condições de estudo.

Utilizando o teste de SHAPIRO-WILK para verificarem a normalidade da variável condutividade hidráulica, MOHANTY et al (1994) concluíram que essa variável não se distribui segundo uma normal, não tendo observado estrutura de variabilidade espacial para a condutividade, ajustando o modelo de semivariograma de efeito pepita puro.

GONÇALVES e FOLEGATTI (1995) não encontraram estrutura de dependência espacial para a condutividade hidráulica de uma Terra Roxa Estruturada em área irrigada, tendo concluído que o valor médio desse parâmetro pode não ser um bom representante do valor real, devido à alta variabilidade desses dados.

GUPTA et al (1993) fizeram um estudo comparativo da medida de condutividade hidráulica saturada usando quatro métodos, verificando que as médias de condutividade hidráulica saturada obtidas pelo método dos anéis concêntricos e pelo permeâmetro de Guelph foram estatisticamente iguais, assim como para o simulador de chuva e o infiltrômetro de Guelph, entretanto, os dois grupos diferiram entre si. Concluíram também que o permeâmetro de Guelph e o infiltrômetro de Guelph necessitam de maior número de amostras para a estimativa da média com determinada precisão, quando comparado com o infiltrômetro de anéis e o simulador de chuvas. Isto se deve ao fato de que aqueles métodos apresentam maior Coeficiente de Variação em relação aos dois últimos.

Segundo GUPTA et al (1993), os valores de K_{fs} são geralmente menores do que a condutividade hidráulica saturada (K_s). Este autor recomenda utilizar um fator de multiplicação igual a 2 para transformar valores de K_{fs} em K_s .

HOUSSEINI et al (1993) encontraram valores de CV para a variável condutividade hidráulica do solo saturado acima de 78%. A alta variabilidade desse atributo pode induzir a erros de estimativas, quando essas são realizadas com a média aritmética simples.

EDWARDS et al (1979), EDWARDS et al (1988), DICK et al (1989), BLEVINS et al (1990) mostram que a infiltração de água no solo está diretamente relacionada com a sua macroporosidade.

JABRO (1992) utilizou um modelo de regressão múltipla para prever a condutividade hidráulica saturada do solo, usando suas frações granulométricas e a densidade. O coeficiente de determinação encontrado foi de 0,68 e significativo. Foi utilizado o método de seleção de variáveis “stepwise”, sendo selecionados para o modelo o silte, a argila e a densidade do solo. Para este autor, a limitação do permeâmetro de Guelph está no fato de que este equipamento atribui valores negativos e positivos de condutividade hidráulica, além de revelarem substancial variabilidade nas medidas para um dado solo. Recomenda ainda que o permeâmetro de Guelph deva ser utilizado em solos com horizontes homogêneos, estruturalmente estáveis e em solos de textura arenosa ou média, não o recomendando para solos de textura fina, orgânicos, pesados e solos heterogêneos.

No modelo de JABRO (1992) a variável areia apresentou-se estatisticamente não significativa com relação à condutividade hidráulica e, portanto, não foi inserida no modelo.

PRUSKI et al (1997) compararam métodos de estimativas de infiltração de água no solo e verificaram que, para um Latossolo Roxo previamente preparado e sem cobertura vegetal, a velocidade de infiltração de água e a variação entre esses valores foi maior nos ensaios com o infiltrômetro de anel, em relação ao simulador de chuvas.

VIEIRA (1993), em estudos sobre o transporte de atrazina em perfis do solo, verificou que a condutividade hidráulica constitui um atributo de fundamental importância, sendo que os solos pesquisados apresentaram uma alta variabilidade da condutividade, afetando o semivariograma.

Os efeitos da variabilidade do atributo em estudo no semivariograma é percebido pelo alto efeito pepita (C_0), em relação ao patamar, e uma variabilidade grande dos valores calculados das semivariâncias (ora valores altos ora valores baixos), provocando uma alternância nos valores experimentais das semivariâncias. Estes fatos dificultam a determinação do modelo de semivariograma da variável, e isso pode provocar erros de inferências.

3.5. Variabilidade espacial em solos

3.5.1. O problema de amostragem

A literatura sobre experimentação agrônômica enfatiza a necessidade de que as amostras sejam representativas de áreas homogêneas. Segundo REICHARDT (1985) e REICHARDT et al (1986), a grande maioria dos modelos, teorias e recomendações, presumem solos homogêneos, sendo que a amostragem em solos só consideram a heterogeneidade em profundidade.

O critério adotado para o julgamento de homogeneidade de solos, em muitos casos, é subjetivo, considerando apenas uniformidade quanto à textura, cor, topografia e manejo. CATANI et al (1954), SANCHEZ (1981), RAIJ (1987) citam que, para fins de análise de fertilidade, a área considerada homogênea não deve exceder 20 ha.

Surge, então, a questão de como realizar uma amostragem que represente adequadamente as condições do solo em estudo. RAO e ULABY (1977) , em estudos com umidade do solo, verificaram que a amostragem estratificada, usando alocação ótima, reduz o número de amostras em relação à amostragem simples ao acaso. Estes autores verificaram ainda que a redução do número de amostras é mais significativa na superfície, onde a variabilidade do solo é, geralmente, maior.

O problema do uso da amostragem estratificada por alocação ótima consiste na exigência do conhecimento do tamanho da população em cada estrato, o que não é uma tarefa fácil em estudos de ciência do solo.

STARR et al (1995) utilizaram vários volumes de amostras de densidade do solo, umidade e algumas propriedades químicas e biológicas concluindo que o efeito do volume é mais consistente em pequenos volumes, pois diminui-se a média, aumenta-se a assimetria e a variabilidade, quando comparado com volumes maiores.

McBRATNEY e WEBSTER (1983), WEBSTER e BURGESS (1984) utilizaram técnicas de geoestatística e da estatística clássica e realizaram estimativas de médias e variâncias, empregando as duas metodologias, e mostraram a maior eficiência da geoestatística na estimação, proporcionando menor variância destas estimativas.

CHEN et al (1995) concluíram que o planejamento experimental e o número de amostras para estimativas de umidade do solo deve considerar a variabilidade espacial.

REICHARDT et al (1986) mostram que a técnica de amostragem sistemática pode ser vantajosa em relação à amostragem aleatória simples, pois, além de permitir estimativas realizadas pela estatística clássica, possibilita também avaliar a dependência entre observações e o estudo da estrutura da variância.

Vale ressaltar que a amostragem sistemática consiste em tomar amostras com espaçamento pré definido, formando uma malha ou um transecto georeferenciado. Com o advento de novas tecnologias, como é o caso do GPS, a georeferenciação pode ser feita em uma malha irregular, tomada aleatoriamente, como cita ROUET (1995), e a avaliação da dependência espacial e da estrutura de variância pode ser realizada.

VACHAUD et al (1985), utilizando o conceito de estabilidade temporal da umidade do solo, verificaram que locais de ocorrências de valores máximos, mínimos e médios são praticamente coincidentes com o decorrer do tempo. O conhecimento da estabilidade temporal pode reduzir o esforço de amostragem da variável. GUIMARÃES (1996) com base na metodologia descrita em VACHAUD et al (1985) e com o uso de um SIG, mapeou as regiões de ocorrência de umidade máxima, mínima e média de um Latossolo Roxo.

VEIRA (1997) enfatiza que quando ocorre a variabilidade espacial para os atributos dos solos, a amostragem simples ao acaso falha em detectá-la, e, desta forma, esconde a realidade do comportamento da variável no solo.

BERG & KLAMT (1997a, 1997b), em estudos de características de solos do Rio Grande do Sul, concluíram que métodos alternativos de amostragem devem ser testados, para amenizar o efeito negativo da variabilidade de características a curtas distâncias na qualidade de mapas pedológicos. Estes autores verificaram que características dos solos dependentes de processos pedogenéticos mostram interdependência espacial de 500 m ou mais, porém a variância de características afetadas pelo manejo persiste em espaçamentos menores.

3.5.2. Aspectos básicos da variabilidade nos solos

As características e propriedades dos solos possuem variabilidades que podem ser casuais, onde não existe uma explicação para sua ocorrência, ou variações que podem ser explicadas pela anisotropia manifestada pelos processos de formação do solo, bem como pelos diferentes tipos de uso e manejo dos mesmos.

A metodologia clássica da estatística considera as variações que ocorrem entre as amostras como casuais. Considera ainda que as variações são independentes e normalmente distribuídas. Nessa metodologia o Coeficiente de Variação (C.V.), que mede a variabilidade em relação à média, é a estatística que resume a variabilidade do atributo, não distinguindo o número de amostras utilizada e nem sua posição espacial.

Alguns trabalhos como os de SILVA (1988); DOURADO NETO (1989), CARVALHO (1991) e GUIMARÃES (1993), abordam alguns aspectos da variabilidade tratada pela estatística clássica, sendo que maiores detalhes podem ser obtidos em textos básicos de estatística como COSTA NETO (1979) e BUSSAB & MORETTIN (1987).

A metodologia que estuda a variabilidade espacial (geoestatística) procura separar a variabilidade explicada pela relação existente entre as amostras e a variabilidade casual, fazendo com que as estimativas realizadas por esta metodologia sejam mais precisas em relação à estatística clássica.

Tendo como base trabalhos desenvolvidos em atividades de mineração, MATHERON (1963,1971) formalizou a teoria das variáveis regionalizadas, sendo que a base geoestatística está nesse conceito de variável regionalizada associada com conceitos de funções aleatórias e estacionaridade.

TRANGMAR 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 onde 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.

Segundo DAVID (1977) um fenômeno é estacionário de 2ª ordem se a esperança da variável aleatória for igual à média (μ) e se a variância for finita. Portanto, sendo $Z(x)$ uma realização Z da variável x , então:

$$E[Z(x)] = \mu, \quad \forall x \quad (1)$$

$$C(h) = E[Z(x)Z(x+h)] - \mu \quad (2)$$

Da equação 2 tem-se que a covariância só depende da distância h , e uma variável aleatória é uma função intrínseca se:

$$E[Z(x)] = \mu \quad (3)$$

$$\text{VAR} [Z(x)-Z(x+h)] = E\{[Z(x)-Z(x+h)]^2\} = 2\gamma(h) \quad (4)$$

Observa-se que a variância é igual a $2\gamma(h)$, surgindo daí o nome de semivariância para a notação $\gamma(h)$. Deve se ressaltar também que a hipótese intrínseca está contida na hipótese de estacionaridade de segunda ordem, mas a recíproca pode não ser verdadeira.

A variabilidade espacial pode ser descrita a partir de autocorrelogramas e/ou semivariogramas; estas funções determinam a dependência espacial das amostras (VIEIRA et al (1983); LIBARDI et al (1986); REICHARDT et al (1986)).

A função autocorrelação encontra-se definida em VIEIRA et al (1983), e é dada por:

$$\rho(h) = \frac{\text{cov}[Z(x), Z(x+h)]}{s^2} \quad (5)$$

e $\rho(h)$ é estimado por:

$$r(h) = \frac{\{(n-k) \cdot [(\sum Z_i Z_{i+k}) - (\sum Z_i)(\sum Z_{i+k})]\}}{(n-k)(n-k-1)} / s^2 \quad (6)$$

em que:

$r(k)$ é o valor da autocorrelação;

k é a distância entre as amostras;

Z_i é o valor da amostra do i -ésimo local;

n é o número de observações;

s^2 é a estimativa da variância.

A função semivariância é definida por:

$$\gamma(h) = \frac{\{\sum [Z(x+h) - Z(x)]^2\}}{2N(h)} \quad (7)$$

em que:

h é a distância entre pares de observações ($Z(x+h)$, $Z(x)$);

$N(h)$ é o número de pares de observações possíveis na distância h ,

Segundo BRAGA (1990) as duas principais vantagens do semivariograma em relação ao autocorrelograma são:

(i) não necessidade do conhecimento da esperança da função aleatória ($Z(x)$) para o conhecimento da semivariância (γ);

(ii) maior abrangência de sua definição, pois incluem-se as funções aleatórias com variância infinita.

O valor da semivariância média das amostras é um estimador, sem tendência, da semivariância média da população, assumindo que a hipótese intrínseca foi satisfeita. Quando o patamar é atingido tem-se a variância da população e independência entre as amostras (DOURADO NETO, 1989).

Em VIEIRA et al (1983) encontram-se os principais modelos para o ajuste do semivariograma:

(i) linear

$$\gamma(h) = C_0 + Bh \quad 0 \leq h \leq a \quad (8)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \quad h > a$$

(ii) Esférico

$$\gamma(h) = C_0 + C[1,5(h/a) - 0,5(h^3/a^3)] \quad 0 \leq h \leq a \quad (9)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \quad h > a$$

(iii) Exponencial

$$\gamma(h) = C_0 + C(1 - \exp(-3h/a)) \quad 0 \leq h \leq d \quad (10)$$

(iv) Gaussiano

$$\gamma(h) = C_0 + C(1 - \exp(-3h^2/a^2)) \quad (11)$$

(v) Modelo sem patamar

$$\gamma(h) = C_0 + Ah^B \quad 0 < B < 2 \quad (12)$$

O parâmetro C_0 é denominado efeito pepita e representa a variabilidade para escalas menores que a distância de amostragem; $C_0 + C$ é o valor em que o semivariograma se estabiliza, e

é uma estimativa da variância da população; “a” é a amplitude de dependência e indica a distância abaixo da qual as amostras tem uma autocorrelação espacial.

Em publicação recente, VIEIRA (1997) discute aspectos da metodologia de aplicação e interpretação de resultados geoestatísticos, utilizando os semivariogramas para descrever a variabilidade espacial. O autor utilizou parâmetros como a argila, o silte e alguns atributos químicos de um Latossolo Roxo no desenvolvimento de seu trabalho.

VIEIRA et al (1991) utilizaram o escalonamento de semivariogramas no ajuste de modelos, que se torna possível quando ocorre uma proporcionalidade entre as médias e as variâncias das variáveis pesquisadas. Com o escalonamento têm-se semivariogramas com patamar 1, permitindo, desta forma, a generalização das estimativas dos parâmetros dos semivariogramas, o que facilita as estimativas em locais não amostrados, por intermédio da krigagem, reduzindo o tempo computacional e também permitindo a comparação da variabilidade espacial, expressa pelo semivariogramas das variáveis pesquisadas.

VIEIRA et al (1996) utilizaram conceitos de estabilidade temporal e escalonamento de semivariograma e analisaram simultaneamente, mediante semivariogramas tridimensionais, a variabilidade espacial e temporal de alguns atributos dos solos.

VIEIRA et al (1997) mostram a aplicação dos semivariogramas escalonados em estimativas realizadas em campo. Comparando semivariogramas não escalonados e escalonados, estes autores mostram que os pesos da krigagem são independentes do fator de escalonamento e que as estimativas de realizações de variáveis com estrutura espacial semelhantes podem ser feitas por esta técnica.

Outro aspecto relacionado ao semivariograma diz respeito ao seu patamar, que é definido a partir da distância de estabilização dos valores de semivariâncias, estando, portanto, associado ao alcance da dependência espacial. Alguns semivariogramas não apresentam este patamar definido, como é o caso, por exemplo, do semivariograma linear sem patamar. Este fato indica a não estacionaridade de segunda ordem e/ou que o tamanho do campo amostrado não foi suficientemente grande para exibir toda a variância, sendo possível que exista uma tendência dos dados em alguma direção. VIEIRA (1995) recomenda que, neste caso, se faça uma remoção da tendência e que se trabalhe com os semivariogramas dos resíduos.

Tanto no escalonamento do semivariograma como na remoção de tendência deve-se, ao estimar a variável para locais não amostrados, adicionar a tendência e proceder ao desescalonamento.

Como vêm demonstrando os trabalhos referidos, verifica-se que um dos objetivos da modelagem do semivariograma é a realização de estimativas em locais não amostrados. A técnica geoestatística denominada krigagem foi definida em VIEIRA et al (1983) e em TRANGMAR et al (1985) como uma técnica de estimação de valores de uma variável aleatória em locais não amostrados, usando as propriedades estruturais do semivariograma e o conjunto de valores experimentais inicial.

Teoricamente, a krigagem é o melhor método de interpolação, porque está baseada na metodologia de Melhor Estimador Linear Não Tendencioso e é responsável pelo agrupamento dos dados (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

O estimador de krigagem determina uma ponderação dos estimadores amostrados, sendo os pesos calculados de forma a minimizar a variância do erro de predição, levando em consideração a configuração espacial da amostra (BRAGA, 1990).

3.5.3. A aplicação da variabilidade em Ciência do Solo

Estudos estatísticos, como as estimativas, estão sempre associados à dispersão da variável e, com muita frequência, encontra-se, na literatura, a preocupação de pesquisadores com a variabilidade de características e propriedades dos solos.

Alguns autores como OLIVEIRA (1973), NIELSEN et al (1973), CAMERON (1978), CASSEL e BAUER (1975), SILVA (1988), GUIMARÃES et al (1992), GUIMARÃES (1993) caracterizaram a distribuição de probabilidade de propriedades físicas dos solos e estudaram a variabilidade dos dados para fins de dimensionamento de amostras. Essa variabilidade foi caracterizada pelo coeficiente de variação (C.V.), sendo que um dos aspectos negativos desta estatística é que ela não considera a continuidade espacial das propriedades dos solos.

Ultimamente, a geoestatística, uma metodologia que considera a continuidade espacial das propriedades físicas dos solos, vem sendo bastante empregada na Ciência do Solo.

VIEIRA (1995), na introdução de seu trabalho sobre geoestatística, mostra que a preocupação com a variabilidade espacial dos solos já estava presente desde o início deste século, ressaltando que, com os princípios de casualização e repetição, introduzidos por Fisher na década de 50, e com o conhecimento das funções de densidade das variáveis aleatórias, ocorreu uma descontinuidade nos estudos da variabilidade espacial de atributos dos solos, na área agrícola.

A estatística proposta por Fisher exige que as hipóteses básicas de normalidade de erros, homogeneidade de variâncias e independência de erros sejam atendidas, para sua eficiente aplicação. Essas hipóteses geralmente não são testadas, e quando não atendidas provavelmente levarão a inferências que carecem de confiança e precisão.

A partir do fim da década de 70 as pesquisas com a variabilidade espacial de atributos dos solos agrícolas tomaram novo impulso, podendo-se citar autores como: Burgess & Webster (1980 a,b), Vauclin et al (1982), Vieira et al (1981), Vieira et al (1983), Vieira et al (1988), Nielsen et al (1983), Vieira et al (1991), Vieira et al (1992), Prevedello (1987), Silva (1988), Dourado Neto (1989), Boni et al (1992), Guimarães et al (1992), Silva et al (1989), Perfect et al (1990), Vachaud et al (1985), Libardi et al (1986), Turatti (1990), Turatti et al (1990), Trangmar et al (1985) e Reichardt et al (1986) citados por GUIMARÃES (1993). Oliveira e Menk (1971), Cadima et al (1980), Diaz e Beltrame (1986) citados por CARVALHO (1991). Estes pesquisadores trabalharam com diversos atributos físicos e químicos, de várias classes de solos e em diferentes ecossistemas e mostraram a importância e a presença da variabilidade espacial no solo.

Pesquisas recentes continuam inferindo sobre aspectos de variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas dos solos.

HOUSSEINI et al (1993) ajustaram modelo de semivariograma para a variável condutividade hidráulica do solo saturado, com alcance de 4,5 km e efeito pepita respondendo por 67% da variabilidade total dos dados. Este fato mostra a grande dispersão aleatória encontrada para o atributo condutividade hidráulica.

PATGIRI & BARUAH (1995a) ajustaram modelos de semivariogramas para a porosidade total do solo e a umidade de saturação, utilizando a regressão por mínimos quadrados. Verificaram também que a variabilidade casual, expressa pelo efeito pepita, foi relativamente

pequena, contribuindo com no máximo 20% da variabilidade total. Tal fato indicou a forte dependência espacial dessas variáveis.

PATGIRI & BARUAH (1995b) utilizaram os modelos ajustados de semivariograma para a porosidade e para a umidade de saturação e realizaram estimativas pelo método de krigagem.

GONÇALVES E FOLEGATTI (1995), em pesquisas sobre a variabilidade espacial de uma Terra Roxa Estruturada, com o uso de irrigação, ajustaram modelos de semivariogramas com alcance de 30 m para a areia e a argila e 10 m para o silte; a densidade do solo e a condutividade hidráulica apresentaram ausência de padrão espacial. Estes autores verificaram ainda que a densidade do solo e a textura apresentavam distribuição normal, mas a condutividade hidráulica diferiu da normal e os maiores valores de CV foram obtidos para a variável condutividade hidráulica do solo saturado.

VIEIRA (1997), utilizando dados de argila, silte e atributos químicos de um Latossolo Roxo, verificou que na camada de 0-25 cm o CV foi mais alto do que na camada de 25-50 cm. O autor fez uma suposição de que isso pode ter ocorrido devido às alterações impostas pelo cultivo. Neste mesmo trabalho o autor ajustou semivariogramas para as variáveis pesquisadas, portanto, existe a dependência espacial e a amostragem aleatória simples não detectaria essa variabilidade.

SOUZA et al (1997) verificaram que, em um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico textura média, cultivado com citros, ocorreu dependência espacial para quase todas as variáveis químicas e físicas pesquisadas. Somente a saturação por bases e por alumínio apresentaram distribuição aleatória. O menor alcance de dependência espacial foi encontrado para a areia total e a argila (18 m) e o maior para a matéria orgânica, cálcio, magnésio, Ca+Mg e soma de bases (59 m).

3.6 O Sistema de Informação Geográfica (SIG)

O uso de mapas, gráficos e outros recursos que sintetizam um conjunto de informações é sempre preferido quando se dispõe de um grande conjunto de dados, porque proporciona uma interpretação rápida e direta da variável em estudo.

Em vários campos do conhecimento humano o uso de mapas e gráficos é um processo rotineiro. Estes mapas confeccionados em papel às vezes sofrem uma desatualização rápida e, em

muitos casos, as informações procuradas encontram-se em vários desses mapas, o que dificulta o seu uso.

Para BURROUGH & McDONNELL (1999), os sistemas de informações geográficas tem se mostrado uma poderosa ferramenta, capaz de armazenar, exibir e manipular informações georeferenciadas.

FORMAGGIO et al (1992) concluíram que os sistemas de informação geográfica constituem, atualmente, em uma das mais modernas e promissoras tendências de armazenamento e manipulação de informações temáticas sobre recursos naturais terrestres, em complemento, e até em substituição, aos mapas impressos em papel.

Na área agrícola o SIG vem sendo utilizado com muita frequência em pesquisas, envolvendo principalmente os recursos naturais e o meio ambiente. Em solos, sua aplicação tem sido mais intensa em estudos de mudanças de uso da terra, avaliação de terras para fins agrícolas e em estudos de degradação do solo (Pinto et al (1989), Beltrame (1991), Silva et al (1993), Donzeli et al (1992), Lopes Assad (1995), Cavalieri et al (1995), Lima et al (1992), Scopel et al (1993), Bacellar et al (1994), Valério Filho (1994), Chaves et al (1995), Levy e Saporovek (1995), Hamada et al (1995), citados por CAVALIERI (1998))

Para ROCHA (1996), o SIG constitui uma poderosa ferramenta no planejamento das atividades agropecuárias, mas seu uso é limitado em função de recursos de informática e do não treinamento dos técnicos agrícolas.

Em Física do Solo o SIG pode contribuir para sintetizar as informações de campo e proporcionar uma eficiente avaliação das propriedades dos solos, detectando áreas problemáticas e contribuindo para a aplicação da agricultura de precisão. GUIMARÃES (1996) utilizou a metodologia de estabilidade temporal associada ao SIG para mapear a umidade do solo, objetivando reduzir o número de amostras por amostragem deste atributo.

VIEIRA (1993), com a finalidade de estudar a movimentação de agroquímicos nos solos, utilizou a metodologia geoestatística e um sistema de informação geográfica, mapeando várias propriedades físicas dos solos, o que possibilitou inferir a respeito do transporte desse agroquímicos nos perfis desses solos.

HOUSSEINI et al (1993) compararam técnicas de interpolação para o mapeamento da condutividade hidráulica do solo, concluindo que a krigagem ordinária foi o método mais apropriado. A precisão do interpolador foi medida a partir da média de erros absolutos entre valores estimados e observados.

Comparação entre a krigagem e o método do inverso do quadrado da distancia foi estabelecida por GOTWAY et al (1996), que ressaltaram a importância da avaliação de estatísticas como o CV dos valores amostrados para a decisão da metodologia de interpolação.

PEREIRA et al (1997) utilizaram o sistema de informação geográfica para realizar estimativas de área e população na região de cerrado, chegando a uma área de 2064676 km² e a uma população, em 1991, de 21064010 habitantes. Os autores justificam o uso do SIG porque 34% dos municípios dessa região pertencem também a outras regiões diferentes do cerrado.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido em duas áreas experimentais, localizadas no município de Uberlândia – MG, às margens da BR 452 – km 02.

O município de Uberlândia está localizado a 18° 55' 23" de Latitude Sul e 48° 17' e 19" de Longitude W Gr., no "Domínio dos Planaltos e Chapadas da Bacia Sedimentar do Paraná", porém inserida na subunidade "Planalto Meridional da Bacia do Paraná" (BRASIL, 1983). Apresenta, no geral, relevo tabular, suavemente ondulado, com altitudes inferiores a 1000 m.

A vegetação predominante no município, é do tipo cerrado. O clima é tropical chuvoso, que se caracteriza pelo inverno seco, com temperatura média mensal de 18°C e precipitação pluviométrica do mês mais seco em torno de 60 mm. No verão há grande instabilidade, provocando chuvas concentradas de outubro a março. Os meses de dezembro, janeiro e fevereiro são responsáveis por cerca de 50% da precipitação anual, cuja média é de 1550 mm. Outubro e fevereiro são os meses mais quentes, com temperatura média mensal variando de 20,9°C a 23,1°C, enquanto a média anual das máximas encontra-se em torno de 29°C.

O município de Uberlândia possui uma população (estimada para 1999) de 480000 habitantes, sendo a terceira cidade do Estado de Minas Gerais em população.

As áreas objetos deste estudo, encontram-se situadas a 10 km da sede do município, no divisor de águas das bacias dos rios Uberabinha e Araguari, recobertas por materiais geológicos da formação Marília, caracterizando uma planície de vales espaços e com cotas média de altitude de 863 m e vegetação típica de cerrado.

Foram selecionadas duas áreas experimentais:

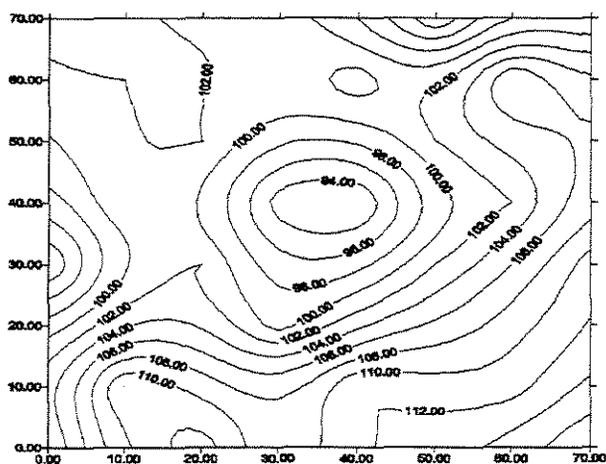
- Área 1 - está localizada na Fazenda Experimental do Grupo Novartis Sementes, com a ocorrência do Latossolo Vermelho Escuro textura argilosa. Nesta área emprega-se o

sistema de manejo em plantio direto há mais de 5 anos. Cultiva-se Milho/Soja em sistema de rotação no verão e uma cultura de cobertura no inverno. Por ocasião do experimento a área recebeu a cultura da soja, sendo que no inverno anterior havia sido cultivado o milho.

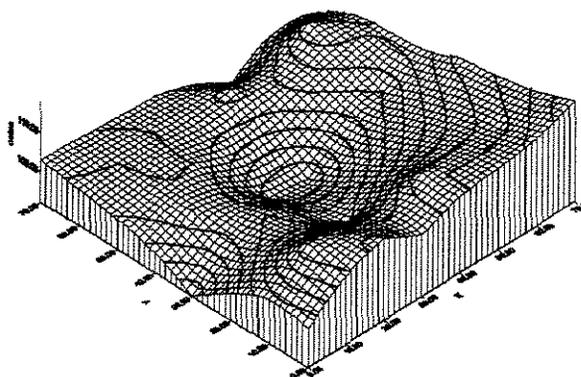
- Área 2 – está localizada na Fazenda São Francisco, de propriedade do Sr. João Abdala Hadad, com a ocorrência do Latossolo Vermelho Escuro textura argilosa. A área estudada está destinada à produção comercial da soja/milho, no sistema de manejo convencional (aração e gradagens). Por ocasião do experimento estava sendo cultivada a soja.

Em ambas as áreas o plantio da soja ocorreu no final de novembro/início de dezembro de 1997 e a amostragem foi realizada na primeira quinzena de janeiro de 1998.

O relevo pode ser caracterizado como suavemente ondulado (declividade média inferior a 1% em ambas as áreas) e as figuras 6a ,6b, 7a e 7b, representam, graficamente, o relevo das áreas experimentais, respectivamente, para o sistema de manejo em plantio direto e para o sistema convencional. Tomou-se como referência para a confecção dos gráficos uma cota arbitrária de 100 cm.



a)



b)

Figura 6. Representação do relevo da área experimental em sistema de manejo em plantio direto: a) Curvas de nível (cm) b) tridimensional (eixo Z em cm).

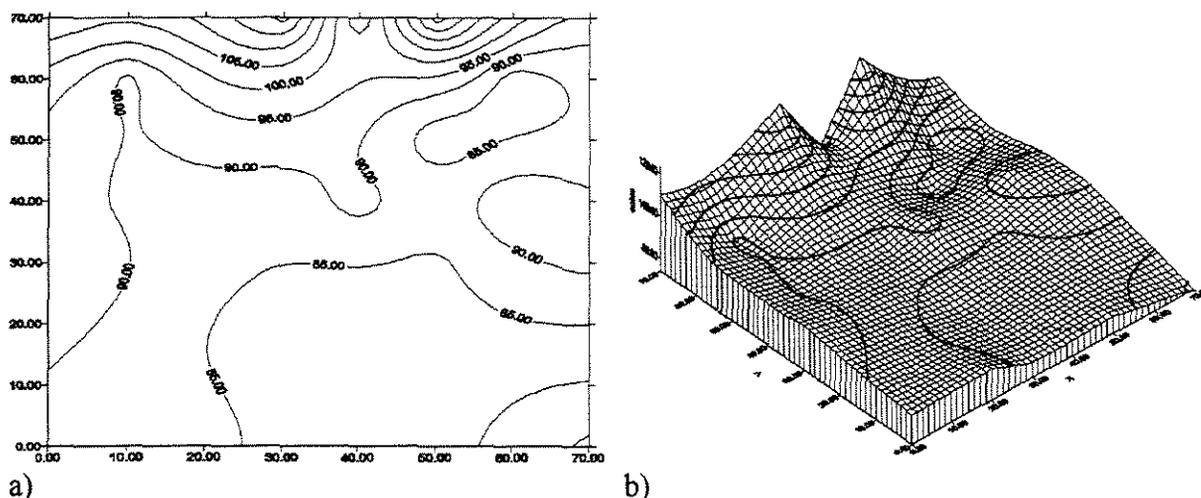


Figura 7. Representação do relevo da área experimental em sistema de manejo convencional: a) Curvas de nível (cm) b) tridimensional (eixo Z em cm).

A caracterização química e granulométrica preliminar (Quadro 1 e Quadro 2) das áreas em estudo mostrou a não ocorrência de problemas químicos, pois as áreas haviam recebido adubações antes do plantio. A análise granulométrica inicial revelou média das frações argila, silte e areia, praticamente iguais para as duas áreas.

Quadro 1. Caracterização química preliminar das áreas experimentais, obtida a partir de uma amostra composta para a área em plantio direto (PD) e uma amostra composta para a área em plantio convencional (PC). UFU/DEAGO/LABAS - Novembro/1997.

Área	Análise Química											
	PH Água	P --mg.dm ⁻³ ---	K	Al	Ca	Mg	H+Al -----cmolc.dm ⁻³ -----	SB	t	T	V -----%-----	m
PD	6,3	65,4	45	0,0	4,2	1,3	2,0	5,6	6	8	74	0
PC	6,1	16,6	87	0,0	2,6	0,7	2,9	3,5	4	6	55	0

P, K = (HCl 0,05 N + H₂SO₄ 0,025 N); Al, Ca, Mg = (KCl 1 N); SB = Soma de bases; t = CTC efetiva; T = CTC a pH 7,0; V = Saturação de Bases; m = Saturação de Al.

Quadro 2. Caracterização granulométrica preliminar das áreas experimentais, obtida a partir da média aritmética de 5 pontos aleatórios da área em plantio direto (PD) e da média aritmética de 5 pontos aleatórios da área em plantio convencional (PC). UFU/DEAGO/LABAS - Novembro/1997.

Área	Frações Granulométricas (g.kg ⁻¹)		
	Argila	Silte	Areia Total
PD	620	150	250
PC	590	175	235

4.2. Plano amostral

Para cada área do experimento, realizou-se um levantamento, por amostragem, em uma malha de 64 pontos (8 x 8), espaçados de 10 m. Os pontos foram marcados utilizando-se equipamentos de topografia e, por consequência, foram localizados anotando-se as coordenadas X, Y. Na figura 8 tem-se o esquema de localização das amostras no campo.

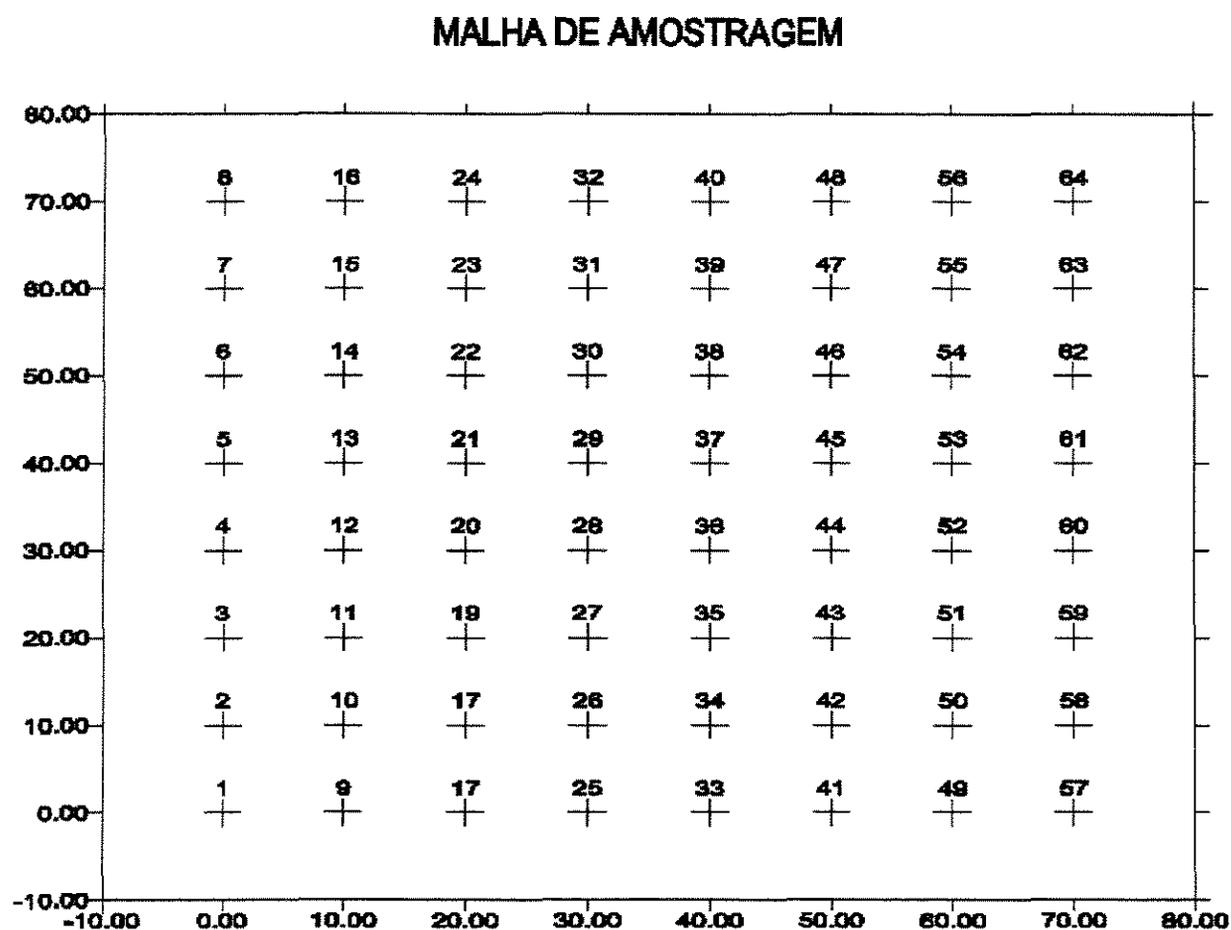


Figura 8. Esquema de amostragem sistemática utilizada nas áreas de manejo em plantio direto e convencional

O espaçamento de 10 m entre pontos amostrais foi adotado devido a alta variabilidade do atributo condutividade hidráulica do solo. Esta variabilidade pode dificultar a determinação do modelo de variabilidade espacial, por meio de semivariogramas, devido a capacidade infinita de

variação, ou seja, a não estacionaridade de segunda ordem para grandes distâncias (VIEIRA et al. 1983; VIEIRA, 1995).

4.3. Amostragem e obtenção de dados

Em cada área experimental procedeu-se à coleta de amostras nos pontos representados na figura 8, seguindo-se os procedimentos recomendados para cada variável, conforme descrito a seguir.

As análises de laboratório e os procedimentos para a coleta de amostras foram realizados de acordo com recomendações de EMBRAPA (1979) e KIEHL (1979).

4.3.1. Densidade do solo, volume total de poros, microporos e macroporos

As amostras para a obtenção dos dados de densidade do solo (Ds), volume total de poros (VTP), microporos (micro) e macroporos (macro) foram coletadas em cada ponto das malhas de amostragem. A partir de uma única amostra realizaram-se as determinações laboratoriais dessas variáveis.

As amostras foram coletadas na camada superficial do solo (0-15 cm) usando-se de anéis volumétricos (cilindro de Uhland). Cada amostra ficou acondicionada em um anel de altura aproximada de 7cm e diâmetro aproximado de 5 cm. Estas amostras receberam acondicionamento, conforme recomendações do Laboratório de Física do Solo, do Departamento de Solos – Universidade Federal de Lavras e, posteriormente, enviadas a este laboratório para a realização das análises laboratoriais.

4.3.2. Matéria orgânica

As análises para a obtenção dos teores de matéria orgânica do solo foram realizadas no Laboratório de Análises do Solos, do Departamento de Agronomia – Universidade Federal de Uberlândia.

O método adotado foi o de Walkley-Black, usando dicromato de potássio como agente oxidante, conforme procedimentos recomendados por EMBRAPA (1979).

Os dados de matéria orgânica foram obtidos a partir de terra fina seca ao ar (TFSA), tendo sido realizadas as determinações logo após a coleta de campo.

4.3.3. Condutividade hidráulica do solo saturado e infiltração da água no solo

As medidas de infiltração da água no solo e de condutividade hidráulica do solo saturado foram realizadas no campo com o emprego do permeâmetro de fluxo constante (Permeâmetro de Guelph), adotando-se os seguintes procedimentos:

- Em cada ponto de amostragem foi feito um furo com 6 cm de diâmetro e 15 cm de profundidade, com trados apropriados, realizando a operação sempre uma única pessoa, com o objetivo de homogeneizar as condições de fluxo para todos os pontos das malhas.
- Fixaram-se as alturas de coluna de água de 3 e 6 cm para a realização das leituras de fluxo.
- Com o permeâmetro de fluxo constante, foram feitas as leituras de tempo e altura de água no permeâmetro, até leituras aproximadamente constantes com o tempo⁵.

As leituras de fluxos constantes de água no solo foram transformadas em condutividade hidráulica saturada de campo (K_{fs}) por meio da equação proposta por REYNOLDS & ELRICK (1985).

$$Q = \left(\frac{2\pi H^2}{C} + \pi a^2 \right) kfs + \left(\frac{2\pi H}{C} \right) \phi_m \quad (13)$$

em que:

Q é a recarga necessária para manter a altura de água (H) constante ($\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)

H 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

ϕ_m é o fluxo matricial ($\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$) ($\phi_m = K_{fs}/\alpha$)

α é o gradiente de $\ln K$, versus a curva de pressão potencial

O coeficiente de forma C é obtido por uma representação gráfica desenvolvida por ELRICK et al (1987).

A equação é resolvida simultaneamente para condutividade hidráulica de campo e fluxo matricial, utilizando-se duas alturas de água em cada furo. Desta forma, obtêm-se duas equações com duas incógnitas, e resolvendo o sistema têm-se os respectivos valores de K_{fs} e ϕ .

⁵ Estes procedimentos são descritos em detalhes por VIEIRA, S. R. em notas sobre o uso do permeâmetro

A infiltração tridimensional⁵, que representa a permeabilidade do solo definida por REICHARDT (1985), foi obtida usando o fluxo constante do permeâmetro com carga hidráulica de 6 cm, a geometria do orifício e a relação entre volume de água infiltrada e a área molhada do orifício, resultando que:

$$I = 60 \left(\frac{D_p^2}{D_o^2 + 4D_o H_2} \right) Q \quad (14)$$

em que:

- I é a infiltração (mm.h⁻¹)
- D_p é o diâmetro do reservatório do permeâmetro (cm)
- D_o é o diâmetro do orifício (cm)
- H₂ é a segunda carga hidráulica utilizada (6 cm)
- Q é o fluxo constante (mm.min⁻¹)

O valor de I obtido pela equação 14 é uma estimativa da velocidade de infiltração da água no solo sob fluxo tridimensional e, portanto, difere do valor de k_{fs} obtido pela solução da equação 13, que é uma estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado na condição unidimensional e considera as cargas hidráulicas de 3 e 6 cm.

A obtenção dos dados de condutividade hidráulica saturada e infiltração da água no solo sob condições de saturação de campo foi realizada com o uso do software GPM.EXE⁶.

4.3.4. Granulometria

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta, utilizando processos de dispersão adotados pelo Laboratório de Análise de Solos Prof. Newton Roberto Boni, da Faculdade de Engenharia Agrícola - Universidade Estadual de Campinas, sendo a fração areia subdividida em 2 subfrações (areia fina e areia grossa).

As amostras deformadas foram coletadas com enxadão, na camada de 0- 15 cm.

O processo de análise adotado pelo laboratório é descrito a seguir:

⁶ Aplicativo computacional desenvolvido pelo pesquisador Dr. Sidney Rosa Vieira – Seção de Conservação do Solo – IAC

Colocou-se 10,0 g de solo em garrafa de Sthomann com 50 ml de dispersante (10,0 g de hexametáfosfato de sódio por litro de água em solução 0,1 N); agitou-se em aparelho de Wiegner a 40 rpm por 16 horas; transferiu-se a suspensão para uma proveta calibrada de 500 ml, passando por peneira de 0,053 mm; completou-se o volume com água destilada; transferiu-se a areia da peneira para um becker e esta areia foi seca em estufa a 105 °C; separou-se a areia em grossa e fina, utilizando as peneiras de 0,21 e 0,53 mm, respectivamente. O material da proveta foi agitado por 30 segundos e, de acordo com a tabela de temperatura, após um certo tempo fez-se a pipetagem de 10 ml, sendo 10 cm de profundidade argila + silte e 5 cm argila; estas alíquotas foram colocadas em frascos de 20 ml, secas a 105°C e pesadas em balança de precisão. Determinou-se as frações Derterminou-se as frações argila e silte por meio das relações entre os pesos obtidos e o volume da proveta.

Este laboratório considera a diferença entre 100% e a soma das porcentagens de argila, silte e areia, como sendo a fração silte grosso. Neste trabalho adotou-se a fração silte como a somatória das frações silte e silte grosso fornecida pelo análise laboratorial.

4.4. Análises estatísticas

Os dados obtidos para cada variável foram armazenados em planilhas eletrônicas com o posicionamento geográfico de cada amostra. Estes dados foram utilizados na análise estatística, na análise geoestatística e no mapeamento das variáveis.

4.4.1. Análise descritiva e inferências clássicas

Para cada variável realizou-se o cálculo de algumas estatísticas, visando, em associação com os histogramas, caracterizar a distribuição de probabilidade, verificar a variabilidade dos dados e comparar os sistemas de manejo em plantio direto com o sistema convencional, a partir de análise visual. As estatísticas utilizadas nessa metodologia foram:

- Média (\bar{X})

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (15)$$

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

- Variância (s^2)

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1} \quad (16)$$

- Desvio Padrão (s)

$$s = \sqrt{s^2} \quad (17)$$

- Coeficiente de variação (C.V.)

$$CV = \frac{s}{\bar{X}} \times 100 \quad (18)$$

- Coeficiente de Assimetria (Cs)

$$Cs = \frac{m_3}{\sqrt{m_2^3}} \quad (19)$$

em que:

$$m_t = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^t}{n} \quad \text{com } t=1,2,3,\dots \quad (20)$$

- Coeficiente de Curtose (Cc)

$$Cc = \frac{m_4}{m_2^2} \quad (21)$$

Os valores mínimos, máximo e amplitude dos dados também foram obtidos para cada variável. Procedeu-se, em seguida, ao cálculo dos intervalos de confiança de cada variável, em cada sistema de manejo, para inferir sobre a média populacional desses atributos.

Na comparação dos valores médios das variáveis nos sistemas de manejo convencional e em plantio direto utilizou-se o teste de hipóteses, sendo que a hipótese testada foi a não existência de diferença entre os dois sistemas de manejo para os atributos pesquisados.

A normalidade das variáveis foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk, adotando-se a hipótese inicial de que a variável em estudo segue uma distribuição normal. Para as variáveis que apresentaram distribuição não normal, procedeu-se a transformação logarítmica dos dados para verificar se estes seguiam a distribuição log-normal.

4.4.2. Geoestatística

A geoestatística foi utilizada com o objetivo de definir o modelo de variabilidade espacial dos atributos do solo envolvidos na pesquisa. A análise da variabilidade espacial foi feita a partir dos semivariogramas. Para cada variável foram realizados os cálculos das semivariâncias e a representação dos modelos de semivariogramas foi mostrada por meio de gráficos da semivariância γ como função da distância (h).

Os valores das semivariâncias experimentais são obtidos pela equação:

$$\gamma(h) = \frac{\sum [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2}{2N(h)} \quad (22)$$

em que:

γ é a semivariância experimental, obtida pelos valores amostrados $[Z(x_i), Z(x_i+h)]$; h é a distância entre os pontos amostrais e $N(h)$ é o número total de pares possíveis, dentro da malha de amostragem, com a distância h .

O cálculo das semivariâncias para posterior escolha do modelo de semivariograma foi feito por programa computacional de geoestatística desenvolvido por VIEIRA et al (1983).

Os modelos básicos utilizados no ajuste de um modelo teórico às semivariâncias experimentais foram: esférico, exponencial, Gauss e linear (VIEIRA et al 1983). O ajuste do modelo foi realizado utilizando-se o aplicativo computacional EXCEL.

A definição do modelo ajustado às semivariâncias experimentais foi feita visualmente, testando-se diversos modelos pela técnica Jack-Knifing e utilizando-se como critério de seleção

do modelo os parâmetros A, B e R^2 do modelo de regressão, assim como a média e a variância do erro reduzido, conforme descrito por VIEIRA (1995).

Analisou-se também a existência de superfícies de tendências das variáveis e a possibilidade do uso dos resíduos obtidos da diferença entre a superfície de tendência e os valores amostrados, para o ajuste dos semivariogramas e definição da dependência espacial.

A comparação e as inferências entre a variabilidade espacial nas áreas de plantio direto e plantio convencional foi feita a partir dos modelos de semivariogramas estimados, bem como das estimativas dos parâmetros desses modelos, principalmente o efeito pepita e o alcance da dependência espacial.

Após a definição do modelo de semivariograma, foram realizadas interpolações usando o método de krigagem. A estimativa por krigagem segue a seguinte equação:

$$Z^*(x) = \sum \lambda_i Z(x_i) \quad (23)$$

em que:

λ_i são os pesos de cada valor medido; Z é valor medido; e Z^* é o valor estimado através do método de krigagem.

Os pesos λ , que são obtidos pelo método de multiplicadores de Lagrange, associados à equação de estimação e à exigência de que a esperança dos erros seja igual a zero e a variância de estimação seja mínima, faz com que a variância de krigagem seja a menor variância entre todos os processos de interpolação. Em VIEIRA et al (1983) e VIEIRA(1995) encontram-se discussões detalhadas sobre a resolução de sistemas para a obtenção da estimativa de krigagem e a variância de krigagem, assim como os programas computacionais para a realização dessas estimativas.

A malha adotada para a realização da krigagem foi de 1 x 1 m, totalizando 1296 pontos estimados por krigagem.

4.4.3. Correlações

O cálculo de correlações simples e de correlações parciais entre as variáveis condutividade hidráulica saturada e infiltração com a densidade do solo, volume total de poros, microporosidade, macroporosidade, matéria orgânica do solo, argila, silte, areia grossa, areia fina e areia total foi

feito objetivando-se verificar uma possível relação entre estas variáveis, para a utilização de modelos estatísticos nas estimativas de condutividade hidráulica e infiltração.

Este estudo foi feito utilizando os dados, em conjunto, do sistema de manejo convencional e de plantio direto e, também, os dados de cada sistema de manejo isoladamente. Procederam-se ainda transformações de dados e análises gráficas.

As equações para a obtenção das correlações simples, correlações múltiplas e correlações parciais podem ser encontradas em HOFFMAN & VIEIRA (1987).

4.5. Mapeamento dos atributos dos solos

O Sistema de Informação Geográfica SIG-IDRISI foi utilizado para o mapeamento dos atributos do solo nos sistemas de manejo em plantio direto e em plantio convencional. Utilizaram-se os valores obtidos por krigagem para este procedimento.

Os mapas de cada variável, em cada sistema de manejo, foram categorizados para visualização do comportamento espacial dessas variáveis nos dois sistemas de manejo, procedendo-se o cálculo de áreas ocupadas por cada classe.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Análise descritiva, inferências clássicas e análise da variabilidade espacial

5.1.1. Densidade do solo.

5.1.1.1. Análise descritiva e inferências clássicas

O quadro 3 mostra algumas estatísticas da variável densidade do solo (Ds), nos sistemas de manejo em plantio direto (PD) e convencional (PC), em Latossolo Vermelho Escuro argiloso sob cerrado cultivado em rotação soja-milho.

Quadro 3. Estatísticas da densidade do solo (DS) em kg.dm^{-3} , nos sistemas de manejo em plantio direto (PD) e convencional (PC) – Uberlândia – MG – Janeiro/98.

Atributo	\bar{X}	s^2	S	CV	Min.	Max.	Assim	Curt	LI	LS
Ds-PD	1,20	0,00564	0,07509	6,27	1,02	1,39	-0,056	3,01	1,17	1,22
Ds-PC	1,11	0,00620	0,07890	7,12	0,88	1,25	-0,344	2,87	1,08	1,14

\bar{X} - média; s^2 - variância; s - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; Min. - mínimo; Max. - máximo; Assim - coeficiente de assimetria; Curt. - coeficiente de curtose; LI - Limite Inferior do Intervalo de Confiança para a média com $(1-\alpha) = 0,95$; LS - Limite Superior do Intervalo de Confiança para a média com $(1-\alpha) = 0,95$.

Verifica-se que a densidade média no sistema plantio direto apresentou-se com valor superior em relação à do plantio convencional. Por outro lado, a variabilidade, medida pelo CV, foi ligeiramente superior no sistema de manejo convencional e, segundo PIMENTEL GOMES (1985), este valor pode ser considerado baixo.

Os coeficientes de assimetria e curtose indicam tendência à normalidade dessa variável. Resultados semelhantes, com baixa variabilidade e tendência à normalidade de dados, também foram encontrados por SILVA (1989) e GUIMARÃES (1993), entre outros pesquisadores.

O teste de hipótese, com nível de significância de 5%, para a diferença entre média ($Z_{\text{cal}} = 6,61$), mostra que, estatisticamente, ocorre diferença entre os valores médios de densidade do solo nos dois manejos, sendo que no sistema plantio direto a densidade é

superior. Tal resultado está de acordo com a literatura (GRANT & LAFOND, 1993; ANJOS et al, 1994; SECCO et al, 1997; CANALLI & ROLOFF, 1997), que tem demonstrado que, na maioria dos casos, a densidade da camada superficial do solo, no sistema de manejo em plantio direto é superior àquela no sistema convencional.

Na figura 9 é apresentado o histograma, associado ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk da variável densidade do solo. Pela figura, pode se visualizar a distribuição dos valores amostrados, com a tendência à normalidade e a superioridade dos valores de densidade no sistema de manejo em plantio direto. Nota-se, de fato, um comportamento semelhante desse atributo nos dois sistemas de manejo, ocorrendo apenas um deslocamento dos valores em relação ao eixo das abcissas.

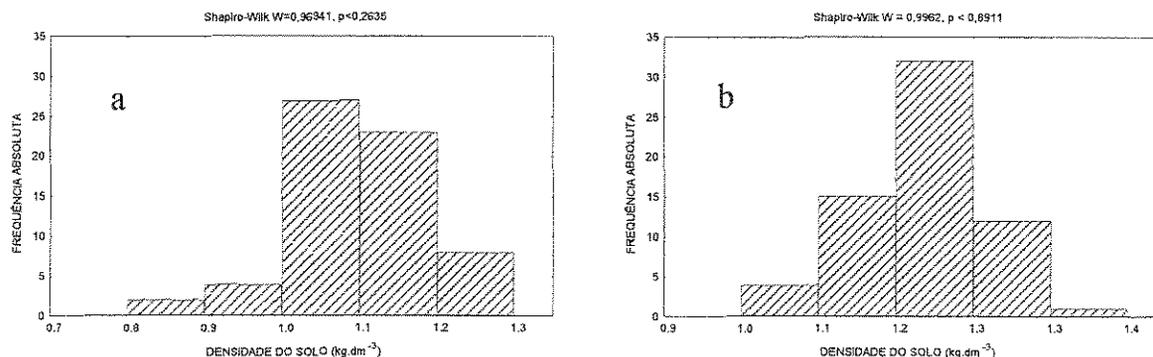


Figura 9. Histograma e teste de normalidade para a densidade do solo nos sistemas de manejo: a) convencional (PC), b) plantio direto (PD). Uberlândia-MG-Janeiro/98.

5.1.1.2. Análise da variabilidade espacial por meio de semivariogramas

Os valores experimentais e os modelos ajustados de semivariogramas para a densidade do solo nos dois sistemas de manejo podem ser visualizados na figura 10.

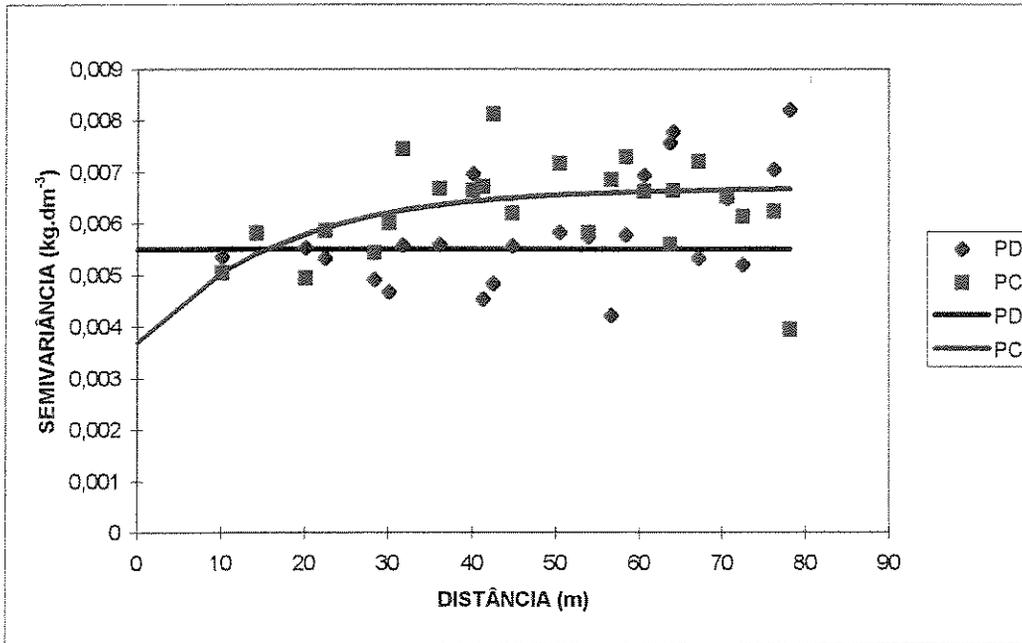


Figura 10. Semivariograma da densidade do solo nos sistemas de manejo convencional (PC) e de plantio direto (PD). Uberlândia - MG - Janeiro/98.

O quadro 4 mostra as estimativas dos parâmetros do modelo ajustado.

Quadro 4. Modelos de semivariogramas ajustados aos dados experimentais de densidade do solo (DS) nos sistemas de manejo em plantio direto (PD) e convencional (PC).

Atributo	Modelo	C_0	C	a	B
Ds-PD	EPP	0,0055	0	-	-
Ds-PC	EXP	0,0037	0,003	50	-

C_0 – Efeito pepita $((\text{kg.d.m}^{-3})^2)$; $C_0 + C$ – patamar $((\text{kg.d.m}^{-3})^2)$; a – alcance (m); B – coeficiente angular; EPP – Efeito pepita puro; EXP – modelo exponencial .

O sistema de manejo em plantio direto não mostrou autocorrelação entre os pontos amostrados; desta forma, ocorreu independência entre as amostras de densidade do solo para distâncias de amostragem maiores ou iguais a 10m.

O modelo exponencial ajustado às semivariâncias experimentais, no sistema de manejo convencional, sugere uma autocorrelação entre as observações até à distância de aproximadamente 50 m.

A dependência espacial entre as amostras no sistema de manejo convencional mostra a existência de semelhanças entre pontos vizinhos, e tais semelhanças devem ser consideradas quando da realização das estimativas de valores não amostrados e mapeamento do atributo.

Trabalhos com os de GUIMARÃES (1993), que encontrou dependência espacial de 70 m para a densidade do solo em um Latossolo Roxo, textura muito argilosa, nas profundidades de 30 e 60 cm e, GONÇALVES e FOLEGATTI (1995), que verificaram ausência de padrão espacial da densidade do solo em uma Terra Roxa Estruturada; 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. Desta forma, 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.

5.1.2. Volume total de poros, microporosidade e macroporosidade

5.1.2.1. Análise descritiva e inferências clássicas

No quadro 5 são apresentadas as estatísticas das variáveis volume total de poros (VTP), microporosidade (micro) e macroporosidade (macro).

Quadro 5. Estatísticas do volume total de poros (VTP) em $m^3.m^{-3}$, microporosidade (MICRO) em $m^3.m^{-3}$ e macroporosidade (MACRO) em $m^3.m^{-3}$, nos sistemas de manejo em plantio direto (PD) e convencional (PC) – Uberlândia – MG – Janeiro/98.

Atributo	\bar{X}	$s^2(x10^{-4})$	$S(x10^{-2})$	CV	Min	Max.	Assim	Curt	LI	LS
VTP-PD	0,557	7,60	2,756	4,9	0,487	0,622	0,088	2,70	0,549	0,568
VTP-PC	0,591	8,58	2,932	5,0	0,537	0,674	0,331	2,89	0,577	0,598
MICRO-PD	0,414	6,06	2,468	6,0	0,339	0,472	-0,665	3,65	0,407	0,422
MICRO-PC	0,371	15,21	3,899	10,5	0,276	0,518	0,596	4,89	0,360	0,386
MACRO-PD	0,143	24,95	4,945	34,5	0,034	0,277	0,423	3,26	0,128	0,160
MACRO-PC	0,220	35,77	5,981	27,3	0,045	0,373	-0,252	3,25	0,194	0,236

\bar{X} - média; s^2 - variância; s - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; Min. - mínimo; Max. - máximo; Assim - coeficiente de assimetria; Curt. - coeficiente de curtose; LI - Limite Inferior do Intervalo de Confiança para a média com $(1-\alpha) = 0,95$; LS - Limite Superior do Intervalo de Confiança para a média com $(1-\alpha) = 0,95$.

Estes resultados mostram variabilidade relativamente baixa para VTP e micro e variabilidade relativamente alta para macro; portanto, a amostragem com a finalidade de determinação da macroporosidade necessita de um número maior de amostras do que a VTP e a micro, mantida a precisão relativa. PATGIRI & BARUAH (1995a), encontraram coeficientes de variação abaixo de 15% para a porosidade total.

Os coeficientes de assimetria e curtose indicam distribuição de probabilidade aproximadamente normal para estas variáveis, pois os valores obtidos a partir da amostra estão contidos nos intervalos sugeridos por JONES (1969), com confiança de 95%.

Os testes de hipóteses para a diferença entre as médias, com valores de Z calculado de -6,64; 7,35 e -7,82, respectivamente, para VTP, Micro e Macro, revelam que existe diferença estatística desses atributos para o sistema de manejo em plantio direto e convencional, considerando o nível de significância de 5%. O VTP e a macroporosidade são estatisticamente superiores no sistema de manejo convencional, e a micro apresenta-se superior no sistema em plantio direto. Pesquisadores como ANJOS et al (1994); CARVALHO et al (1995); SECCO et al (1997), mostraram que a porosidade do solo é afetada significativamente pelo seu uso e manejo, principalmente na camada arável.

Em contradição com os resultados obtidos neste trabalho e verificados também em outras pesquisas como as do autores anteriormente citados, GOLABI et al (1995) verificaram maior volume de macroporos no sistema de plantio direto, quando comparado com o sistema convencional.

Supõe-se que isto ocorra devido ao próprio manejo empregado, pois, na camada superficial, o solo revolvido no sistema de manejo convencional, devido ao preparo do solo, proporcionará um volume maior de macroporos. Já no plantio direto a microporosidade, inclusive mais uniforme que no sistema convencional, proporcionará maior armazenamento de água para a planta.

Os histogramas dessas variáveis (figuras 11, 12 e 13) mostram a tendência de concentração de freqüências próximo a média, com maior dispersão no sistema de manejo convencional.

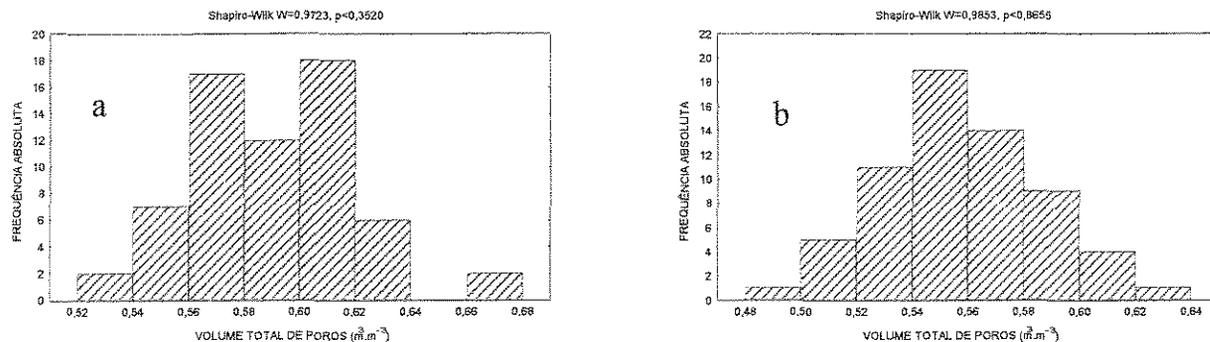


Figura 11. Histograma e teste de normalidade para o volume total de poros, nos sistemas de manejo: a) convencional (PC) e b) plantio direto (PD). Uberlândia -MG- Janeiro/98.

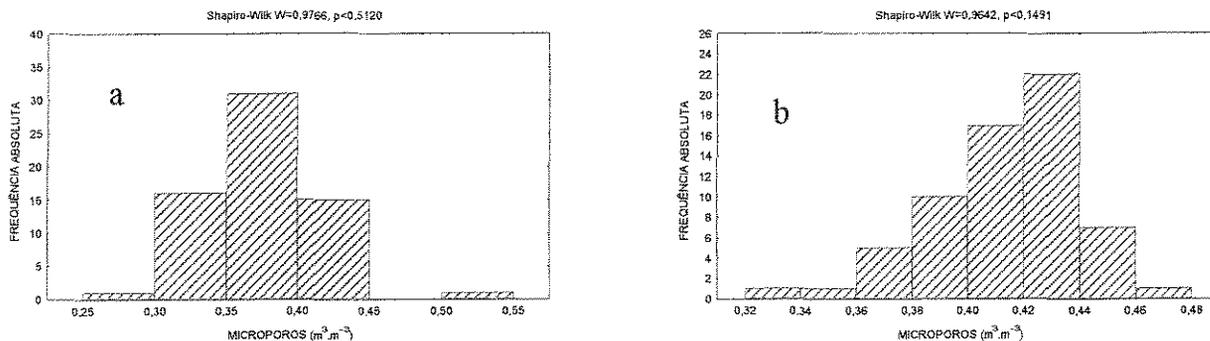


Figura 12. Histograma e teste de normalidade para a microporosidade nos sistemas de manejo : a) convencional (PC) e b) plantio direto (PD). Uberlândia - MG - Janeiro/98.

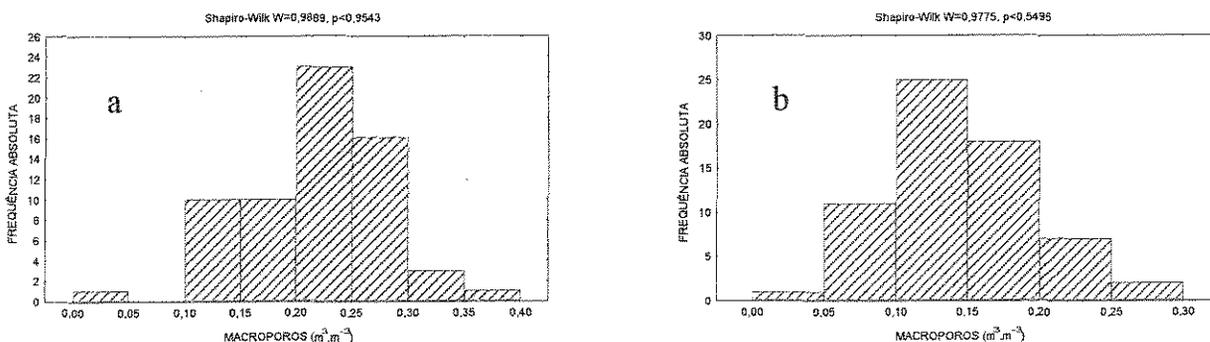


Figura 13. Histograma e teste de normalidade para a macroporosidade nos sistemas de manejo: a) convencional (PC) e b) plantio direto (PD). Uberlândia - MG - Janeiro/98.

5.1.2.2. Análise dos semivariogramas

As semivariâncias experimentais para VTP, micro e macro, no sistema de manejo em plantio direto, revelaram independência entre os pontos amostrados. Para o sistema convencional ajustou-se o modelo esférico para o VTP e para a Macro e o modelo linear sem patamar para a Micro. Estes resultados são apresentados no quadro 6 e nas figuras 14, 15 e 16.

Quadro 6. Modelos de semivariogramas ajustados aos dados experimentais de volume total de poros (VTP), microporosidade (MICRO) e macroporosidade (MACRO), nos sistemas de manejo em plantio direto (PD) e convencional (PC).

Atributo	Modelo	C_0	C	a	B
VTP-PD	EPP	0,00078	0	-	-
VTP-PC	ESF	0,00060	0,00030	45	-
MICRO-PD	EPP	0,00060	0	-	-
MICRO-PC	LSP	0,00095	-	-	0,15
MACRO-PD	EPP	0,00240	0	-	-
MACRO-PC	ESF	0,00197	0,0019	45	-

C_0 - Efeito pepita ($m^3 \cdot m^{-3}$)²; $C_0 + C$ - patamar ($m^3 \cdot m^{-3}$)²; a - alcance (m); B - coeficiente angular; EPP - Efeito pepita puro; ESF - modelo esférico; LSP - modelo linear sem patamar.

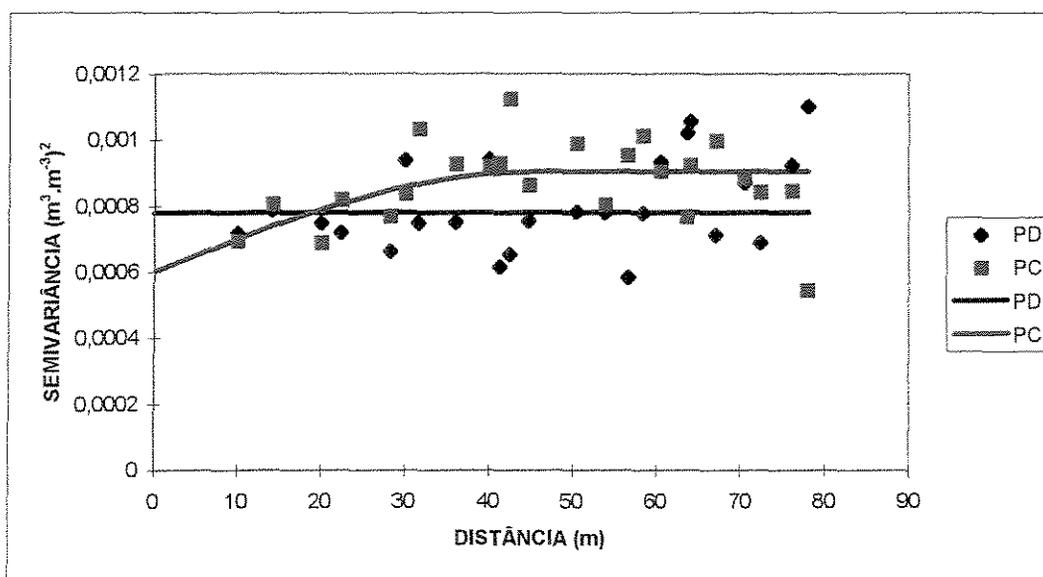


Figura 14. Semivariograma do volume total de poros, nos sistemas de Manejo convencional (PC) e de plantio direto (PD). Uberlândia - MG - Janeiro/98.

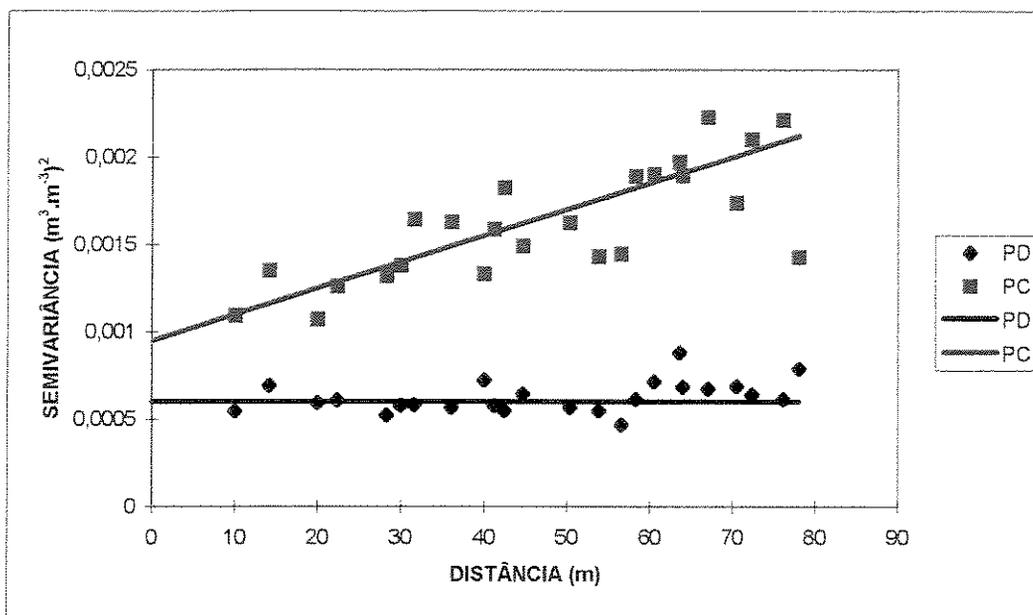


Figura 15. Semivariograma da microporosidade do solo, nos sistemas de manejo convencional (PC) e de plantio direto (PD). Uberlândia-MG–Janeiro/98.

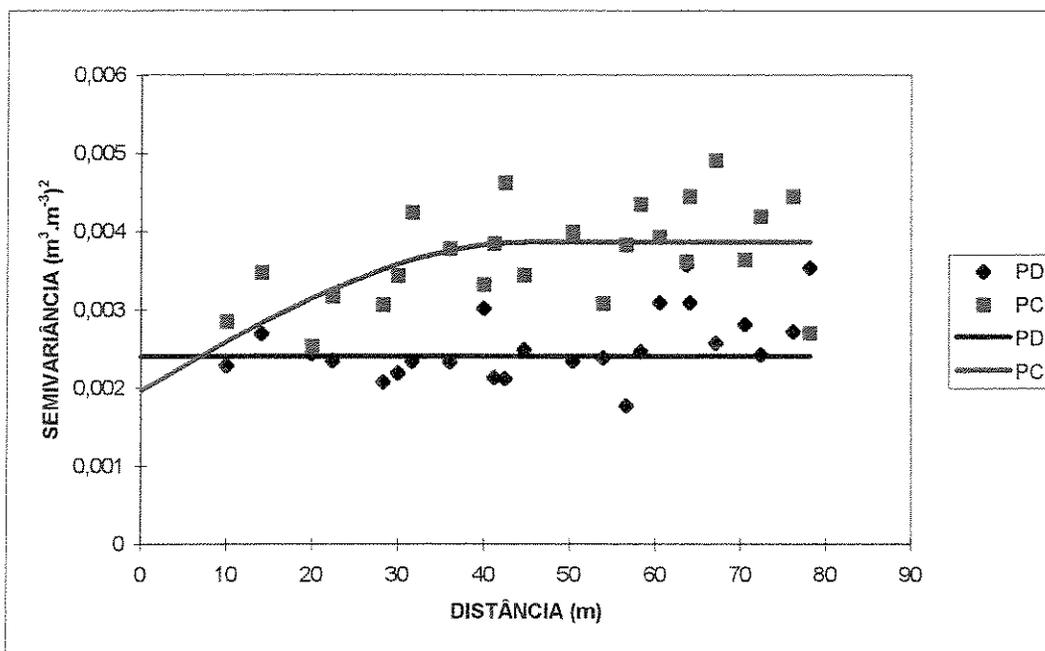


Figura 16. Semivariograma da macroporosidade do solo, nos sistemas de manejo convencional (PC) e de plantio direto (PD). Uberlândia - MG – Janeiro/98.

No sistema de manejo convencional o alcance da dependência espacial para o VTP e a macro foi de 45 m. Já a variável micro mostrou dependência espacial dentro de toda a área

experimental. A remoção de superfície de tendência, conforme sugere VIEIRA (1995), não produziu efeito significativo no modelo de Semivariograma para a microporosidade do solo.

Modelos de semivariogramas para a porosidade total do solo foram ajustados por PATGIRI & BARUAH (1995a) em condições de solo cultivado, mostrando uma baixa variabilidade casual expressa pelo efeito pepita. No presente trabalho verificou-se que, para o volume total de poros e para a macroporosidade, no sistema de manejo convencional, para os quais foram ajustados modelos esféricos, a variabilidade casual contribuiu com mais de 50% da variabilidade expressa pelos modelos e, para o sistema de manejo em plantio direto, toda a variabilidade observada foi atribuída ao acaso.

5.1.3. Matéria Orgânica

5.1.3.1. Análise descritiva e inferências clássicas

Algumas estatísticas da variável quantidade de matéria orgânica no solo são apresentadas no quadro 7.

Quadro 7. Estatísticas da matéria orgânica no solo (MO) em g.kg⁻¹, nos sistemas de manejo em plantio direto (PD) e convencional (PC) – Uberlândia – MG – Janeiro/98.

Atributo	\bar{X}	s^2	S	C.V.	Min.	Max.	Assim	Curt	LI	LS
MO-PC	30,4	20,29	4,505	14,82	20,9	37,3	-0,417	2,06	29,2	32,3
MO-PD	37,5	25,22	5,022	13,40	22,0	48,9	-0,368	3,97	35,3	38,9

\bar{X} - média; s^2 - variância; s - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; Min. - mínimo; Max. - máximo; Assim - coeficiente de assimetria; Curt. - coeficiente de curtose; LI - Limite Inferior do Intervalo de Confiança para a média com $(1-\alpha) = 0,95$; LS - Limite Superior do Intervalo de Confiança para a média com $(1-\alpha) = 0,95$.

Estas estatísticas revelam que a estimativa pontual da matéria orgânica no plantio direto é superior em relação ao sistema de manejo em plantio convencional. Tal fato pode ser comprovado pelo teste de hipóteses para a diferença entre médias, com nível de significância de 5%. O valor estimado da estatística Z foi de -8,42. Resultados semelhantes foram obtidos por PAIVA et al (1997) em área de Latossolo Roxo. Já MUZILLI (1981) e MUZILLI (1983) não verificou diferença significativa para o teor de matéria orgânica entre os dois sistemas de manejo.

Apesar do clima muito quente e úmido na região do cerrado no mês de janeiro, o sistema de manejo em plantio direto revela um teor maior de matéria orgânica no solo do que o sistema convencional, o que pode ser verificado pelas estatísticas mínimo, máximo, média e coeficiente de variação. Isto contribui para manter as condições necessárias para o desenvolvimento da planta.

Verifica-se que a variabilidade desse atributo, medida pelo coeficiente de variação, é praticamente igual nos dois sistemas.

Os coeficientes de assimetria e curtose mostram a tendência à normalidade da variável matéria orgânica. Pode se visualizar o comportamento da variável matéria orgânica, nos dois sistemas de manejo, pela observação da figura 17.

A baixa porcentagem de matéria orgânica nos solos de cerrado está relacionada com o clima da região, onde, principalmente em janeiro, época da realização da amostragem, o clima é quente e úmido, contribuindo para a sua mineralização.

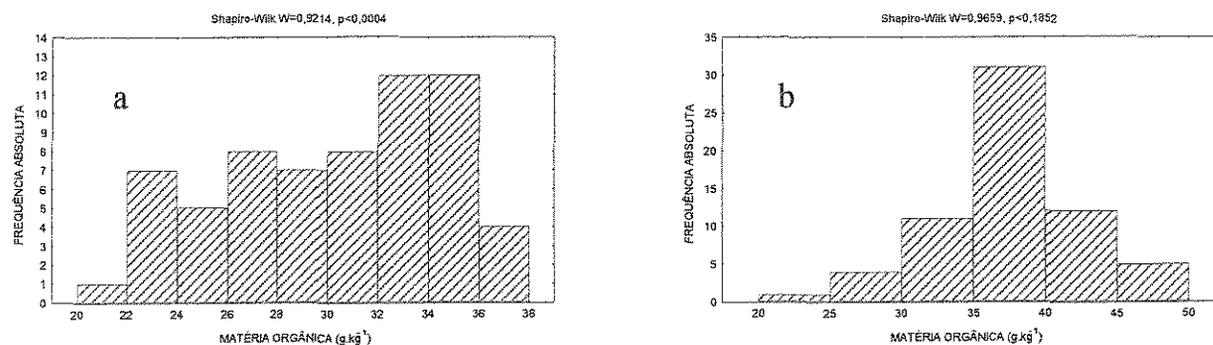


Figura 17. Histograma e teste de normalidade para a matéria orgânica nos sistemas de manejo: a) convencional (PC) e b) plantio direto (PD). Uberlândia - MG- Janeiro/98.

5.1.3.2. Análise dos semivariogramas

O quadro 8 e a figura 18 mostram o comportamento da variabilidade espacial da matéria orgânica nos dois sistemas de manejo.

Quadro 8. Modelos de semivariogramas ajustados aos dados experimentais de matéria orgânica no solo (MO), nos sistemas de manejo em plantio direto (PD) e convencional (PC).

Atributo	Modelo	C_0	C	a	B
MO-PD	EPP	25	0	-	-
MO-PC	ESF	13	8	30	-

C_0 – Efeito pepita ($(\%)^2$); $C_0 + C$ – patamar ($(\%)^2$); A – alcance (m); B – coeficiente angular; EPP – Efeito pepita puro; ESF – modelo esférico

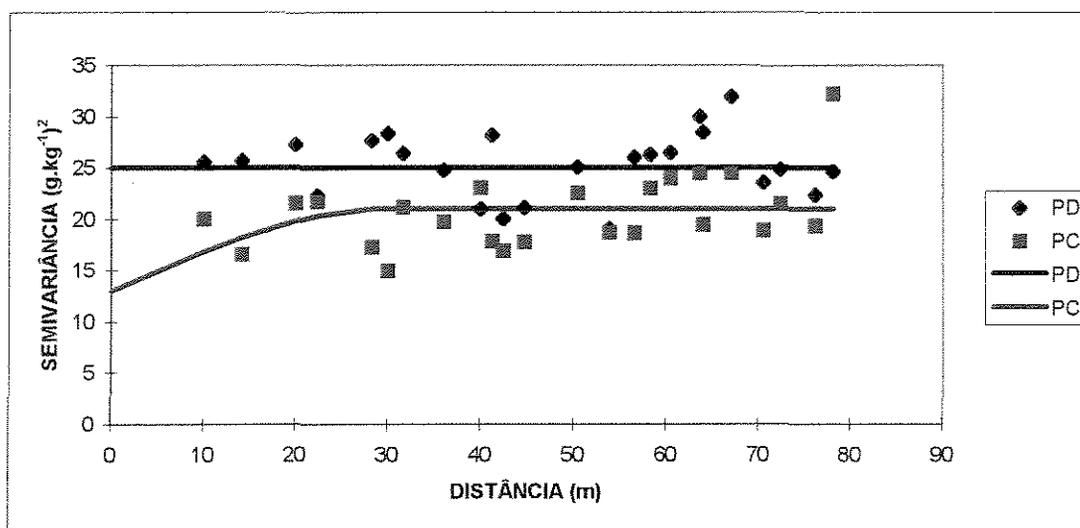


Figura 18. Semivariograma da matéria orgânica, nos sistemas de manejo convencional (PC) e de plantio direto (PD). Uberlândia-MG – Janeiro/98.

A tendência apresentada nas variáveis anteriores para o plantio direto, de independência entre os pontos observados, mantém-se para a matéria orgânica.

Para o plantio convencional, ajustou-se o modelo esférico de variabilidade espacial, com alcance da dependência espacial de 30 m, o que revela a necessidade de inclusão dessa dependência nas estimativas realizadas na área de plantio convencional.

SOUZA et al (1997), para um Latossolo Vermelho Amarelo, textura média, cultivado com citros ajustou modelo de dependência espacial para a matéria orgânica com alcance de 59 m.

5.1.4. Infiltração e condutividade hidráulica do solo saturado

5.1.4.1. Análise descritiva e inferências clássicas

As estatísticas para essas duas variáveis, nos dois sistemas de manejo, são apresentadas no quadro 9.

Verifica-se, pelo valor do CV, que esses atributos apresentaram alta variabilidade, ou seja, existe uma grande dispersão dos valores observados em torno da média aritmética. Esta alta variabilidade pode ser verificada também por meio dos valores extremos (mínimos e máximos) dessas variáveis, apresentados também no quadro 9.

Valores de CV acima de 50% para a condutividade hidráulica são comumente encontrados, como pode ser verificado em CADIMA et al (1980), CARVALHO (1991), HOUSSEINI et al. (1993), VIEIRA (1993), GONÇALVES & FOLEGATTI (1995).

Quadro 9. Estatísticas da infiltração (INF) em mm.h^{-1} e da condutividade hidráulica saturada (Kfs) em m.d^{-1} , nos sistemas de manejo em plantio direto (PD) e convencional (PC) – Uberlândia – MG – Janeiro/98.

Atributo	\bar{X}	s^2	S	C.V.	Min.	Max.	Assim.	Curt	LI	LS
INF-PD	31,58	228,6	15,12	47,88	9,29	72,26	0,976	3,26	26,39	36,77
INF-PC	19,93	168,6	12,98	65,15	3,51	57,81	1,346	4,73	15,47	24,38
Kfs-PD	0,1952	0,04296	0,2073	106,2	0,0082	1,114	2,687	11,6	0,12	0,27
Kfs-PC	0,1331	0,0339	0,1841	138,3	0,0017	0,683	1,939	5,78	0,069	0,196

\bar{X} - média; s^2 - variância; s - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; Min. - mínimo; Max. - máximo; Assim - coeficiente de assimetria; Curt. - coeficiente de curtose; LI - Limite Inferior do Intervalo de Confiança para a média com $(1-\alpha) = 0,95$; LS - Limite Superior do Intervalo de Confiança para a média com $(1-\alpha) = 0,95$.

Os coeficientes de assimetria e curtose revelaram distribuição não normal para essas variáveis. Esta tendência a não normalidade pode, também, ser visualizada nos histograma (figuras 19 e 20).

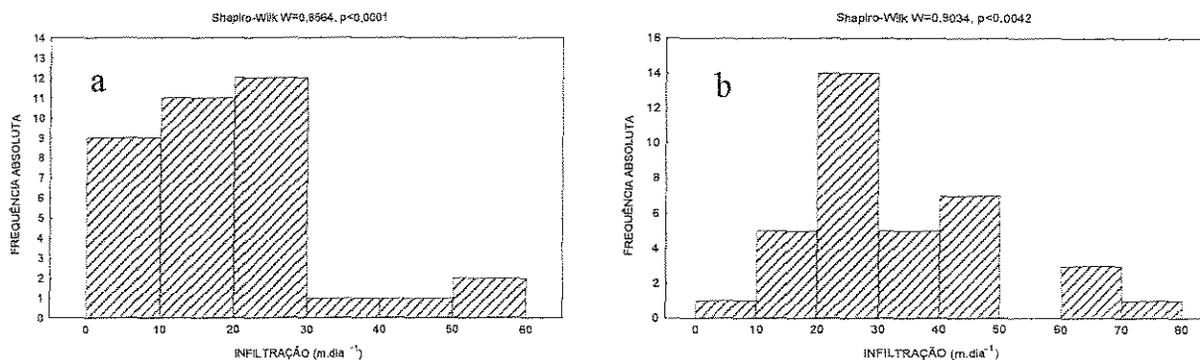


Figura 19. Histograma e teste de normalidade para a infiltração de água no solo nos sistemas de manejo: a) convencional (PC) e b) plantio direto (PD). Uberlândia -MG - Janeiro/98.

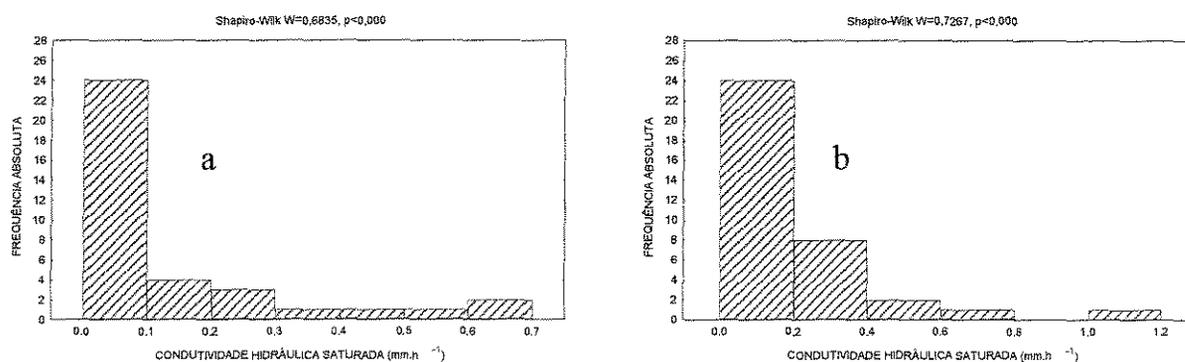


Figura 20. Histograma e teste de normalidade para a condutividade hidráulica saturada de campo nos sistemas de manejo: a) convencional (PC) e b) plantio direto (PD). Uberlândia -MG- Janeiro/98.

A distribuição não normal das variáveis e a alta variabilidade revelada pelo CV, pode induzir a inferências que não condizem com a realidade, e que carecem de precisão.

Analisando as figuras 19 e 20, optou-se pela transformação logarítmica dos valores observados, com o objetivo de verificar se estes atributos se distribuem segundo uma log-normal.

As estatísticas dos dados transformados (quadro 10 e figuras 21 e 22) mostram o comportamento da distribuição após a realização da transformação, observando-se uma tendência à normalidade dos dados.

Quadro 10. Estatísticas dos dados transformados para $\ln(x)$, da infiltração (INF) em mm.h^{-1} e da condutividade hidráulica saturada (Kfs) em mm.dia^{-1} , nos sistemas de manejo em plantio direto (PD) e convencional (PC) – Uberlândia – MG – Janeiro/98.

Atributo	\bar{X}	s^2	S	C.V.	Min.	Max.	Assim.	Curt	LI	LS
INF-PD	3,34	0,225	0,474	14,19	2,23	4,28	0,014	2,61	3,18	3,50
INF-PC	2,78	0,452	0,672	24,13	1,26	4,06	-0,22	2,55	2,56	3,01
Kfs-PD	-2,13	1,271	1,127	52,88	-4,79	0,108	-0,68	3,33	-2,52	-1,75
Kfs-PC	-2,93	2,134	1,461	49,84	-6,38	-0,38	-0,05	2,43	-3,42	-2,44

\bar{X} - média; s^2 - variância; s - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; Min. - mínimo; Max. - máximo; Assim - coeficiente de assimetria; Curt. - coeficiente de curtose; LI - Limite Inferior do Intervalo de Confiança para a média com $(1-\alpha) = 0,95$; LS - Limite Superior do Intervalo de Confiança para a média com $(1-\alpha) = 0,95$.

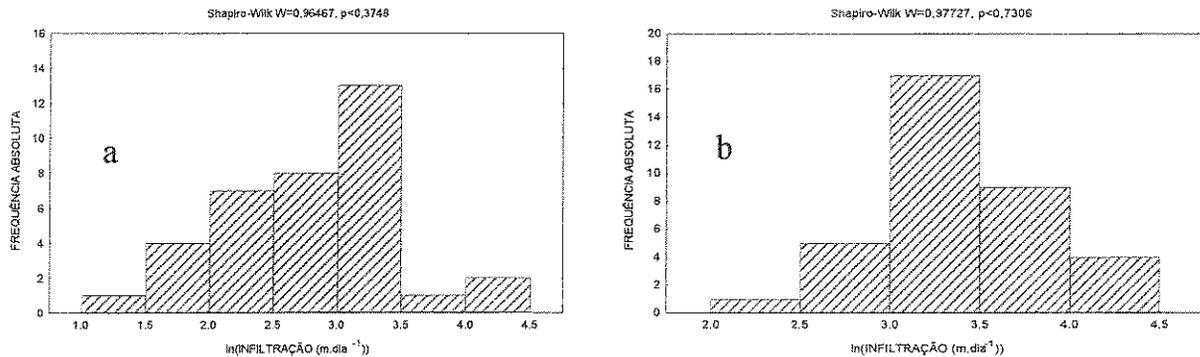


Figura 21. Histograma e teste de normalidade para o \ln (infiltração), nos sistemas de manejo: a) convencional (PC) e b) plantio direto (PD). Uberlândia-MG-Janeiro/98.

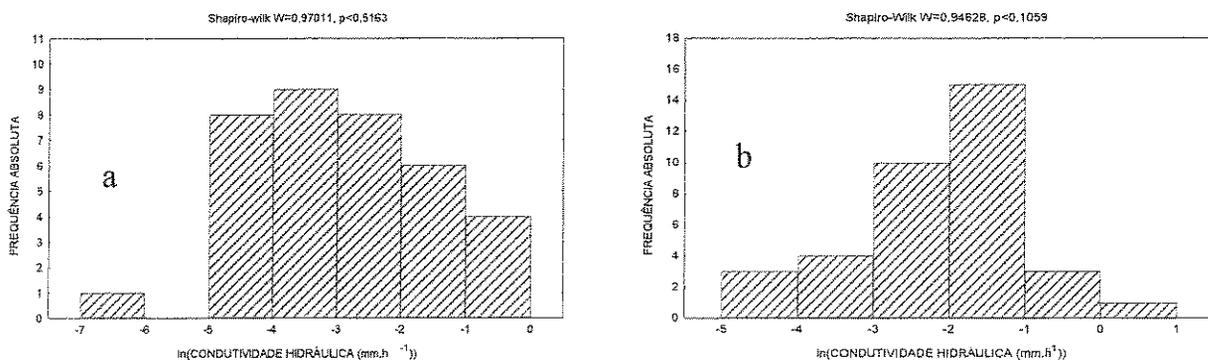


Figura 22. Histograma e teste de normalidade para o \ln (condutividade), nos sistemas de manejo: a) convencional (PC) e b) plantio direto (PD). Uberlândia -MG- Janeiro/98.

O quadro 10 revela uma redução significativa dos valores de CV, mas estes ainda permanecem com valores altos. Os coeficientes de assimetria e curtose mostram que as

variáveis condutividade hidráulica do solo saturado e infiltração de água no solo possuem distribuição de probabilidade que se aproximam da log-normal. Resultados semelhantes foram encontrados, por exemplo, por CARVALHO (1991)

Os testes de normalidade de Shapiro-Wilk confirmam o que foi discutido anteriormente, a respeito da normalidade das variáveis.

É aconselhável que as inferências para variáveis que apresentam distribuição de probabilidade log-normal sejam estabelecidas a partir da média geométrica, e não pela média aritmética.

As estimativas por ponto da média geométrica da infiltração foram de 28,22 mm/h e 16,11 mm/h, respectivamente para o plantio direto e plantio convencional. Para a condutividade hidráulica saturada obtiveram-se estimativas pontuais de média geométrica de 0,118 m/dia e 0,0534 m/dia, nos sistemas em plantio direto e convencional, respectivamente, mostrando diferenças significativas entre os dois sistemas de manejo.

Teste de hipóteses para a diferença entre as médias transformadas revelam que, tanto a infiltração, quanto a condutividade hidráulica saturada, são superiores para o sistema de plantio direto ($Z = 4,08$ para a infiltração e $Z = 2,60$ para a condutividade hidráulica saturada). Este fato revela que o sistema de manejo em plantio direto proporcionou uma maior capacidade do solo em conduzir a água, e pode ser visualizado em épocas de chuvas intensas e intermitentes, quando se observa acúmulo de água na superfície do solo cultivado em sistema convencional.

Estimativas de condutividade hidráulica saturada e infiltração, estatisticamente superiores para o plantio direto em relação ao sistema de plantio convencional, pode estar relacionado com o fato deste atributo sofrer grande influência da porosidade do solo, da matéria orgânica e da estruturação do solo, conforme argumentam CADIMA et al. (1980), JABRO (1992), WAGER & DENTON (1989). É de se esperar que no plantio direto as condições gerais dos atributos do solo esteja mais próximo das condições naturais que no plantio convencional.

5.1.4.2. Análise dos semivariogramas

Os modelos ajustados de semivariogramas para a condutividade hidráulica do solo saturado e para a infiltração encontram-se no quadro 11 e figuras 23 e 24.

Quadro 11. Modelos de semivariogramas ajustados aos dados experimentais de infiltração de água no solo (INF) em mm.h^{-1} e de condutividade hidráulica do solo saturado (Kfs) em m.dia^{-1} , nos sistemas de manejo em plantio direto (PD) e convencional (PC).

Atributo	Modelo	C_0	C	A	B
INF – PD	EPP	230	0	-	-
INF – PC	GAUSS	30	140	20	-
Kfs – PD	EPP	0,04	0	-	-
Kfs – PC	EXP	0,008	0,03	50	-

C_0 – Efeito pepita; $C_0 + C$ – patamar; a – alcance ; B – coeficiente angular; EPP – Efeito pepita puro; EXP – modelo exponencial; GAUSS – modelo de Gauss

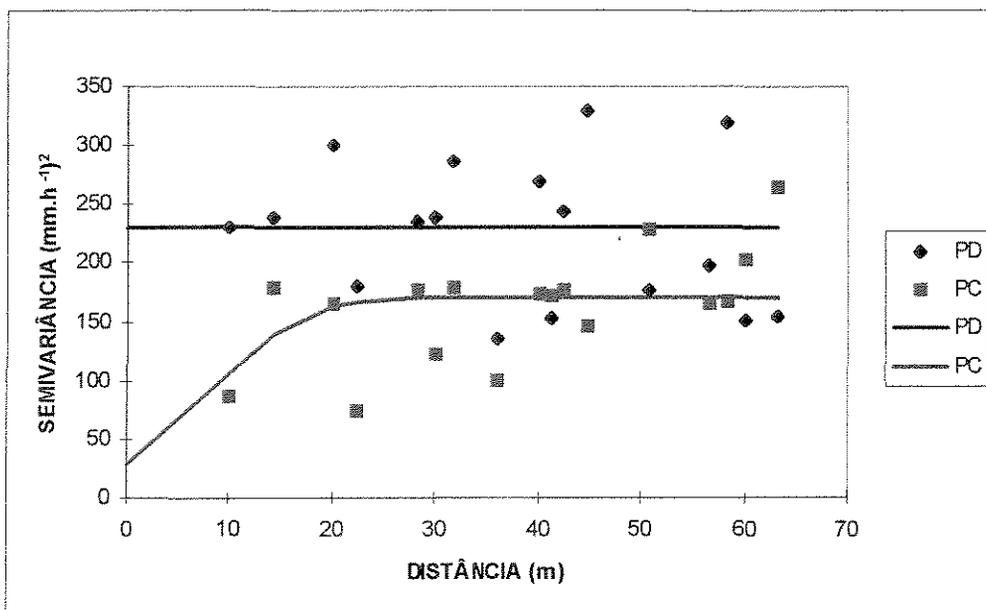


Figura 23. Semivariograma da infiltração de água no solo, nos sistemas de manejo convencional (PC) e de plantio direto (PD). Uberlândia-MG – Janeiro/98.

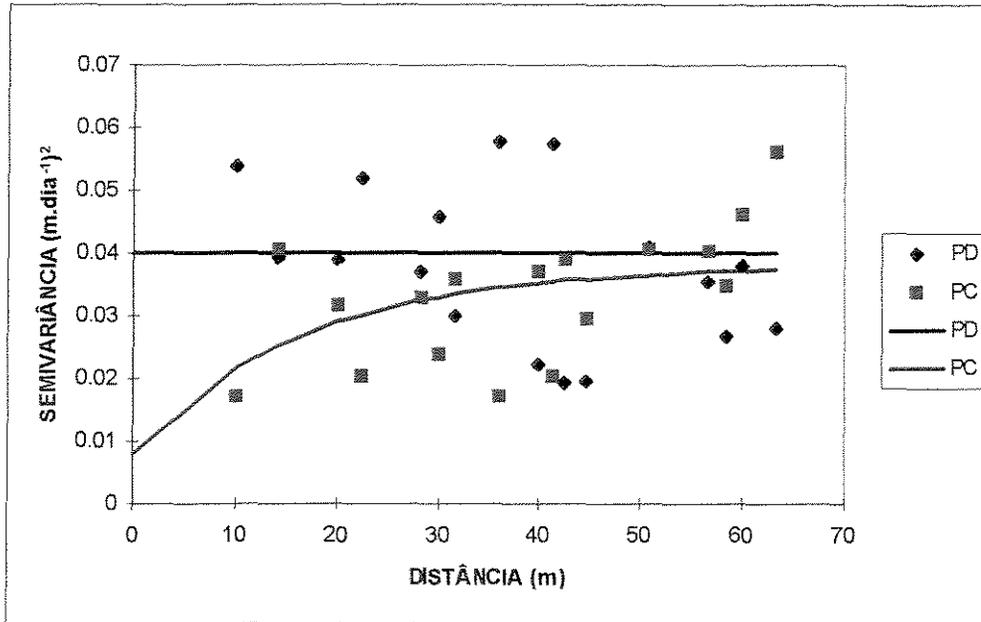


Figura 24. Semivariograma da condutividade hidráulica do solo saturado, nos sistemas de manejo convencional (PC) e de plantio direto (PD). Uberlândia-MG – Janeiro/98.

Para o sistema de manejo em plantio direto, optou-se pelo ajuste do semivariograma com efeito pepita puro. Este modelo indica que as amostras das variáveis infiltração da água no solo e condutividade hidráulica do solo saturado são independentes para distâncias superiores a 10 m.

No sistema de manejo convencional os semivariogramas apresentaram estrutura de variabilidade espacial, ajustando-se o modelo de Gauss no plantio direto e o modelo exponencial no plantio convencional. Os alcances de 20 e 50 m, respectivamente, para a infiltração e para a condutividade hidráulica, mostram que inferências a respeito dessas variáveis, devem considerar além do sistema de manejo empregado, também a variação espacial desses atributos.

Devido a alta variabilidade desses atributos, verificou-se que as semivariâncias experimentais também apresentaram grande dispersão, dificultando o ajuste do modelo teórico. Esta variabilidade sugere a necessidade de realização de amostragens a pequenas

distâncias (menos de 10 m entre pontos) para verificar a dependência espacial. Ou seja, neste trabalho, pode-se verificar que a distância máxima de autocorrelação entre amostras foi de 50 m. VIEIRA (1993) e MOHANTY et al (1994) argumentam que a variabilidade entre os pontos amostrados afetam o semivariograma, ocorrendo casos de não ser possível o ajuste de modelos teóricos às semivariâncias estimadas.

5.1.5. Argila, silte, areia fina, areia grossa e areia total

5.1.5.1. Análise descritivas e inferências clássicas

O quadro 12 mostra algumas estatísticas das variáveis argila (ARG), silte (SIL), areia fina (AF), areia grossa (AG) e areia total (AT), respectivamente, para o plantio direto (PD) e Convencional (PC).

Nota-se, como era esperado e devido a ponderações feitas por KIEHL (1979), HILLEL (1980), entre outros físicos de solos, que essas frações granulométricas, apresentam valores médios estatisticamente iguais para os dois sistemas de manejo. Este fato pode ser verificado pela sobreposição dos limites dos intervalos de confiança de 95%, para todas as frações granulométricas.

As frações granulométricas são atributos que raramente sofrem influências do manejo do solo e quando isso ocorre, as transformações são observadas em uma longa escala de tempo.

A dispersão relativa dessas variáveis, medida pelo coeficiente de variação (CV), foi relativamente baixo. A exceção ocorreu para o silte e para a areia fina; esses valores relativamente altos podem estar associados à própria metodologia de determinação das frações granulométricas e a possível formação de pseudo partículas.

Pode se visualizar também uma tendência de variabilidades mais altas para o plantio convencional em relação ao plantio direto. Tal fato pode estar associado a uma seleção de material mais grosseiro (areias) em determinados pontos da área, devido ao sistema de aração e gradagem, provocando maior heterogeneidade no sistema de manejo convencional, ou ainda à formação de pseudo-partículas.

Quadro 12. Estatísticas da argila (ARG) em g.kg⁻¹, do silte (SIL) em g.kg⁻¹, da areia fina (AF) em g.kg⁻¹, da areia grossa (AG) em g.kg⁻¹ e da areia total (AT) em g.kg⁻¹, nos sistemas de manejo em plantio direto (PD) e convencional (PC) – Uberlândia – MG – Janeiro/98.

Atributo	\bar{X}	s ²	S	C.V.	Min.	Max.	Assim.	Curt	LI	LS
ARG-PD	589,8	4452	66,73	11,31	460,0	700,0	-0,22	1,71	574,3	616,8
ARG-PC	560,8	2276	47,71	8,507	460,0	650,0	-0,02	2,08	545,7	581,5
SIL-PD	199,4	2511	50,11	25,13	110,0	330,0	0,383	2,47	178,9	208,9
SIL-PC	202,2	1720	41,48	20,51	120,0	300,0	0,085	2,607	188,0	215,9
AF-PD	109,2	322	17,93	16,42	80,0	150,0	0,251	2,04	102,6	114,6
AF-PC	122,3	549	23,43	19,15	90,0	210,0	1,567	5,74	112,7	127,8
AG-PD	101,3	138	11,75	11,60	80,0	130,0	0,633	2,88	97,1	105,6
AG-PC	114,4	625	24,99	21,85	80,0	230,0	2,188	9,32	105,0	122,2
AT-PD	210,5	760	27,57	13,10	160,0	270,0	0,359	2,12	200,4	219,5
AT-PC	238,3	2202	46,92	19,69	170,0	400,0	1,616	5,579	219,1	248,7

\bar{X} - média; s² - variância; s - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; Min. - mínimo; Max. - máximo; Assim - coeficiente de assimetria; Curt. - coeficiente de curtose; LI - Limite Inferior do Intervalo de Confiança para a média com (1- α) = 0,95; LS - Limite Superior do Intervalo de Confiança para a média com (1- α) = 0,95.

Os coeficientes de assimetria e curtose mostram que, principalmente no sistema de manejo em plantio convencional, a fração areia tende a destoar da distribuição normal.

As figuras 25, 26, 27, 28 e 29 mostram os histogramas e os testes de normalidade das frações granulométricas.

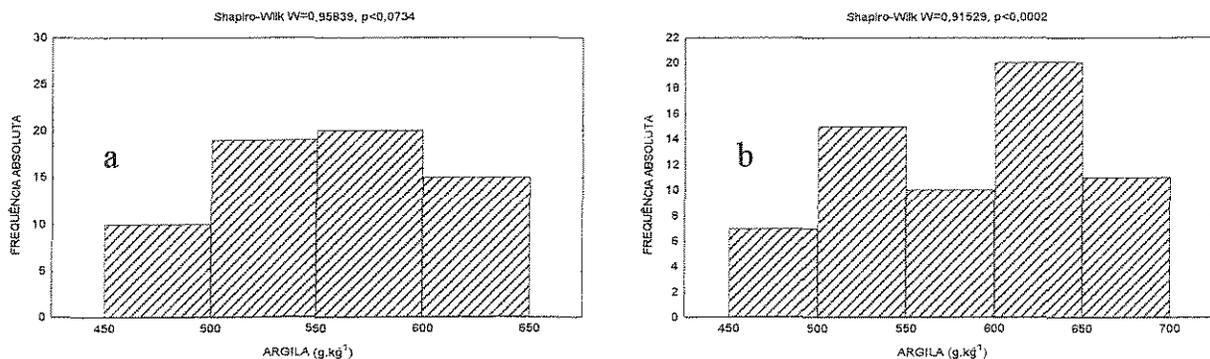


Figura 25. Histograma e teste de normalidade para a argila, nos sistemas de manejo: a) convencional (PC) e b) plantio direto (PD). Uberlândia-MG- Janeiro/98.

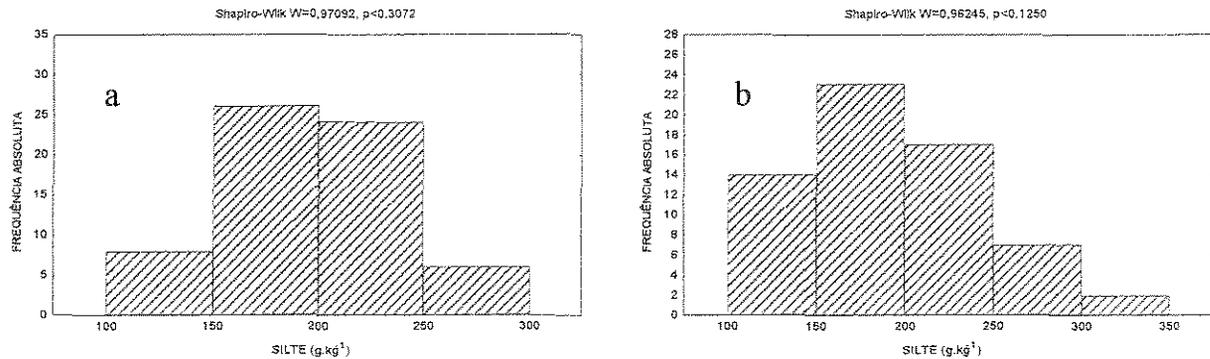


Figura 26. Histograma e teste de normalidade para o silte, nos sistemas de manejo: a) convencional (PC) e b) plantio direto (PD). Uberlândia-MG- Janeiro/98.

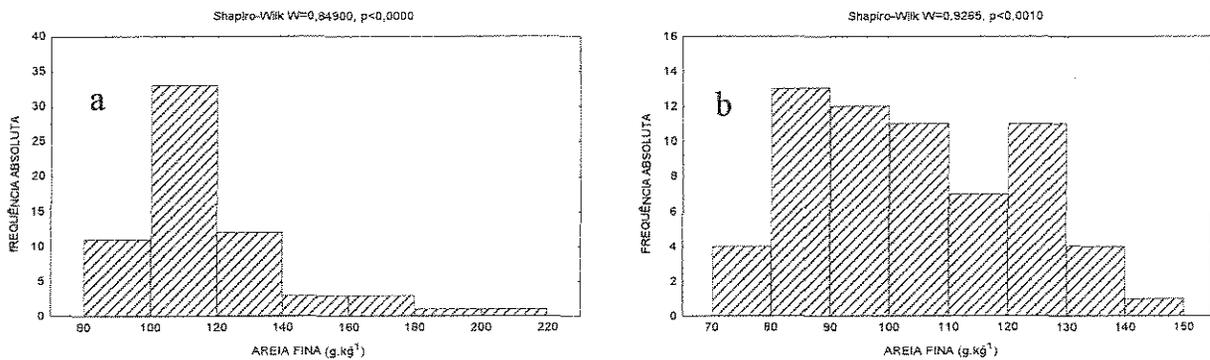


Figura 27. Histograma e teste de normalidade para areia fina, nos sistemas de manejo: a) convencional (PC) e b) plantio direto (PD). Uberlândia-MG- Janeiro/98

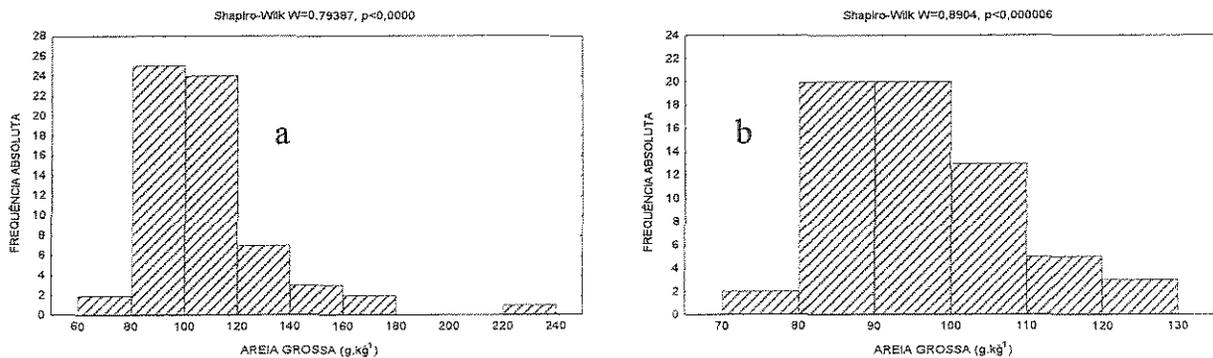


Figura 28. Histograma e teste de normalidade para areia grossa, nos sistemas de manejo: a) convencional (PC) e b) plantio direto (PD). Uberlândia-MG- Janeiro/98

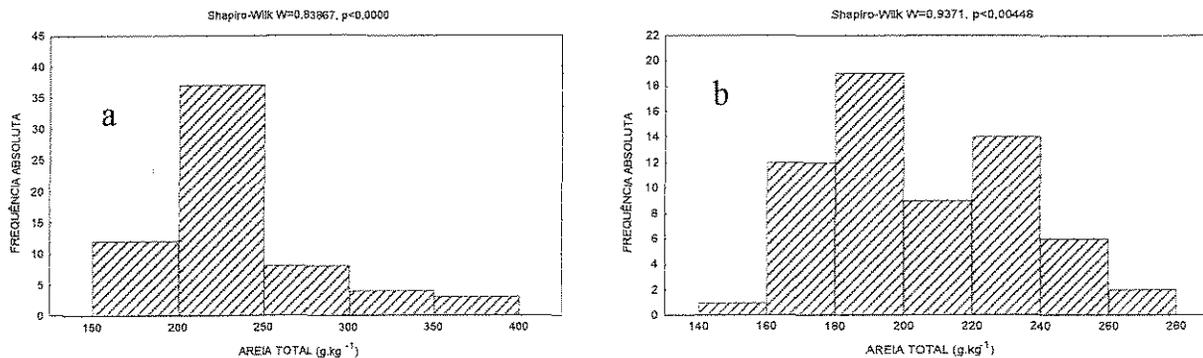


Figura 29. Histograma e teste de normalidade para areia total, nos sistemas de manejo: a) convencional (PC) e b) plantio direto (PD). Uberlândia-MG- Janeiro/98

5.1.5.2. Análise dos semivariogramas

Os semivariogramas ajustados às semivariâncias experimentais das frações granulométricas encontram-se no quadro 13 e figuras 30, 31, 32, 33 e 34.

Nota-se uma grande diversidade nos modelos de semivariogramas ajustados para as variáveis relacionadas com a granulometria. Este fato mostra que, apesar do valor médio dos atributos, serem estatisticamente iguais, no plantio direto e no plantio convencional o sistema de manejo pode influenciar a estrutura de dependência espacial.

Verifica-se que ocorreu uma diversificação de modelos, principalmente na fração areia. Novamente, salienta-se o fato de que esta diversificação pode estar associada ao sistema de aração e gradagem.

Quadro 13. Modelos de semivariogramas ajustados aos dados experimentais argila (ARG) em g.kg^{-1} , silte (SIL) em g.kg^{-1} , areia fina (AF) em g.kg^{-1} , areia grossa (AG) em g.kg^{-1} e areia total (AT) em g.kg^{-1} , nos sistemas de manejo em plantio direto (PD) e convencional (PC).

Atributo	Modelo	C_0	C	a	B
ARG-PD	ESF	30	17	40	-
ARG-PC	ESF	18	5	30	-
SIL-PD	ESF	20	6	40	-
SIL-PC	ESF	12	5,7	40	-
AF-PD	ESF	1,9	1,7	35	-
AF-PC	EXP	0,8	3,5	40	-
	LIN	1,7	-	-	0,155
AG-PD	EPP	1,5	-	-	-
AG-PC	EXP	2,5	4,5	60	-
AT-PD	EPP	8	0	-	-
AT-PC	LIN	12	-	-	0,25

C_0 – Efeito pepita; $C_0 + C$ – patamar; a – alcance ; B – coeficiente angular; EPP – Efeito pepita puro; EXP – modelo exponencial; ESF – modelo esférico; LIN – modelo linear sem patamar

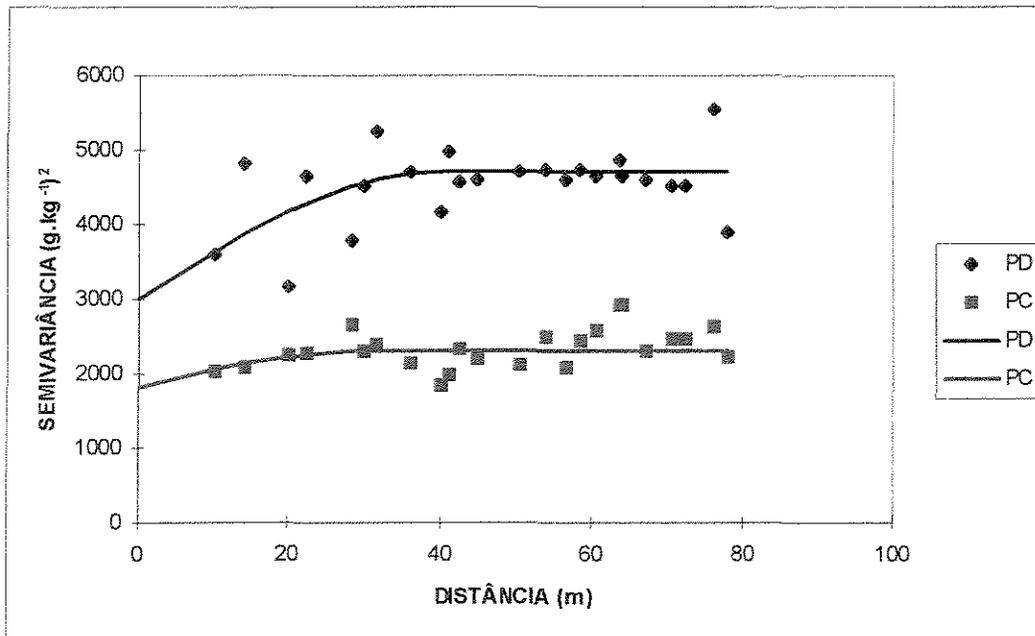


Figura 30. Semivariograma da argila, nos sistemas de manejo convencional (PC) e de plantio direto (PD). Uberlândia - MG – Janeiro/98.

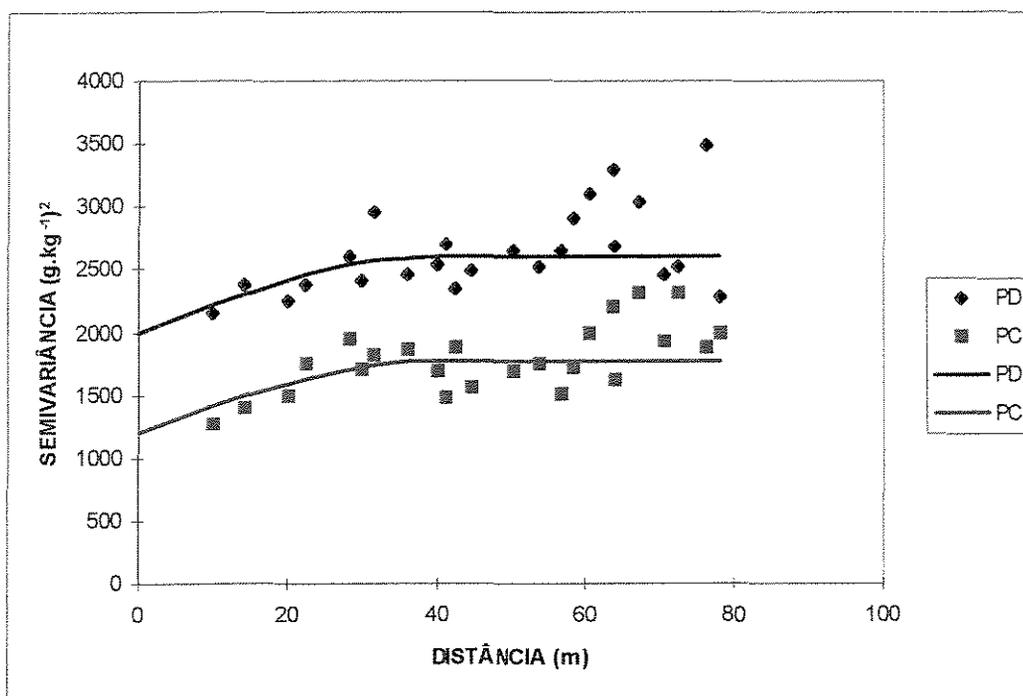


Figura 31. Semivariograma do silte, nos sistemas de manejo convencional (PC) e de plantio direto (PD). Uberlândia - MG – Janeiro/98.

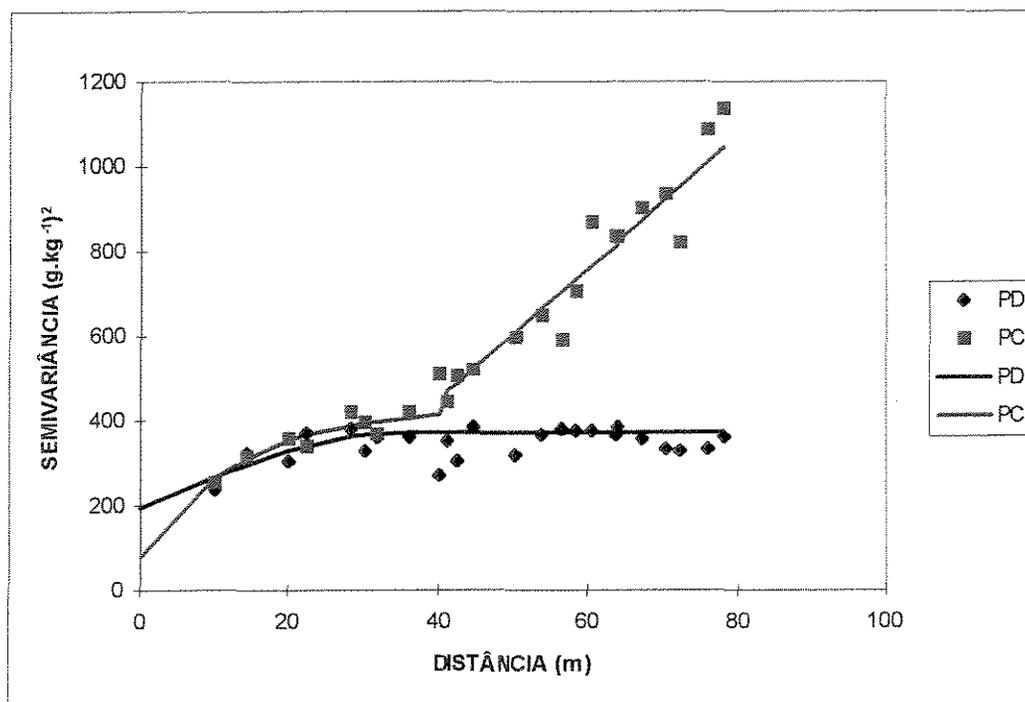


Figura 32. Semivariograma da areia fina, nos sistemas de manejo convencional (PC) e de plantio direto (PD). Uberlândia - MG – Janeiro/98.

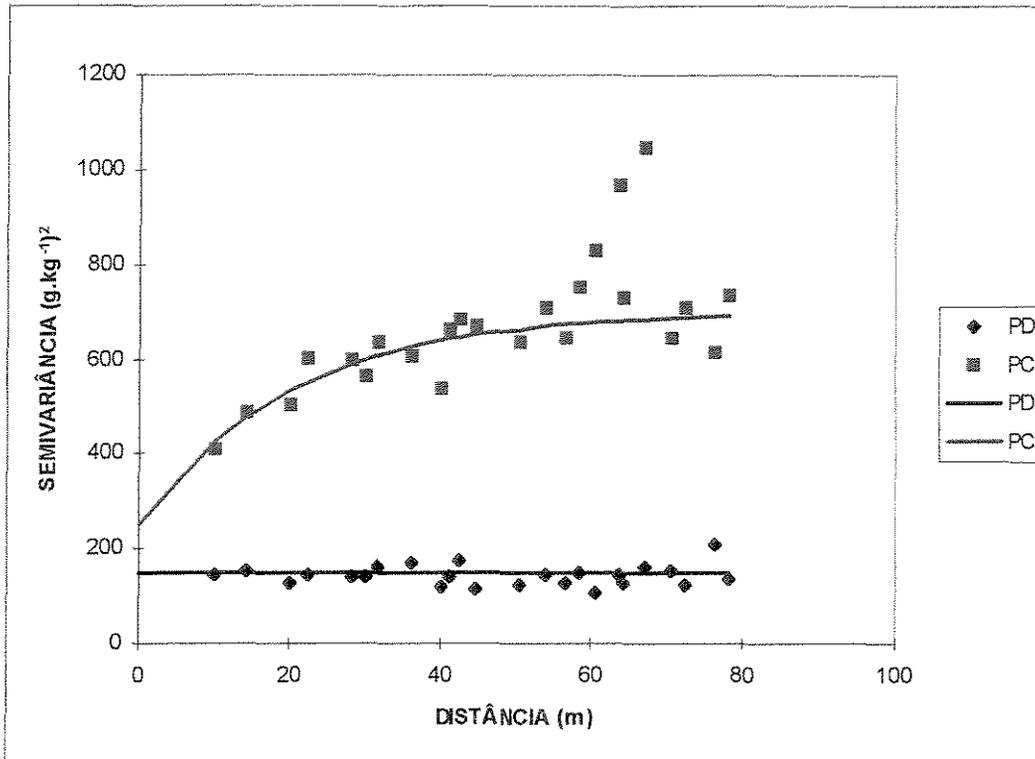


Figura 33. Semivariograma da areia grossa, nos sistemas de manejo convencional (PC) e de plantio direto (PD). Uberlândia - MG – Janeiro/98.

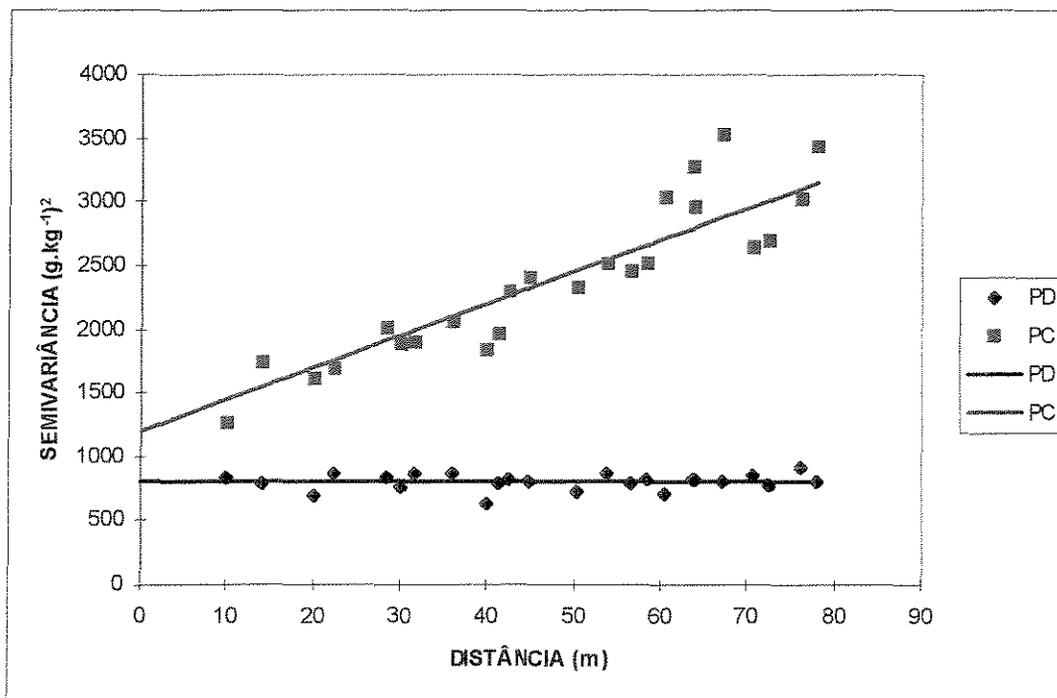


Figura 34. Semivariograma da areia total, nos sistemas de manejo convencional (PC) e de plantio direto (PD). Uberlândia - MG – Janeiro/98.

Os diversos modelos ajustados aos dados experimentais das frações granulométrias mostram a necessidade de se considerar a dependência espacial dessas variáveis, quando da realização de estimativas e de inferências estatísticas, mesmo que teoricamente os valores médios destes atributos não sofram modificações com o tempo ou com o manejo adotado.

Comparando os resultados deste trabalho com os obtidos por outros pesquisadores (SILVA (1988), GONÇALVEZ & FOLEGATTI (1995), VIEIRA (1997), SOUZA et al. (1997)), nota-se que as frações granulométricas dos solos apresentam grande diversidade de comportamento espacial não só em relação ao manejo, mas também em relação ao tipo de solo 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.

5.2 Observações gerais quanto à estatística descritiva

De maneira geral, verificam-se diferenças significativas entre os valores médios das variáveis nos dois sistemas de manejo, exceto para as frações granulométricas, onde se esperava que o sistema de manejo não exercesse influência.

A variabilidade, medida pelo CV, é, em geral, maior no sistema de manejo convencional. Este fato revela que as estimativas das médias, com erros e confiâncias pré-definidos, exigem um número maior de amostras para o sistema de manejo convencional, quando comparado com o sistema em plantio direto.

Os histogramas revelam que, no geral, o comportamento das variáveis nos dois sistemas de manejo se assemelham. Ocorre, na maioria dos casos, um deslocamento dos dados de plantio convencional em relação ao plantio direto (eixo das abcissas), mostrando que o sistema de manejo influenciou nos valores dos atributos, mas não na distribuição de probabilidades dessas variáveis.

Os teste de normalidade de Shapiro-Wilk, significativo em alguns casos, como para infiltração e condutividade hidráulica do solo saturado, revelam a não normalidade dessas

variáveis; porém após a transformação logarítmica dos dados experimentais, notou-se normalidade dos dados.

5.3. Observações gerais quanto aos semivariogramas

As semivariâncias experimentais revelaram que, à exceção das frações granulométricas, todos os outros atributos apresentaram independência entre amostras para distâncias superiores a 10 m no sistema em plantio direto. Assim, no sistema de manejo em plantio direto os vizinhos que estão distanciados a mais de 10 m entre si não estão autocorrelacionados e, portanto, os pontos amostrados nessa área terão influência igual nas estimativas, ou seja, os pesos (λ_i) do estimador de krigagem terão os mesmos valores.

No sistema de manejo convencional observaram-se diferentes modelos, com diferentes estimativas de parâmetros dos modelos para as variáveis pesquisadas.

A variabilidade espacial de alguns atributos dos solos é influenciada pelo tipo de manejo adotado pelo agricultor, ressaltando a importância do conhecimento desse comportamento espacial na tomada de decisões agrícolas e na agricultura de precisão, principalmente nos solos de cerrado, que são naturalmente pobres física e quimicamente.

As frações granulométricas apresentaram comportamentos diferenciados das demais variáveis e também entre os dois sistemas de manejo. Isto pode estar ocorrendo devido a influência do sistema de manejo na variação espacial dessas frações.

A argila e o silte apresentaram o modelo esférico, tanto no sistema convencional como no plantio direto. O alcance foi diferenciado nos dois sistemas, e no sistema convencional a maior parte da variabilidade (aproximadamente 78%) pode ser atribuída aos fatores do acaso (efeito pepita puro).

Verifica-se ainda, em geral, altos valores de efeito pepita (C_0) em relação ao patamar (C_0+C). Não raro encontram-se valores acima de 0,50 ou próximos a 0,50 da relação $C_0/(C_0+C)$, o que revela a alta variabilidade que os solos de cerrado possuem a pequenas distâncias, e a necessidade de se buscarem técnicas que preservem tais solos para a agricultura.

Para as variáveis que apresentaram o modelo linear sem patamar, procedeu-se à tentativa de remoção de tendência e ajuste de semivariogramas pelo resíduos. Este procedimento não revelou ganho significativo no ajuste do modelo; desta forma, optou-se por trabalhar com os dados originais.

5.4. Correlações da condutividade hidráulica do solo com as demais variáveis

No quadro 14 são apresentadas as correlações simples entre a condutividade hidráulica do solo saturado e a densidade do solo, o volume total de poros, a microporosidade, a macroporosidade, a matéria orgânica, a argila, o silte, a areia fina, a areia grossa e a areia total. Neste caso foram utilizados todos os dados, ou seja, desconsiderou-se o sistema de manejo.

Quadro 14. Correlações simples entre a condutividade hidráulica do solo saturado (Kfs) e a densidade do solo (Ds), volume total de poros (VTP), microporos (MICRO), macroporos (MACRO), matéria orgânica (MO), argila (ARG), silte (SIL), areia fina (AF), areia grossa (AG) e areia total (AT).

VAR	Ds	VTP	MICRO	MACRO	MO	ARG	SIL	AF	AG	AT
Kfs	0,086 p=0,52	-0,088 p=0,53	0,073 p=0,55	-0,087 p=0,52	0,087 p=0,52	0,155 p=0,19	-0,166 p=0,16	-0,004 p=0,97	-0,086 p=0,52	-0,049 p=0,68
Ln(Kfs)	0,136 p=0,25	-0,138 p=0,25	0,266 p=0,02	-0,2233 p=0,06	0,182 p=0,12	0,245 p=0,04	-0,159 p=0,18	-0,126 p=0,29	-0,242 p=0,04	-0,199 0,089

Verifica-se que antes da transformação dos dados experimentais de condutividade hidráulica, nenhuma das variáveis pesquisadas possuía correlação linear significativa com aquela variável. Após a transformação logarítmica dos valores de condutividade, observou-se relação linear significativa das variáveis microporos, argila e areia grossa com a condutividade, apesar de os valores de coeficientes de correlação terem sido muito baixos (inferiores a 0,5).

Devido aos baixos valores das correlações mostradas no quadro 14, o modelo de regressão múltipla, pelo método de “Stepwise”, apresentou-se não significativo, demonstrando a impossibilidade de se estimar a condutividade hidráulica saturada a partir de um modelo linear múltiplo.

No quadro 15 são apresentadas as correlações entre as variáveis, considerando-se os sistemas de manejo isoladamente.

Quadro 15. Correlações simples entre a condutividade hidráulica do solo saturado (Kfs) e a densidade do solo (Ds), volume total de poros (VTP), microporos (MICRO), macroporos (MACRO), matéria orgânica (MO), argila (ARG), silte (SIL), areia fina (AF), areia grossa (AG) e areia total (AT), nos sistema de manejo em plantio direto (PD) e convencional (PC).

PLANTIO DIRETO										
VAR	Ds	VTP	MICRO	MACRO	MO	ARG	SIL	AF	AG	AT
Kfs	0,098 p=0,58	-0,103 p=0,56	-0,028 p=0,86	-0,046 p=0,78	0,253 p=0,13	0,121 p=0,51	-0,134 p=0,56	-0,024 p=0,88	-0,077 p=0,66	-0,049 p=0,77
Ln(Kfs)	0,126 p=0,53	-0,1267 p=0,53	-0,053 p=0,76	-0,048 p=0,77	0,372 p=0,02	0,244 p=0,15	-0,261 p=0,12	-0,107 p=0,54	-0,139 p=0,57	-0,129 p=0,54
PLANTIO CONVENCIONAL										
VAR	Ds	VTP	MICRO	MACRO	MO	ARG	SIL	AF	AG	AT
Kfs	-0,062 p=0,72	0,061 p=0,72	-0,010 p=0,95	0,038 p=0,82	0,328 p=0,05	0,115 p=0,51	-0,18 p=0,30	0,10 p=0,56	-0,028 p=0,87	0,034 p=0,83
Ln(Kfs)	-0,082 0,64	0,076 p=0,66	0,21 p=0,21	-0,092 p=0,59	-0,286 p=0,09	0,129 p=0,54	-0,040 p=0,81	0,009 p=0,96	-0,185 p=0,28	-0,111 p=0,52

Verifica-se que a tendência de valores relativamente baixos para os coeficientes de correlação é mantida. Apenas a matéria orgânica, neste caso, apresentou correlação significativa, mas com o coeficiente de correlação máximo de 0,372. Na prática um modelo de regressão linear ajustado para essas variáveis não estimaria valores condizentes com a realidade; desta forma, optou-se por não ajustar o modelo de regressão linear a esses dados.

Supõe-se que a ausência de correlação entre a condutividade hidráulica do solo e os demais atributos esteja associada à alta variabilidade da condutividade e à baixa amplitude de variação das demais variáveis, para este tipo de solo.

A análise dos gráficos de dispersão da variável condutividade hidráulica do solo saturado, em relação às demais variáveis, mostrou que não ocorreram tendências, lineares ou não lineares nesses gráficos, ou seja, também não é possível o ajuste de modelos não lineares com tais variáveis.

5.5. Mapas de atributos do solo

Selecionaram-se as variáveis densidade do solo, microporos, macroporos, matéria orgânica e condutividade hidráulica do solo saturado, nos dois sistemas de manejo, para o mapeamento da área experimental, utilizando valores obtidos através da krigagem.

5.5.1. Densidade do solo

A figura 35 mostra a distribuição dos valores de densidade do solo na área experimental, nos dois sistemas de manejo.

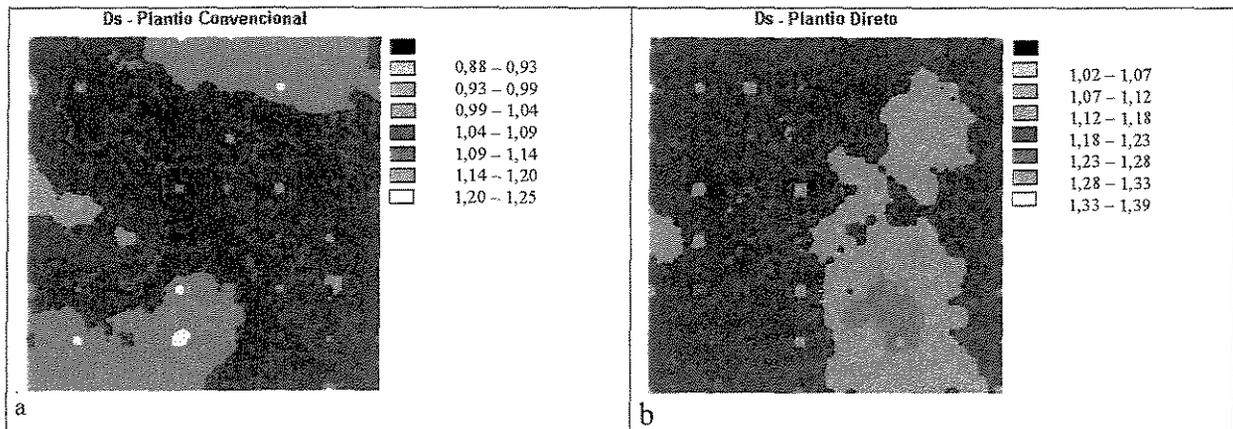


Figura 35. Mapas de densidade do solo ($\text{kg}\cdot\text{dm}^{-3}$) nos sistemas de manejo: a) plantio convencional e b) plantio direto

Nota-se, pelo mapa que no plantio direto a maior parte da densidade do solo encontra-se entre $1,18 \text{ kg}\cdot\text{dm}^{-3}$ e $1,23 \text{ kg}\cdot\text{dm}^{-3}$. Para o plantio convencional ocorre uma distribuição mais proporcional entre os três grupos compreendidos entre $1,04 \text{ kg}\cdot\text{dm}^{-3}$ e $1,20 \text{ kg}\cdot\text{dm}^{-3}$.

Pelo quadro 16 pode-se observar a distribuição porcentual das áreas relativas às classes de densidades dos mapas da figura 35.

Quadro 16. Distribuição percentual das classes de densidade do solo (D_s) em $\text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$, nos sistemas de manejo em plantio direto e convencional.

PLANTIO DIRETO		PLANTIO CONVENCIONAL	
D_s ($\text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$)	ÁREA (%)	D_s ($\text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$)	ÁREA (%)
1,02 – 1,07	0,09	0,88 – 0,93	0,02
1,07 – 1,12	3,28	0,93 – 0,99	0,06
1,12 – 1,18	26,03	0,99 – 1,04	2,72
1,18 – 1,23	68,36	1,04 – 1,09	37,55
1,23 – 1,28	2,14	1,09 – 1,14	34,87
1,28 – 1,33	0,09	1,14 – 1,20	24,36
1,33 – 1,39	0,01	1,20 – 1,25	0,41

5.5.2. Microporos

A figura 36 mostra a distribuição da microporosidade do solo, nos dois sistemas de manejo.

Verifica-se que no plantio convencional a maior concentração de microporos concentra-se na faixa de $0,346 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ a $0,381 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ e no plantio direto, a maior concentração desse atributo está na faixa de $0,396 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ e $0,434 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

A distribuição percentual das faixas de microporosidade do solo visualizadas na figura 35 é apresentada no quadro 17.

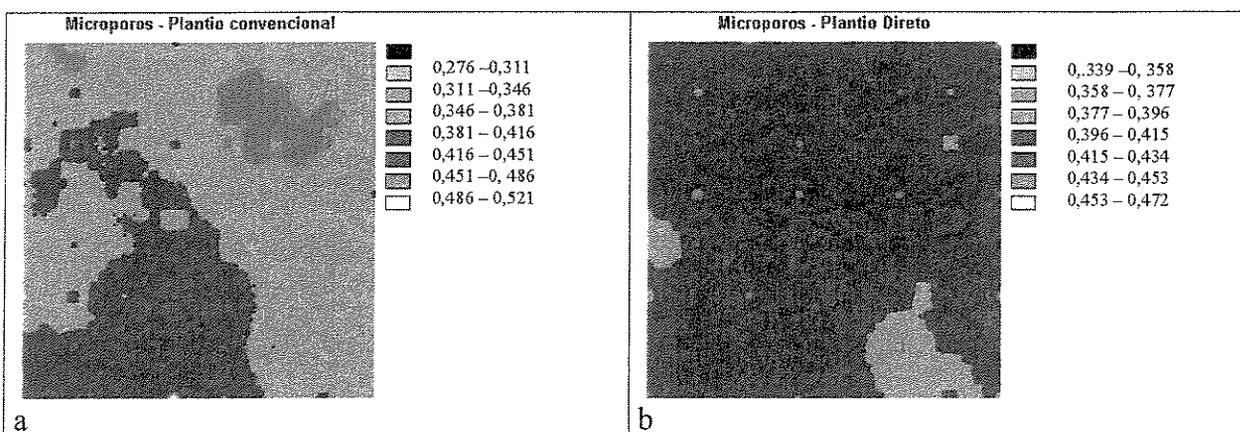


Figura 36. Mapas da microporosidade ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) nos sistemas de manejo: a) plantio convencional e b) plantio direto

Quadro 17. Distribuição porcentual das classes de microporos no solo (Micro) em $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$, nos sistemas de manejo em plantio direto e convencional.

PLANTIO DIRETO		PLANTIO CONVENCIONAL	
Micro ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)	ÁREA (%)	Micro ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)	ÁREA (%)
0,339 – 0,358	0,04	0,276 – 0,311	0,03
0,358 – 0,377	0,11	0,311 – 0,346	6,91
0,377 – 0,396	7,18	0,346 – 0,381	63,25
0,396 – 0,415	46,31	0,381 – 0,416	24,34
0,415 – 0,434	46,14	0,416 – 0,451	5,41
0,434 – 0,453	0,20	0,451 – 0,486	0,04
0,453 – 0,472	0,01	0,486 – 0,521	0,01

5.5.3. Macroporos

Para a variável macroporos, observa-se concentração de valores nas classes compreendidas entre $0,185 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ a $0,279 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ e $0,118 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ a $0,149 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$, respectivamente, para o plantio convencional e para o plantio direto, como mostram a figura 37 e o quadro 18.

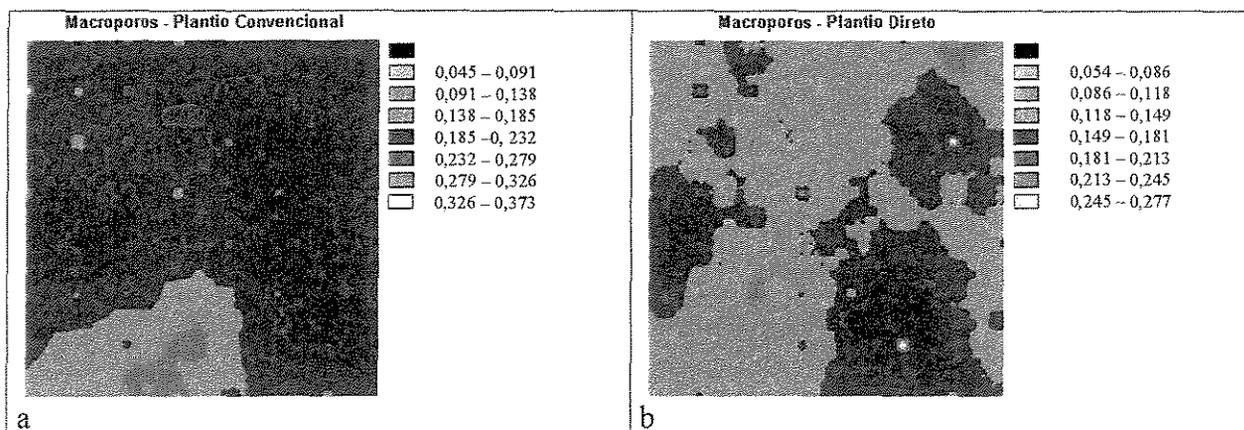


Figura 37. Mapas da macroporosidade ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$) nos sistemas de manejo: a) plantio convencional e b) plantio direto

Quadro 18. Distribuição porcentual das classes de macroporos no solo (Macro) em $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$, nos sistemas de manejo em plantio direto e convencional.

PLANTIO DIRETO		PLANTIO CONVENCIONAL	
Macro ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)	ÁREA (%)	Macro ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)	ÁREA (%)
0,054 – 0,086	0,05	0,045 – 0,091	0,02
0,086 – 0,118	1,72	0,091 – 0,138	2,56
0,118 – 0,149	60,48	0,138 – 0,185	12,56
0,149 – 0,181	30,71	0,185 – 0,232	45,54
0,181 – 0,213	6,83	0,232 – 0,279	39,09
0,213 – 0,245	0,15	0,279 – 0,326	0,20
0,245 – 0,277	0,05	0,326 – 0,373	0,02

5.5.4. Matéria orgânica

Visualiza-se na figura 38 e no quadro 19 que, grande parte da área experimental, sob sistema de manejo em plantio convencional possuía teor de matéria orgânica entre $28,1 \text{ g.kg}^{-1}$ e $32,9 \text{ g.kg}^{-1}$; sob sistema em plantio direto observa-se que apenas 14,68% da área estava com menos de $33,4 \text{ g.kg}^{-1}$ de matéria orgânica.

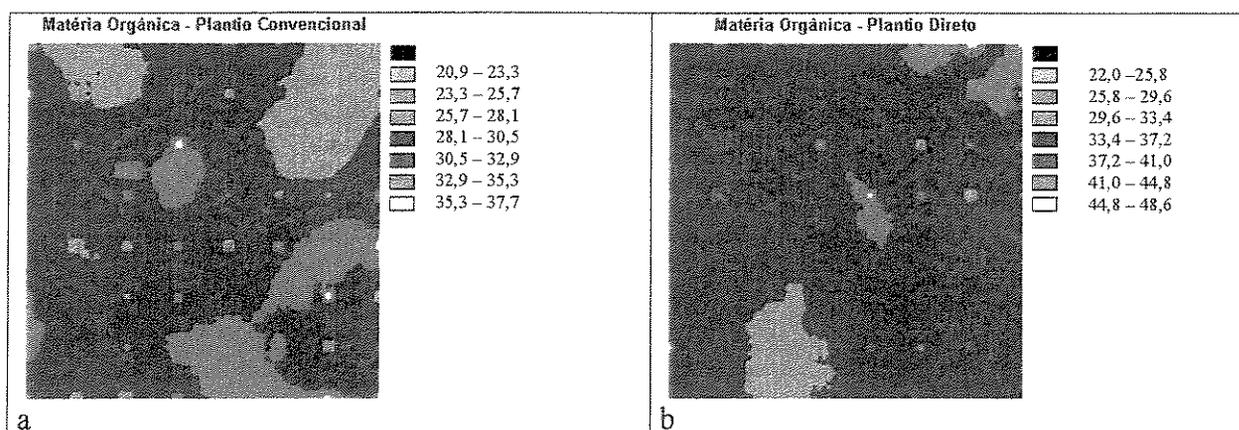


Figura 38. Mapas da Matéria Orgânica (g.kg^{-1}), nos sistemas de manejo: a) plantio convencional e b) plantio direto

Quadro 19. Distribuição porcentual das classes de matéria orgânica no solo (MO) em g.kg^{-1} , nos sistemas de manejo em plantio direto e convencional.

PLANTIO DIRETO		PLANTIO CONVENCIONAL	
MO (g.kg^{-1})	ÁREA (%)	MO (g.kg^{-1})	ÁREA (%)
22,0 – 25,8	0,02	20,9 – 23,3	0,04
25,8 – 29,6	0,11	23,3 – 25,7	0,38
29,6 – 33,4	5,61	25,7 – 28,1	14,27
33,4 – 37,2	51,12	28,1 – 30,5	31,68
37,2 – 41,0	38,65	30,5 – 32,9	39,10
41,0 – 44,8	4,40	32,9 – 35,3	14,40
44,8 – 48,6	0,07	35,3 – 37,7	0,13

5.5.5. Condutividade hidráulica

Os mapas de condutividade hidráulica saturada (figura 39) mostram uma grande diferença dessa variável entre os dois sistemas de manejo. Nota-se que para o sistema de manejo em plantio convencional 51,10% da área possuía condutividade hidráulica inferior a 0,099 m.dia⁻¹, e apenas 20,84% estava sendo ocupada com uma condutividade hidráulica entre 0,1967 m.dia⁻¹ e 0,3916 m.dia⁻¹, conforme mostra o quadro 20; já no plantio direto, observa-se que 91,93% da área experimental estava sendo ocupada com condutividades entre 0,1006 m.dia⁻¹ e 0,2856 m.dia⁻¹.

A disparidade nos mapas, não só da condutividade hidráulica, mas também dos outros atributos, revela a necessidade de se adotarem práticas conservacionistas diferenciadas nos solos de cerrado, dependendo do manejo adotado pelo agricultor.

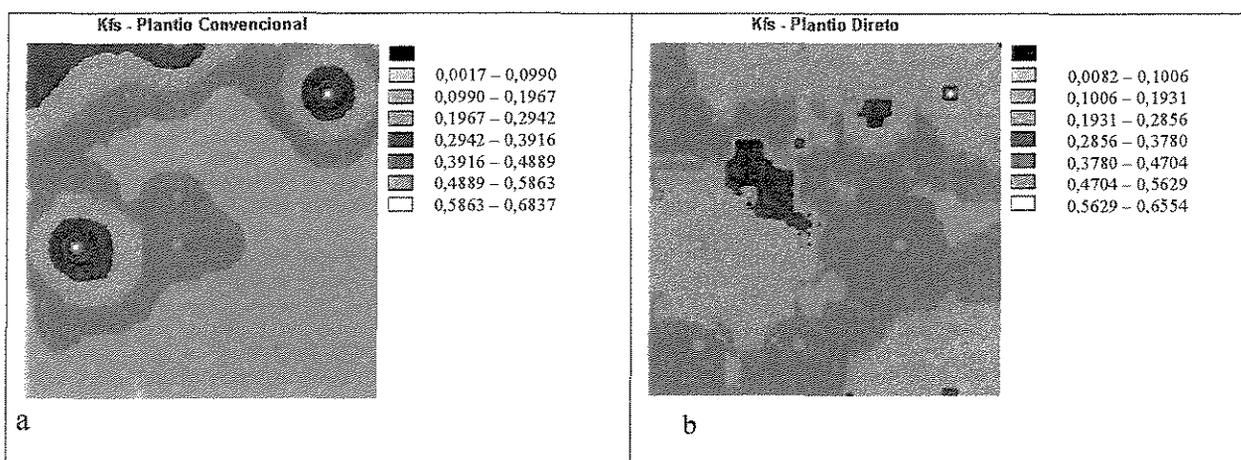


Figura 39. Mapas da condutividade hidráulica do solo saturado (kfs) em m.dia⁻¹, nos sistemas de manejo: a) Plantio Convencional e b) Plantio Direto

Quadro 20. Distribuição porcentual das classes de condutividade hidráulica do solo saturado (kfs) em m.dia⁻¹, nos sistemas de manejo em plantio direto e convencional.

PLANTIO DIRETO		PLANTIO CONVENCIONAL	
Kfs (m/dia)	ÁREA (%)	Kfs (m/dia)	ÁREA (%)
0,0082 – 0,1006	4,01	0,0017 – 0,0990	51,10
0,1006 – 0,1931	43,92	0,0990 – 0,1967	26,88
0,1931 – 0,2856	48,01	0,1967 – 0,2942	13,88
0,2856 – 0,3780	3,95	0,2942 – 0,3916	6,96
0,3780 – 0,4704	0,70	0,3916 – 0,4889	0,98
0,4704 – 0,5629	0,03	0,4889 – 0,5863	0,16
0,5629 – 0,6554	0,01	0,5863 – 0,6837	0,04

5.6. Aplicações e recomendações

O conhecimento da variabilidade espacial dos atributos dos solos contribuem para a realização de estimativas e de mapas desses atributos, buscando-se a maior precisão nas estimativas.

O modelo de variabilidade espacial pode ser aplicado nos sistemas de informações geográficas e na agricultura de precisão. Utilizando o cruzamento de informações como mapas de atributos físicos e químicos dos solos, características das culturas e variedades, produção/produktividade, sistema de manejo, climatologia, incidência de doenças e pragas agrícolas, entre outras características, espera-se que a variabilidade espacial contribua com as decisões agrícolas e com o melhor aproveitamento do recursos solo e água.

Este estudo foi feito apenas na camada superficial do solo (0-15 cm), em pequenas áreas experimentais (4900 m² cada uma), somente com um tipo de solo (Latosolo Vermelho Escuro) e os resultados não foram relacionados à produção na área. Recomenda-se que futuros estudos relacionem a variabilidade espacial de atributos físicos e químicos dos solos com a produção da cultura, com o relevo, com as profundidades de amostragem e, ainda, que estudos sejam realizados em grandes áreas comerciais.

6. CONCLUSÕES

- As variáveis densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, porosidade total e condutividade hidráulica saturada, foram diferentemente influenciadas pelos sistemas de manejo aplicados ao Latossolo Vermelho Escuro argiloso.
- As frações granulométricas (areia, silte e argila) não apresentaram diferenças estatísticas entre os dois sistemas de manejo utilizados nas áreas experimentais, indicando ser este um atributo bastante fixo no solo, pouco dependente do uso e manejo a que ele é submetido, considerando-se o valor médio.
- Os sistemas de manejo induziram respostas diferenciadas na variabilidade espacial da maioria dos atributos do solo. A autocorrelação entre os valores observados se fez presente, com maior intensidade, no sistema de manejo convencional.
- Nas condições da pesquisa, a condutividade hidráulica do solo saturado não apresentou correlação com os demais atributos (densidade do solo, matéria orgânica, macroporos, microporos, volume total de poros e frações granulométricas), tendo, portanto, impossibilitado a construção de um modelo estatístico para a realização de estimativas de condutividade saturada em função daqueles atributos.

- Para variáveis que possuem distribuição de probabilidade log-normal, como é o caso da condutividade hidráulica e a infiltração de água no solo, a média geométrica deve ser preferida, em relação à média aritmética, na obtenção de inferências.
- A utilização do sistema de informação geográfica, associado a técnicas geoestatísticas de estimativas, pode contribuir com a tomada de decisões agrícolas e com a agricultura de precisão, aumentando o potencial de utilização prática da geoestatística.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRÃO, P. R.; GEOPFERT, C. F.; GUERRA, M.; ELTZ, F. L. F.; CASSOL, E. A. Efeito de sistemas de preparo do solo sobre características de um Latossolo Roxo distrófico. Revista Brasileira de Ciência do Solo. Campinas, v. 3, n. 3, p.169 – 172, 1979.
- ALVARENGA, C. R. Potencialidade de adubos verdes para a conservação e recuperação de solos. Viçosa, MG, 112 p., 1993. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Viçosa.
- ANJOS, J. T.; UBERTI, V. J.; LEITE, G. B.; KRIEGER, M. Propriedades físicas em solos sob diferentes sistemas de uso e manejo. Revista Brasileira de Ciência do Solo. Campinas, v. 18, n. 1, p. 27 –36, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM. Dicionário de termos técnicos de irrigação e drenagem. Viçosa, UFV, 615 p., 1978.
- AZOOZ, R. H.; ARSHAD, M. A. Soil infiltration and hydraulic conductivity under long-term no-tillage and conventional tillage systems. Canadian Journal of Soil Science. v. 76, p. 143-152,1996.
- BERG, M. V. D; KLAMT, E. Variabilidade espacial de característica de solos na região do Planalto Médio , RS: II. Análise da semivariância e da variância. Revista Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, v.21, n.3, 1997.
- BERG, M. V. D; KLAMT, E. Variabilidade espacial de característica de solos na região do Planalto Médio , RS: I. Análise da variância por amostragem aninhada. Revista Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, v.21, n.3, 1997.
- BERTOL, I. Erosão hídrica em cambissolo húmico distrófico sob diferentes preparos do solo e rotação de culturas. Revista Brasileira de Ciência do Solo. Campinas, v. 18, p. 267 – 271, 1994.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. São Paulo: Icone. 355 p., 1990.
- BLEVINS, R. L.; FRYE, W. W.; BALDWIN, P. L.; ROBERTSON, S. D. Tillage effects on sediment and soluble nutrient losses from a Maury silt loam soil. J. Environ. Qual. v. 19, p. 683 – 686, 1990.

- BORGES, E. N. Efeito de doses de gesso + matéria seca de crotalária e de níveis de compactação em atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Escuro. Piracicaba, SP, 136 p., 1995. Tese de Doutorado – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo.
- BORGES, E. N.; LOMBARDI NETO, F.; CORRÊA, G. F.; COSTA, L. M. Mistura de gesso e matéria orgânica alterando atributos físicos de um latossolo com compactação simulada. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 21, p. 125 – 130, 1997.
- BRAGA, L. P. V. Geoestatística e aplicações. Minicurso do 9º Simpósio Brasileiro de Probabilidades e Estatística. IME. USP. São Paulo, 1990. 36 p.
- BRASIL, MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. PROJETO RADAMBRASIL. Levantamento de recursos naturais. II Série: SE22. Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Vegetação e Uso Potencial. Rio de Janeiro, 768 p., 1983.
- BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. Principles of geographical information systems. Oxford University Press, 331 p., 1998.
- BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. Estatística básica. 4ª ed.. São Paulo : Atual, 1987. 321 p.
- CADIMA, Z. A.; LIBARDI, P. L.; REICHARDT, K. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica em latossolo Vermelho Amarelo textura média, no campo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 4, n. 2, p. 63-66, 1980.
- CAMARGO, A. O. Compactação do solo e desenvolvimento de plantas. Campinas: Fundação Cargill, 44 p., 1983.
- CAMARGO, O. A de.; ALLEONI, L. R. F. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. Piracicaba: USP/ESALQ, 132 p., 1997.
- CAMERON, D. R. Variability of soil water retention curves and predicted hydraulic conductives on a small plot. Soil Science. Baltimore, v.126, n.6, p. 364-71, 1978.
- CAMPOS, B. C. de; REINERT, D. J.; NICOLODI, R.; RUEDEIL, J.; PETRERE, J. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro Distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistema de manejo de solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo. Campinas, v. 19, p. 121-126, 1995.
- CANALLI, L. B.; ROLOFF, G. Influência do preparo e da correção do solo na condição hídrica de um Latossolo Vermelho-Escuro sob plantio direto. Revista Brasileira de Ciência do Solo. Campinas, v. 21, n.1, p. 1-6, 1997.

- CARVALLO, H. O.; CASSEL, D. K.; HAMMOND, J.; BAUER, L.. Spatial variability of in situ unsaturated hydraulic conductivity of Maddock Sandy Loam. Soil Science. Baltimore. v. 121, n. 1, p. 1-8, 1976.
- CARVALHO, T. M. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho Amarelo através da geoestatística. Lavras : ESAL, 1991. 84 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, MG, 1991.
- CARVALHO Jr., I. A. Estimativas de parâmetros sedimentológicos para estudo de camadas compactadas e/ou adensadas em Latossolo de textura média, sob diferentes aspectos. Viçosa : UFV, 1995, 83 p.. Dissertação (Mestrado em Solos) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1995.
- CARVALHO, E. J. M.; FIGUEIREDO, M. de S.; COSTA, L. M. da.. Efeito de sistemas de manejo sobre algumas propriedades físicas de um Podzólico Vermelho-Amarelo Câmbico Fase Terraço. In: Anais do XXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Viçosa, v. 3, p. 1725-1727, 1995.
- CASSEL, D. K. Mechanical properties and tillage requirements of sandy soils. Adv. Agron. New York, v.1, p. 39-50, 1991.
- CASSEL, D. K., BAUER, A. Variability on soils below depth of tillage. Soil Science Society America Proceedings. Madison, v.39, p. 247-50, 1975.
- CATANI, R. A. Amostragem de solo para fins de fertilidade. Bragantia. Campinas, v.14, p. 19-26, 1954.
- CAVALIERI, A. Estimativa da adequação de uso das terras na quadricula de Moji Mirim (SP) utilizando diferentes métodos. Campinas, 1998. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas.
- CENTURION, J. F.; DEMATTÊ, J. L. I. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. Revista Brasileira de Ciência do Solo. Campinas, v. 9, n. 3, p. 263 – 266, 1985.
- CENTURION, J. F.; DEMATTÊ, J. L. I. Sistemas de preparo de solo de cerrado: efeitos nas propriedades físicas e na cultura do milho. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília, v. 27, n. 2, p. 315 –324, 1992.
- CHEN, J.; HOPMANS, J. W.; FOGG, G. E.. Sampling design for soil moisture measurements in large field trials. Soil Science, v. 159, n. 3, p. 155-161, 1995.
- CINTRA, F. L. D.; MIELNICZUCK, J. Potencial de algumas espécies vegetais para recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. Revista Brasileira de Ciência do Solo. Campinas, v. 7, p. 323-327, 1983.

- CORRÊA, J. C. Efeito de métodos de cultivo em algumas propriedades físicas de um Latossolo Amarelo muito argiloso do Estado do Amazonas. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília, v. 20, n.11, p. 1317-1322, 1985.
- CORRÊA, J. C. Características físicas de um Latossolo Amarelo muito argiloso (Typic Acrorthox) do estado do Amazonas, sob diferentes métodos de preparo. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília, v. 20, n. 12, p. 1381 – 1387, 1985.
- CORSINI, P. C.; FERRAUDO, A. S. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília, v. 34, n. 2, 1999.
- COSTA, J. B. da. Caracterização e constituição do solo. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 527 p., 1979.
- COSTA NETO, P. L. Estatística. São Paulo: Edgard Blucher, 264 p., 1979.
- Da ROS, C. O.; LOPES, C. E. L.; SECCO, D.; PASA, L. Influência do tempo de cultivo no sistema de plantio direto nas características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro. Ciência Rural. Santa Maria, v. 26, n. 3, p. 397 – 400, 1996.
- DAVID, M. Geostatistical ore reserve estimation. Elsevier. New York, v. 8, 364 p., 1977.
- DICK, W. A.; ROSBERG, R. J.; McCOY, E. L.; EDWARDS, W. M.; HAGHGIRI, F. Surface hydrologic response of soil to no-tillage. Soil Science Society America Journal. v. 53, p. 1520-1526, 1989.
- DOURADO NETO, D. Variabilidade espacial das alturas de chuva e irrigação e de potenciais da solução do solo. Piracicaba, SP, 1989. 180p. Dissertação (Mestrado em irrigação e drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz Queiroz", Universidade de São Paulo, 1989.
- EDWARDS, W. M.; VANDER PLOEG, R. R.; EHLERS, W. A numerical study of effects of non – capillary-sized pores upon infiltration. Soil Science Society America Journal. v. 43, p. 851-856, 1979.
- EDWARDS, W. M.; NORTON, L. D.; REDMOND, C. E. Characterizing macropores that affect infiltration into nontilled soil. Soil Science Society America Journal, v. 52, p. 483-487, 1988.
- ELRICK, D. E.; REYNOLDS, W. D.; BAUM GARTNER, K. A.; BRADSHAW, K. L. In-situ measurements of hydraulic properties of using Guelph permeameter and Guelph infiltrometer. Proc. Third Int. Symposium on land drainage. Ohio State University, 1987.

- EMBRAPA . Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de Métodos de Análise de Solos. Rio de Janeiro, 1979.
- ESPÍNDOLA, C. R.; GALHEGO, H. R. Pseudo-partículas texturais em solos da região central do Estado de São Paulo. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Salvador, p. 22-23, 1981.
- FERNANDES, B.; GALLOWAY, H. M.; BRONSON, R. D.; MANNERING, J. V. Efeito de três sistemas de preparo do solo na densidade aparente, na porosidade total e na distribuição de poros em dois solos (“Typic Argia-quoll” e “typic Haplu-dalf”). Revista Brasileira de Ciência do Solo. Campinas, v. 7, n. 1, p. 161-166, 1983.
- FERNANDES, M. R. Alterações na estrutura de latossolos argilosos submetidos ao uso agrícola. Campinas, SP, 186 p., 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola: Área de concentração Água e Solo) – Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas.
- FREITAS, P. L. de. Aspectos físicos e biológicos do solo. In: LANDERS, J. N. Fascículo de experiências de plantio direto no cerrado. Goiânia: Associação de Plantio Direto no Cerrado, p. 199 – 213, 1994.
- FORMAGGIO, A. R.; ALVES, D. S.; EPIPHANIO, J. C. N. Sistemas de informações geográficas na obtenção de mapas de aptidão agrícola e da taxa de adequação de uso das terras. Revista Brasileira de Ciência do Solo. Campinas, v. 16, p. 249-256, 1992.
- GOLABI, M. H.; RADCLIFFE, D. E.; HARGROVE, W. L.; TOLLNER, E. W. Macropore effects in conventional tillage and no-tillage soils. Journal of Soil and Water Conservation. v. 50, n. 2, p. 205-210, 1995.
- GONÇALVES, A. C.; FOLEGATTI, M. V. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo, ao longo de uma transeção em área irrigada por pivô central. In: XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. n. 95-3-190, Viçosa, MG, julho, 1995.
- GOTWAY, C. A.; FERGUSON, R. B.; HERGERT, G. W.; PETERSON, T. A. Comparasion of kriging and inverse-distance methods for mapping soil parameters. Soil Science Society America Journal. v. 60, p. 1237 – 1247, 1996.
- GRABLE, A. R. Soil aeration and plant growth. Advance in Agronomy. v. 18, p. 57 – 106, 1966.
- GRANT, C. A.; LAFOND, G. P. The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on a clay soil in southern Saskatchewan. Canadian Journal of Soil Science. v. 73, p. 223-232, 1993.

- GUIMARÃES, E. C. Estabilidade temporal da umidade de um Latossolo Roxo. In: XIII Congresso Latino-Americano de Ciência do Solo - Resumos expandidos em CD-ROOM. T01-023. Águas de Lindoia, SP: SBCS/ESALQ-USP, 1996.
- GUIMARÃES, E. C. Variabilidade espacial da umidade e da densidade do solo em um Latossolo Roxo. Campinas, SP, 1993. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola - Área de concentração: Água e Solo) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.
- GUIMARÃES, E. C.; AQUINO, L. H. de; OLIVEIRA, M. S. Variabilidade espacial do pH em água e da argila dispersa em água. Revista Ciência e Prática. Lavras, v. 19, n.1, p. 12-17, 1992.
- GUPTA, R. K.; RUDRA, R. P.; DICKINSON, W. T.; PATINI, N. K.; WALL, G. J.. Comparison of saturated hydraulic conductivity measured by various field methods. Transaction of the ASAE. v. 36, N. 1, p. 51-55, 1993.
- GUPTA, S. C.; LARSON, W. E.; LINDEN, D. R. Tillage and surface residue effects on soil upper boundary temperatures. Soil Science Society America Journal. v. 47, p. 1212 –1218, 1983.
- HERNANI, L. C.; SALTON, J. C.; FABRÍCIO, A. C.; DEDECEK, R.; ALVES JÚNIOR, M. Perdas por erosão e rendimentos de soja e de trigo em diferentes sistemas de preparo de um Latossolo Roxo de Dourados (MS). Revista Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, v. 21, n. 4, p.1-12, 1997.
- HILLEL, D. Applications of soil physics. New York: Academic Press. 385 p., 1980
- HOFFMAN, R.; VIEIRA, S. Análise de regressão - uma introdução à econometria. 2ª edição. Editora Hucitec, São Paulo, 379 p., 1987.
- HOSSEINI, E.; GALLICHAND, J.; CARON, J. Comparison of several interpolators for smoothing hydraulic conductivity data in south west Iran. American Society of Agricultural Engineers. v. 36, n. 6, p. 1687 –1693, 1993.
- IDRISI FOR WINDOWS. User's Guide. Version 2.0. J. Ronald Eastman. Jan. 1997.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. Applied Geostatistics. New York : Oxford University Press, 1989.
- JABRO, D. J. Estimation of saturated hydraulic conductivity of soil from particle size distribution and bulk density data. Transaction of the ASAE. v. 35, n. 2, p. 557-560, 1992.
- JONES, T. A. Skewness and kurtosis as criteria of normality in observed frequency distributions. Journal Sedimentary Petrology. P. 1622 –27, 1969.
- KIEHL, E. J. Manual de Edafologia: relações solo-planta. São Paulo: Ceres, 262 p., 1979.

- LEITE, J. A.; MEDINA, B. F. Efeito de sistemas de manejo sobre as propriedades físicas de um Latossolo Amarelo do Amazonas. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília, v. 19, n.11, p. 1417-1422, 1984.
- LIBARDI, P. L.; PREVEDELLO, C. L.; PAULETTO, E. A.; MORAES, S.O. Variabilidade espacial da umidade, textura e densidade de partículas ao longo de uma transeção. Revista Brasileira de Ciência do Solo. Campinas, v.10, n.2, p. 85-90, 1986.
- LONGO, R. M. Modificações nas propriedades do solo decorrentes da introdução de pastagens no cerrado (Goiânia-GO) e na floresta amazônica (Porto Velho – RO). Campinas, SP, 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola – Área de concentração: Água e Solo) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.
- LOPES, A. S. Solos sob cerrado: Características, propriedades e manejo. Piracicaba: Instituto Internacional da Potassa. 162 p., 1984.
- MACEDO, J. Os cerrados nos ambientes savânicos do Brasil. In: VENEGAS, V. H. A.; FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. Viçosa: SBCS/UFV/DPS, p. 135-155, 1996.
- MACHADO, J. A.; BRUM, A. C. R. Efeito de sistemas de cultivo em algumas propriedades físicas do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo. Campinas, v. 2, n. 2, 1981.
- MATHERON, G. Principles of geostatistics. Economic Geology. El Paso, V. 58, p. 11246-66, 1963.
- MATHERON, G. The theory of regionalized variables and its applications. Les Cahiers du Centre de Morphologie mathématique. Fas. 5. C. G. Fontainebleau, 1971.
- MELO, V. F.; SILVA, J. R. C.; Propriedades físicas de um Latossolo Amarelo álico, em áreas sob cultivo e vegetação natural de cerrado. In: Anais do XXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Viçosa, v. 3, p. 1890 – 1892, 1995.
- MELO FILHO, J. F.; SILVA, J. R. C. Erosão, teor de água no solo e produtividade de milho em plantio direto e preparo convencional de um Podzólico Vermelho-Amarelo no Ceará. Revista Brasileira de Ciência do Solo. Campinas, v. 17, p. 291 – 297, 1993.
- McBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. How many observations are needed for regional estimation of soil properties?. Soil Science. Baltimore, v. 135, n. 3, p. 177-83, 1983.
- MOHANTY, B. P.; ANKENY, M. D.; HORTON, R.; KANWAR, R. S. Spatial analysis of hydraulic conductivity measured using disc infiltrometers. Water Resources Research. v. 30, n.9, p. 2489 –2498, 1994.

- MORAES, A. S. Uma análise comparativa dos censos agropecuários de 1980-1985-1996. Uberlândia, MG, 88 p., 1997. Monografia – Departamento de Geografia – Universidade Federal de Uberlândia.
- MORAES, W. V. Comportamento de características e propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro submetido a diferentes sistemas de cultivo. Lavras, MG, 207 p., 1984. Dissertação de Mestrado – Departamento de Ciência do Solo - Escola Superior de Agricultura de Lavras.
- MORAES, M. H.; BENEZ, S. H. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de uma Terra Roxa Estruturada e na produção de milho. In: Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Campinas, T- 94-3-323, 16 p., 1994.
- MUZILLI, O. Influência do sistema de plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo. Campinas, v.7, n.1, p. 95-102, 1983.
- MUZILLI, O. Manejo da fertilidade do solo. In: Plantio Direto no Estado do Paraná. Instituto Agrônomo do Paraná (Circular IAPAR, 23). Londrina, 244 p., 1981.
- NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W.; ERH, H. T. Spatial variability of soil water properties. Hilgardia. Berkeley, v. 42 n. 7. p.215-59, 1973.
- OLIVEIRA, J. B. de. Variação de características morfológicas, físicas e mineralógicas em duas áreas de oxissolo. Piracicaba, SP, 199 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1973.
- OLIVEIRA, L. F. C.; PINTO, J. P. Determinação da capacidade de campo e da condutividade hidráulica em função da umidade, pelo método do perfil instantâneo em colunas de solo. In: XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. n. 95-3-266, 10 p., Viçosa, MG, Julho, 1995.
- PAIVA, P. J. R.; FURTINI NETO, A. E.; VALE, F. R. do; FAQUIN, V. Efeito do manejo do solo sobre os teores de matéria orgânica, nitrogênio mineral, fósforo e bases trocáveis. Ciênc. E Agrotec. Lavras, v. 21, n.1, p. 35 – 43, 1997.
- PATGIRI, D. K.; BARUAH, T. C. Spatial variability of total porosity, air entry potential and saturation water content in a cultivated inceptisol. I. Semivariância analysis. Agricultural Water Management. v. 27, p. 1-9, 1995.
- PATGIRI, D. K.; BARUAH, T. C. Spatial variability of total porosity, air entry potential and saturation water content in a cultivated inceptisol. II. Estimation through kriging. Agricultural Water Management. v. 27, p. 11-16, 1995.

- PEREIRA, G.; AGUIAR, J. L. P. de, MOREIRA, L., BEZERRA, H. da S. Área e população do cerrado. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília, v. 32, n. 7, 1997.
- PIMENTEL GOMES, F. Curso de estatística experimental. Piracicaba: Nobel, 1995.
- PIMENTEL, G. B. M.; CHAVES, R. S. Produtividade do caupi sob diferentes sistemas de manejo de um solo de várzea do Médio Amazonas Paraense. Revista Brasileira de Ciência do Solo. Campinas, v. 17, n. 1, p. 135–138, 1993.
- PRUSKY, F. F.; VENDRAME, V.; OLIVEIRA, E. F. de; BALBINO, L. C.; FERREIRA, P. A.; WERLANG, L.; CARVALHO, L. T de. Infiltração da água num Latossolo Roxo. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília, v. 32, n. 1, 1997.
- RAIJ, B. VAN. Avaliação da fertilidade do solo. Piracicaba. POTAFOS, 1987. 142 p.
- RANDO, E. M. Alterações nas características e propriedades físicas de um Latossolo Roxo distrófico, ocasionadas pelo cultivo convencional. Lavras, MG, 1981, 161 p.. Dissertação de Mestrado – Departamento de Ciência do Solo – Escola Superior de Agricultura de Lavras.
- RAO, R. G. S., ULABY, F. T. Optimal sampling techniques for ground truth data in microwave remote sensing of soil moisture. Remote Sensing of Environment. v. 6, p. 289-301, 1977.
- REICHARDT, K. Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera. 4ª ed. Campinas : Fundação Cargill, 1985. 473 p.
- REICHARDT, K.; VIEIRA, S. R.; LIBARDI, P. L. Variabilidade espacial de solos e experimentação de campo. R. bras. Ci. Solo. Campinas, v. 10, n. 1, p. 1-6, 1986.
- REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. In-situ measurement of field - saturated hydraulic conductivity, sorptivity and α parameter using the Ghelph permeameter. Soil Science, v. 140, n.4, p.292-302, 1985.
- ROCHA, J. V. Gerenciamento de operações agrícolas em sistemas de informações geográficas. Caderno de Informações georeferenciadas - CIG. UNICAMP, Campinas, V.1, N. 1, Jan, 1996 (<http://orion.cpa.unicamp.br/revista.html>)
- ROGOWOSKI, A. S.. Watershed physics: soil variability criteria. Water Resources Research. Washington, v. 8, p. 1015-23, 1972.
- ROUET, P. Les données dans les systèmes d'information géographique. Éditions Hermès. Paris, 288 p., 1995.
- SANCHEZ, P. A. Suelos del trópicos. Características y Manejo. San José, IICA, 1981, 634 p.

- SECCO, D.; Da ROS, C. O.; FIORIN, J. E.; PAUTZ, C. V.; PASA, L. Efeito de sistemas de manejo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro. Ciência Rural. Santa Maria, v. 27, n.1, p. 57 – 60, 1997.
- SILVA, A. P. da. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo. Piracicaba, SP, 1988, 98 p. Tese (Doutorado em Solos) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1988.
- SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial da resistência a 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, 1989.
- SILVA, C. L. da; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília, v. 32, n. 2, 1997.
- SOUZA, L. da S.; COGO, N. P.; VIEIRA, S. R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. Revista Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, v. 21, n. 3, 1997.
- STARR, J. L.; PARKIN, T. B.; MEISINGER, J. J. Sample size consideration in the determination of soil nitrate. Soil Science Society America Journal. v. 56, nov - dez, 1995, p. 1824-30.
- STOCKTON, J. G.; WARRICK, A. W.. Spatial variability of unsaturated hydraulic conductivity. Soil Science Society of America Proceedings. Madison, v. 35, p. 847-48, 1971.
- TRAGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. Advances in Agronomy. v. 38, p. 45-93, 1985.
- VACHAUD, G.; PASSERAT, DE Silans; BALABANIS, P.; VAUCLIN, M. Temporal Stability of Spatially measured soil water probability density function. Soil Science Society America Journal. v. 49, p. 822-28, 1985.
- VERHEYE, W. Nature and evolution of soils developed on the granite complex in the subhumid tropic (Iwry Coast). Morphology and Classification pedology. v. 24, n. 3, p. 266-282, 1984.
- VIEIRA, M. J.; MUZILLI, O. Características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes sistemas de manejo. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília: v. 19, n. 7, p. 873 – 882, 1984.
- VIEIRA, S. R. Dynamic modelling and evaluation of water and solute transport in soil profiles, extended to a landscape basis. 97 p. Ago., 1993.
- VIEIRA, S. R. Curso de atualização em conservação do solo - Uso de geoestatística. Campinas, IAC, v. 1 e 2, 1995.

- VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em parcela experimental de um Latossolo Roxo de Campinas (SP). Bragantia. Campinas, v. 56, n.1, 1997.
- VIEIRA, S. R.; GUIMARÃES, E. C.; DECHEN, S. C. F.; DE MARIA, I. C.; ROCHETE, P.; TOPP, G. C.; ZEBCHUK, W. Analizando simultaneamente variabilidade espacial e temporal usando variogramas tridimensionais. In: XIII Congresso Latino-Americano de Ciência do Solo - Resumos expandidos em CD-ROOM. T01-053. Águas de Lindoia, SP: SBCS/ESALQ-USP, 1996.
- VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. Hilgardia. Berkeley, v. 31, n. 3, 1983. 75 p.
- VIEIRA, S. R.; LOMBARDI NETO, F.; BURROWS, I. T. Mapeamento da chuva diária máxima provável para o estado de São Paulo. R. bras. Ci. Solo. Campinas, v.15, n.1, p. 93-98, 1991.
- VIEIRA, S. R.; TILLOTSON, P. M.; BIGGAR, J. W.; NIELSEN, D. R. Scaling of semivariograms and the kriging estimation of field-measured properties. Revista Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, v.21, n. 4, 1997.
- VOORHEES, W. B. Soil compactation how it influences moisture temperature, yield, root growth. Crops and Soil Magazine. v.29, p. 13 – 16, 1977.
- WAGER, M. G.; DENTON, H. P. Influence of crop and wheel traffic on soil physical properties in continuous no-till corn. Soil Science Society America Journal. v. 53, p. 1206-1210, 1989.
- WEBSTER, R., BURGESS, T. M. Sampling and bulking strategies for estimating soil properties in small regions. Soil Science. Baltimore, v. 34, p. 127-40, 1984.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SECÃO CIRCULANTE