

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

VARIABILIDADE ESPACIAL DA UMIDADE E DA DENSIDADE  
DO SOLO EM UM LATOSSOLO ROXO

EDNALDO CARVALHO GUIMARÃES

Orientador:

Prof. Dr. NEWTON ROBERTO BONI

Paracar

Este exemplar corresponde a redação final da dissertação de M  
Trado defendida por Ednaldo Carvalho Guimarães e aprovada pel  
Comissão Julgadora em 29 de setembro de 1993. Campinas 1:  
de dezembro de 1993.

*[Assinatura]*  
Presidente da Banca

Dissertação apresentada à FEAGRI/UNICAMP como cumprimento  
parcial dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Agrícola - Área de concentração: Água e Solo.

Campinas - SP  
setembro - 1993

A minha mãe, D. Geralda,  
aos meus irmãos Meire,  
Ediney, Mércia, Míriam e  
Andraíza e aos sobrinhos,  
pelo incentivo e carinho.

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Newton Roberto Boni pela orientação, dedicação e amizade.

À Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI/UNICAMP), pela oportunidade de realização do mestrado.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão de bolsa de estudo no período de março de 1992 a agosto de 1993

À CAPES pela concessão de bolsa de estudo no período de março de 1991 a fevereiro de 1992.

Ao Fundo de Apoio ao Ensino e Pesquisa da UNICAMP (FAEP/UNICAMP) pelo financiamento da pesquisa.

À Seção de Conservação do Solo do Instituto Agrônomo de Campinas, onde foram realizados os trabalhos experimentais e as análises laboratoriais.

Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP), pelo empréstimo do equipamento sonda de nêutrons.

Ao Prof. Dr. Carlos Roberto Espindola (DAS/FEAGRI/UNICAMP) e ao Dr. Sidney Rosa Vieira (Seção de Conservação do Solo - IAC), membros do Comitê de Orientação, pelas sugestões e grande colaboração no desenvolvimento do

trabalho.

À pesquisadora Isabella Clerici de Maria ( Seção de Conservação do solo - IAC) pelas contribuições para o aperfeiçoamento do trabalho.

Aos Profs. Luiz Henrique de Aquino e Marcelo Silva de Oliveira da Escola Superior de Agricultura de Lavras pelo incentivo, amizade e colaboração durante toda minha graduação e pós-graduação.

A todos os colegas de Pós-Graduação, em especial ao Vitor Hugo M. Vono, à Andréa dos S. Barbosa e à Adriana Cavalieri que participaram da instalação do experimento em campo, e ao Ângelo Vieira dos Reis pelas discussões sobre o tema do trabalho.

Aos técnicos da Seção de Conservação do Solo, IAC, em especial ao Márcio e à Luzia pela, colaboração durante a coleta de dados.

À Ana Paula, pela grande colaboração como secretária da Pós-Graduação, mas sobretudo pela grande amizade.

E a todos os funcionários e professores da Faculdade

## SUMÁRIO

	pág.
DEDICATÓRIA.....	ii
AGRADECIMENTO.....	iii
SUMÁRIO.....	v
LISTA DE QUADROS.....	viii
LISTA DE EQUAÇÕES.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE ANEXOS.....	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xviii
RESUMO.....	xxi
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1 Amostragem em solos.....	5
3.2 Umidade do solo.....	7
3.3 Densidade do solo.....	10
3.4 A estatística no estudo da variabilidade de solos..	12
3.4.1 Estatística Clássica.....	12
3.4.2 Geoestatística.....	18
3.4.2.1 Semivariância e autocorrelação.....	19
3.5 Aplicação da variabilidade espacial em solos.....	25

3.6 Sonda de nêutrons.....	29
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	34
4.1 Solo.....	34
4.2 Sonda de nêutrons .....	36
4.3 Esquema de amostragem.....	36
4.4 Horizontes: designação, profundidade e estrutura...	37
4.5 Determinação da umidade do solo.....	38
4.6 Determinação da densidade do solo.....	38
4.7 Leituras com a sonda de nêutrons.....	39
4.8 Análise Estatística.....	41
4.8.1 Estatística clássica.....	41
4.8.2 Geoestatística.....	42
4.8.3 Calibração da sonda de nêutrons.....	44
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
5.1 Horizontes: designação, profundidade e estrutura...	46
5.2 Momentos estatísticos para umidade e densidade do solo.....	49
5.2.1 Umidade do solo.....	49
5.2.2 Densidade do solo.....	53
5.3 Semivariogramas médios para umidade e densidade do solo.....	56
5.3.1 Umidade do solo.....	57
5.3.2 Densidade do solo.....	64
5.4 Isoumidades e Isodensidades.....	67
5.4.1 Isoumidades.....	67
5.4.2 Isodensidades.....	79

5.5 Calibração da sonda de nêutrons.....	92
6 CONCLUSÕES.....	97
7 ANEXOS.....	99
Anexo 1.....	100
Anexo 2.....	105
Anexo 3.....	117
Anexo 4.....	129
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	131
9 ABSTRACT.....	137

## LISTA DE QUADROS

Quadro		pág
1	Momentos estatísticos para espessuras dos horizontes Ap, AB e B21 de um Latossolo Roxo localizado na Centro Experimental de Campinas -IAC - Campinas ...	47
2	Momentos estatísticos da variável umidade do solo ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ), nas profundidades de 30 e 60 cm, nos meses de fevereiro, maio, junho, setembro, outubro e novembro de 1992.....	50
3	Comparação entre a variabilidade da umidade do solo ocorrida em toda a área experimental com a variabilidade das regiões de LR e transição de LR para TE, através de momentos estatísticos.....	52
4	Momentos estatísticos para a variável densidade do solo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), nas profundidades de 30 e 60 cm.....	54
5	Comparação entre a variabilidade da densidade do solo ocorrida em toda área experimental com a variabilidade de um LR e um LR transição para TE, através de alguns momentos estatísticos.....	56
6	Regressão linear da umidade do solo em função da contagem relativa (CR) de nêutrons moderados no solo para a calibração da sonda SOLO 25S.....	94
7	Designação, profundidade e estrutura dos horizontes até 80 cm de profundidade, de um Latossolo Roxo na Fazenda Santa Elisa - IAC - Campinas - SP. ( Levantamento realizado em 10 trincheiras representativas da área).....	101
8	Semivariâncias da umidade do solo com os respectivos números de pares de cálculo em 04/02/92..	118
9	Semivariâncias da umidade do solo com os respectivos números de pares de cálculo em 16/05/92..	119

10	Semivariâncias da umidade do solo com os respectivos números de pares de cálculo em 02/06/92..	120
11	Semivariâncias da umidade do solo com os respectivos números de pares de cálculo em 22/07/92..	121
12	Semivariâncias da umidade do solo com os respectivos números de pares de cálculo em 01/09/92..	122
13	Semivariâncias da umidade do solo com os respectivos números de pares de cálculo em 29/09/92..	123
14	Semivariâncias da umidade do solo com os respectivos números de pares de cálculo em 15/10/92..	124
15	Semivariâncias da umidade do solo com os respectivos números de pares de cálculo em 27/10/92..	125
16	Semivariâncias da umidade do solo com os respectivos números de pares de cálculo em 10/11/92..	126
17	Semivariâncias da umidade do solo com os respectivos números de pares de cálculo em 24/11/92..	127
18	Semivariâncias da densidade do solo com os respectivos números de pares de cálculo.....	128
19	Precipitação diária do ano de 1992 em Campinas-SP- Dados - CEPAGRI/UNICAMP - Posto Meteorológico da FEAGRI/UNICAMP.....	130

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação	pág
1 Umidade com base em peso (g/g).....	08
2 Umidade com base em volume ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ).....	08
3 Densidade do solo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).....	11
4 Coeficiente de assimetria.....	14
5 Coeficiente de curtose.....	15
6 Estimativa da média.....	15
7 Estimativa do desvio padrão.....	15
8 Estimativa do tamanho da amostra.....	16
9 Função autocorrelação.....	18
10 Estimativa da autocorrelação.....	18
11 Estimativa da semivariância.....	20
12 Modelo linear de semivariograma.....	22
13 Modelo esférico de semivariograma.....	22
14 Modelo exponencial de semivariograma.....	22
15 Modelo de Gauss de semivariograma.....	23
16 Modelo exponencial ajustado às semivariâncias escalonadas de umidade do solo a 30 cm de profundidade.....	60

17	Modelo exponencial ajustado às semivariâncias escalonadas de umidade do solo a 60 cm de profundidade.....	60
18	Modelo exponencial ajustado às semivariâncias escalonadas de densidade do solo a 30 e 60 cm de profundidade.....	65

## LISTA DE FIGURAS

Figura		pág
1	Levantamento altimétrico da área experimental localizada no Centro Experimental de Campinas- IAC- Campinas-SP.....	35
2	Representação tridimensional da topografia da área experimental do Centro Experimental de Campinas - IAC - Campinas - SP.....	35
3	Esquema de amostragem para umidade, densidade do solo e leituras com a sonda de nêutrons, na área experimental do Centro Experimental de Campinas - IAC - Campinas - SP.....	37
4	Semivariograma experimental para a umidade do solo a 30 cm de profundidade em 04/02, 16/05, 02/06, 22/07, 01/09 e 29/09 de 1992.....	57
5	Semivariograma experimental para a umidade do solo a 30 cm de profundidade em 15/10, 27/10, 10/11 e 24/11 de 1992.....	58
6	Semivariograma experimental para a umidade do solo a 60 cm de profundidade em 04/02, 16/05, 02/06, 22/07, 01/09 e 29/09 de 1992.....	58
7	Semivariograma experimental para a umidade do solo a 60 cm de profundidade em 15/10, 27/10, 10/11 e 24/11 de 1992.....	59
8	Semivariograma experimental escalonado e modelo ajustado para a umidade do solo a 30 cm de profundidade em 04/02, 16/05, 02/06, 22/07 e 01/09 de 1992 (Equação 16).....	61
9	Semivariograma experimental escalonado e modelo ajustado para a umidade do solo a 30 cm de profundidade em 29/09, 15/10, 27/10, 10/11 e 24/11 de 1992 (Equação 16).....	61

10	Semivariograma experimental escalonado e modelo ajustado para a umidade do solo a 60 cm de profundidade em 04/02, 16/05, 02/06, 22/07 e 01/09 de 1992 (Equação 17).....	62
11	Semivariograma experimental escalonado e modelo ajustado para a umidade do solo a 60 cm de profundidade em 29/09, 15/10, 27/10, 10/11 e 24/11 de 1992 (Equação 17).....	62
12	Semivariograma experimental para a densidade do solo a 30 e 60 cm de profundidade.....	66
13	Semivariograma experimental escalonado e modelo ajustado para a densidade do solo a 30 e 60 cm de profundidade.....	66
14	Isolinhas de umidade do solo a 30 cm de profundidade em 04/02/92.....	68
15	Isolinhas de umidade do solo a 60 cm de profundidade em 04/02/92.....	68
16	Isolinhas de umidade do solo a 30 cm de profundidade em 16/05/92.....	69
17	Isolinhas de umidade do solo a 60 cm de profundidade em 16/05/92.....	69
18	Isolinhas de umidade do solo a 30 cm de profundidade em 02/06/92.....	70
19	Isolinhas de umidade do solo a 60 cm de profundidade em 02/06/92.....	70
20	Isolinhas de umidade do solo a 30 cm de profundidade em 22/07/92.....	71
21	Isolinhas de umidade do solo a 60 cm de profundidade em 22/07/92.....	71
22	Isolinhas de umidade do solo a 30 cm de profundidade em 01/09/92.....	72
23	Isolinhas de umidade do solo a 60 cm de profundidade em 01/09/92.....	72
24	Isolinhas de umidade do solo a 30 cm de profundidade em 29/09/92.....	73
25	Isolinhas de umidade do solo a 60 cm de profundidade em 29/09/92.....	73

26	Isolinhas de umidade do solo a 30 cm de profundidade em 15/10/92.....	74
27	Isolinhas de umidade do solo a 60 cm de profundidade em 15/10/92.....	74
28	Isolinhas de umidade do solo a 30 cm de profundidade em 27/10/92.....	75
29	Isolinhas de umidade do solo a 60 cm de profundidade em 27/10/92.....	75
30	Isolinhas de umidade do solo a 30 cm de profundidade em 10/11/92.....	76
31	Isolinhas de umidade do solo a 60 cm de profundidade em 10/11/92.....	76
32	Isolinhas de umidade do solo a 30 cm de profundidade em 24/11/92.....	77
33	Isolinhas de umidade do solo a 60 cm de profundidade em 24/11/92.....	77
34	Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 30 cm de profundidade em 04/02/92.....	80
35	Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 60 cm de profundidade em 04/02/92.....	80
36	Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 30 cm de profundidade em 16/05/92.....	81
37	Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 60 cm de profundidade em 16/05/92.....	81
38	Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 30 cm de profundidade em 02/06/92.....	82
39	Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 60 cm de profundidade em 02/06/92.....	82
40	Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 30 cm de profundidade em 22/07/92.....	83
41	Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 60 cm de profundidade em 22/07/92.....	83
42	Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 30 cm de profundidade em 01/09/92.....	84

43	Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 60 cm de profundidade em 01/09/92.....	84
44	Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 30 cm de profundidade em 29/09/92.....	85
45	Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 60 cm de profundidade em 29/09/92.....	85
46	Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 30 cm de profundidade em 15/10/92.....	86
47	Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 60 cm de profundidade em 15/10/92.....	86
48	Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 30 cm de profundidade em 27/10/92.....	87
49	Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 60 cm de profundidade em 27/10/92.....	87
50	Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 30 cm de profundidade em 10/11/92.....	88
51	Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 60 cm de profundidade em 10/11/92.....	88
52	Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 30 cm de profundidade em 24/11/92.....	89
53	Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 60 cm de profundidade em 24/11/92.....	89
54	Isolinhas de densidade do solo a 30 cm de profundidade.....	90
55	Isolinhas de densidade do solo a 60 cm de profundidade.....	90
56	Variação espacial em três dimensões da densidade do solo a 30 cm de profundidade.....	91
57	Variação espacial em três dimensões da densidade do solo a 30 cm de profundidade.....	91
58	Umidade do solo a 30 cm de profundidade em 04/02/92..	106
59	Umidade do solo a 60 cm de profundidade em 04/02/92..	106
60	Umidade do solo a 30 cm de profundidade em 16/05/92..	107
61	Umidade do solo a 60 cm de profundidade em 16/05/92..	107

62	Umidade do solo a 30 cm de profundidade em 02/06/92..	108
63	Umidade do solo a 60 cm de profundidade em 02/06/92..	108
64	Umidade do solo a 30 cm de profundidade em 22/07/92..	109
65	Umidade do solo a 60 cm de profundidade em 22/07/92..	109
66	Umidade do solo a 30 cm de profundidade em 01/09/92..	110
67	Umidade do solo a 60 cm de profundidade em 01/09/92..	110
68	Umidade do solo a 30 cm de profundidade em 29/09/92..	111
69	Umidade do solo a 60 cm de profundidade em 29/09/92..	111
70	Umidade do solo a 30 cm de profundidade em 15/10/92..	112
71	Umidade do solo a 60 cm de profundidade em 15/10/92..	112
72	Umidade do solo a 30 cm de profundidade em 27/10/92..	113
73	Umidade do solo a 60 cm de profundidade em 27/10/92..	113
74	Umidade do solo a 30 cm de profundidade em 10/11/92..	114
75	Umidade do solo a 60 cm de profundidade em 10/11/92..	114
76	Umidade do solo a 30 cm de profundidade em 24/11/92..	115
77	Umidade do solo a 60 cm de profundidade em 24/11/92..	115
78	Densidade do solo a 30 cm de profundidade.....	116
79	Densidade do solo a 60 cm de profundidade.....	116

## LISTA DE ANEXOS

Anexo		pág
1	Profundidades e estruturas dos horizontes até 80 cm de profundidade.....	100
2	Valores determinados de umidade do solo nas datas de amostragem e a 30 e 60 cm de profundidade e valores de densidade do solo nas profundidades de 30 e 60 cm.....	105
3	Semivariâncias médias da umidade e da densidade do solo com os respectivos números de pares de cálculo.....	117
4	Dados pluviométricos do ano de 1992.....	129

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	
a	- Alcance da dependência espacial
AB	- Horizonte de transição de A para B.
Ap	- Horizonte superficial do solo
Ass	- Assimetria
B	- Coeficiente angular da reta
B21	- Horizonte do solo
B22	- Horizonte do solo
C(h)	- Autocorrelação para distância h.
C <sub>o</sub>	- Efeito pepita do semivariograma
C <sub>o</sub> + C	- Patamar do semivariograma
Cov	- Covariância entre os valores amostrados
C <sub>r</sub>	- Coeficiente de curtose
CR	- Razão de contagem de nêutrons
C <sub>s</sub>	- Coeficiente de assimetria
Curt	- Curtose
CV	- Coeficiente de variação
Dg	- Densidade do solo (g/cm <sup>3</sup> )
D.P.	- Desvio padrão
D30	- Densidade do solo a 30 cm de profundidade

D60	- Densidade do solo a 60 cm de profundidade
e	- Erro da estimativa da média
$E[Z(x)]$	- Esperança da variável aleatória $Z(x)$
$E[Z(x)-Z(x+h)]$	- Esperança da diferença de duas V. A.
$E[Z(x) \times Z(x+h)]$	- Esperança do produto de duas V. A.
exp	- exponencial
IAC	- Instituto Agronômico de Campinas
LR	- Latossolo Roxo
LR/TE	- Latossolo Roxo transição para Terra Roxa Estruturada
m	- média da população
Max	- Valor máximo
$m_i$	- Massa de água contida na amostra
Min	- Valor mínimo
$M_o$	- Valor modal
$m_s$	- Massa de solo seco
$M_4$	- Momento de quarta ordem em relação à média
n	- Tamanho da amostra
N	- Contagem de nêutrons no solo
$N(h)$	- Número de pares com a distância h
$N_s$	- Contagem de nêutrons no padrão
$R^2$	- Coeficiente de determinação
$r(k)$	- Estimativa da autocorrelação para distância
k	
s	- Desvio padrão amostral
$s^4$	- Quadrado da variância amostral

TE	- Terra Roxa Estruturada
V	- Volume da amostra de solo
V. A.	- Variável aleatória
Var	- Variância
$V_i$	- Volume de água contida na amostra
$V_t$	- Volume total de solo
u	- Umidade com base em peso
U30	- Umidade do solo a 30 cm
U60	- Umidade do solo a 60 cm
$\bar{X}$	- Média amostral
$X_i$	- Valor amostral no ponto i
$Z_{\alpha/2}$	- Valor da normal reduzida
$\theta$	- Umidade com base em volume
$\gamma(h)$	- Semivariância experimental
$\rho(h)$	- Autocorrelação entre as amostras

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivos: a) estudar a variabilidade da umidade e da densidade do solo (densidade global ou densidade aparente) através da estatística clássica e da geoestatística; b) relacionar aspectos de amostragem com suposição de independência entre amostras e homogeneidade de solos; c) avaliar a distribuição da água no solo ao longo do tempo e verificar a existência de proporcionalidade da umidade e da densidade do solo a 30 e 60 cm, através de semivariogramas escalonados; d) verificar a influência da variabilidade espacial da umidade e da densidade do solo na calibração de uma sonda de nêutrons. O experimento foi conduzido em um Latossolo Roxo, do Centro Experimental do Instituto Agronômico de Campinas (Fazenda Santa Elisa), em Campinas, São Paulo. A área possui 120x160 m e recebeu, por ocasião do experimento, uma cultura de lab-lab. O esquema de amostragem adotado para as variáveis em estudo foi a amostragem sistemática, com espaçamento entre amostras de 20 m, com determinações feitas a 30 cm e 60 cm de profundidade. Foi determinada a umidade do solo ao longo do tempo pelo método gravimétrico; determinou-se também a densidade do solo pelo método do anel volumétrico e

realizaram-se leituras para a determinação da umidade, em três datas, com uma sonda de nêutrons de fabricação francesa, modelo SOLO 25S<sup>1</sup>, com uma fonte de Amerício-Berilo de 1,48 GBq (40mCi) de atividade. Com os valores obtidos para umidade e densidade do solo foram calculados alguns momentos estatísticos, observando-se uma distribuição normal e um baixo coeficiente de variação para estas variáveis. Através dos semivariogramas experimentais pôde-se observar proporcionalidade da umidade nos tempos de determinação e proporcionalidade entre as densidades do solo nas duas profundidades de amostragem, permitindo ajustar um único modelo de semivariograma para cada variável. Devido à pequena amplitude de variação da umidade nas datas de leitura com a sonda de nêutrons não foi possível calibrá-la com a umidade natural do solo.

---

<sup>1</sup> Citações de marcas não implicam em recomendações do autor.

## 1 - INTRODUÇÃO

Projetos de uso e manejo do solo para fins agrícolas freqüentemente levam em consideração a umidade e a densidade do solo, onde valores médios geralmente são utilizados; para que estas médias sejam confiáveis faz-se necessário que a amostragem seja representativa de toda a área, requerendo, assim, um bom planejamento de coleta de dados.

A aplicação da estatística clássica na análise de dados exige independência entre amostras, distribuição normal dos dados e homogeneidade de variâncias. Estas hipóteses básicas quase nunca são testadas para a aplicação dos testes estatísticos convencionais, e isto pode levar a erros de interpretação dos resultados experimentais.

Pesquisas têm mostrado que a quantificação de características e propriedades dos solos são influenciadas pela variabilidade espacial; portanto, existe um raio de dependência entre amostras e neste raio uma média simples não é representativa da área em estudo. Neste caso, é mais indicado o uso de estimativas que levem em consideração a posição

espacial dos valores amostrados.

Dentre os atributos que são afetadas por esta variabilidade espacial, encontram-se a umidade e a densidade do solo.

A proporcionalidade de uma variável no tempo ou no espaço fica caracterizada quando as regiões com valores do atributo mais altos em relação a outras regiões, em determinado tempo, permaneçam com valores superiores em outro tempo. Espera-se que alguns atributos do solo, como a umidade e densidade, apresentem este comportamento.

A sonda de nêutrons é um equipamento utilizado na determinação da umidade do solo, que apresenta como grande vantagem sobre outros métodos a possibilidade de se obter valores de umidade no mesmo ponto e a qualquer tempo. Para a utilização esta deve ser calibrada, preferencialmente no campo, pois em laboratório não se consegue reproduzir as mesmas condições que se encontra o solo no campo.

Considerando que a umidade e a densidade do solo são influenciadas pela variabilidade espacial, é de se esperar que a curva de calibração da sonda de nêutrons também seja influenciada por esta variabilidade. Tal fato poderá causar erros na curva de calibração e estes erros são os chamados

erros locais.

Pretende-se pois, com este trabalho, verificar a variabilidade da umidade e densidade do solo e determinar a amplitude de dependência espacial entre amostras. Acredita-se que representará uma forma de contribuição para o aumento do conhecimento da interdependência destes atributos no tempo e no espaço, possibilitando um planejamento adequado de futuras amostragens destas variáveis e uma quantificação mais precisa do reservatório de água no solo disponível às plantas.

## 2 - OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são:

(a) Avaliar a variabilidade da umidade e da densidade do solo através dos momentos da estatística clássica e através de ferramentas da geoestatística;

(b) Relacionar aspectos de amostragem com suposição de independência entre amostras e homogeneidade de solos;

(c) Utilizar a teoria de escalonamento para verificar a distribuição da água no solo ao longo do tempo e a proporcionalidade de variação entre as profundidades de amostragem da densidade do solo;

(d) Verificar a influência da variabilidade espacial da umidade e da densidade do solo na calibração de uma sonda de nêutrons.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Nos diversos ramos da ciência do solo pesquisadores têm dado ênfase à variabilidade espacial em experimentos de campo, porque, na maioria das vezes, a pressuposição de independência entre amostras, feita pela estatística clássica, não é devidamente atendida.

Nesta revisão da literatura serão enfocados aspectos relacionados com amostragem em solos, umidade e densidade do solo, estatística clássica e geoestatística (variabilidade espacial) e uso e calibração de sonda de nêutrons.

#### **3.1. Amostragem em solos**

A teoria estatística descreve vários tipos de amostragem, como a amostragem simples ao acaso (ASA), amostragem sistemática, amostragem por conglomerado, etc.. A descrição de cada tipo de amostragem pode ser encontrada em textos básicos de estatística, dentre os quais o de COSTA NETO (1977), por exemplo.

Segundo REICHARDT et al (1986) a pressuposição de homogeneidade de solos se faz presente na grande maioria das teorias estatísticas ainda empregadas. Em experimentos de campo considera-se a heterogeneidade de solos apenas em profundidade, subdividindo o perfil do solo em horizontes supostamente homogêneos.

Esta suposição de homogeneidade em conjunto com a hipótese de independência entre pontos amostrados pode representar uma grande fonte de erro na caracterização de uma propriedade do solo. Uma forma de minimizar estes erros é a retirada de um grande número de amostras na área experimental, diluindo, assim, a influência das fontes de variabilidades nas estimativas realizadas. Entretanto, isto, em muitos casos, inviabiliza o experimento por problemas de custos e tempo.

Alguns autores, como CATANI (1954) e RAIJ (1987) afirmam que, para amostragem em solos para fins de fertilidade, as áreas devem ser consideradas uniformes quanto à textura, cor, topografia e manejo e que tais áreas não devem exceder a 20 ha.

A amostragem em solos segue, em geral, dois esquemas: amostragem simples ao acaso (ASA) ou amostragem sistemática. Na ASA considera-se cada observação independente das demais e a retirada de amostras é feita totalmente ao acaso. Na amostragem sistemática o plano de amostragem é realizado com espaçamentos

pré-fixados. Segundo REICHARDT et al (1986) a escolha do esquema de amostragem depende do objetivo do experimento e que as estimativas dos momentos estatísticos podem ser realizadas com qualquer tipo de amostragem. Contudo, quando a amostragem é sistemática, existe a possibilidade de avaliar a estrutura da variância dos dados. Em OLIVEIRA (1991) encontra-se algoritmos para a determinação do tamanho da amostra e espaçamentos entre pontos amostrados de variáveis espaciais utilizando a teoria geoestatística.

### 3.2. Umidade do solo

O uso e o manejo adequados da água do solo são de grande importância para uma agricultura moderna e por isto pesquisas nesta área tem se intensificado.

O método tradicional de se medir umidade do solo é o gravimétrico, que consiste na coleta de amostras deformadas e na determinação de seu peso úmido e seco. Relacionando-se os dois pesos tem-se a umidade com base em peso, como citam textos de física de solos, como os de KIEHL (1979) e de REICHARDT (1985).

A umidade com base em peso é dada por:

$$u = \frac{m_1}{m_s} \quad (1)$$

onde:

$u$  - umidade com base em peso (g/g);

$m_1$  - massa de água contida na amostra (g);

$m_s$  - massa de solo seco (g).

O conhecimento da umidade em volume assume grande importância, pois sabe-se que a planta explora volume de solo e não peso. Em REICHARDT (1985) existe um argumento de que o método de determinação de umidade com base em volume é pouco utilizado porque requer uma amostra indeformada para a determinação de volume.

A umidade com base em volume é dada por:

$$\theta = \frac{V_1}{V_T} \quad (2)$$

onde:

$\theta$  - umidade com base em volume ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$V_1$  - volume de água contida na amostra ( $\text{cm}^3$ );

$V_T$  - volume total de solo ( $\text{cm}^3$ ).

Uma técnica mais utilizada para se determinar a umidade com base em volume é determinar a umidade com base em peso e multiplicar pela densidade do solo previamente determinada para

o local.

A densidade do solo é uma característica que apresenta variações no espaço e no tempo. Ao se determinar a densidade do solo em um ponto do espaço e em um tempo e utilizar-se deste valor para converter a umidade com base em peso para umidade com base em volume, não se considera as variações espaciais e temporais desta variável, o que poderá levar a erros de inferências da umidade do solo.

Um outro fator a ser considerado é a própria variabilidade espacial e/ou temporal da umidade. Portanto ao se multiplicar a umidade com base em peso com a densidade do solo pode-se estar multiplicando duas características que possuem variações diferentes. Isto poderá levar a uma alteração no modelo de variação de  $\theta$ , talvez somente uma alteração nas estimativas dos parâmetros, mas se estes atributos possuírem modelos de variabilidade diferentes, esta multiplicação, poderá, até mesmo, alterar o modelo de variabilidade de  $\theta$ .

REICHARDT (1985); KIEHL (1979); HILLEL (1982); BUCKMAN, BRADY (1976) citam outros métodos de determinação de umidade, como o bloco de resistência elétrica, que se baseia na resistência que a água oferece à passagem de uma corrente elétrica; tensiômetros, que medem a tensão com que a água está retida no solo; o método de moderação de nêutrons, que consiste

de uma fonte que emite nêutrons rápidos e estes, quando colidem com o hidrogênio do solo, perdem a velocidade e são contados por um detector de nêutrons lentos.

### 3.3. Densidade do solo

Através da densidade do solo é possível inferir sobre alguns aspectos, como o estado de compactação e porosidade, quantidade de matéria orgânica, entre outros.

SILVA et al (1986) pesquisaram a influência da compactação nas propriedades físicas de um Latossolo Roxo argiloso e de um Latossolo Vermelho-Amarelo textura média e verificaram que o último atingiu índices de densidades maiores, mas que a umidade na qual se atingiu o nível máximo de compactação foi maior para o Latossolo Roxo.

Este fato revela o interrelacionamento entre umidade e densidade do solo e a importância do conhecimento destes atributos do solo para o manejo adequado e melhor rendimento do substrato para fins agrícolas.

A determinação da densidade do solo consiste em se determinar a massa de um material sólido, contido em um volume  $V$ . O método do anel volumétrico e o método do torrão

impermeabilizado com parafina são os mais utilizados para esta determinação. O primeiro consiste em um cilindro de volume conhecido, que é cravado no solo, retirando-se o excesso de terra, leva-se a uma estufa a 105°C por um período acima de 24 horas e determina-se a densidade por:

$$D_g = \frac{m_s}{V} \quad (3)$$

onde:

$D_g$  - densidade do solo (g/cm<sup>3</sup>);

$m_s$  - massa de solo seco (g);

$V$  - volume da amostra (cm<sup>3</sup>).

O segundo método consiste na imersão de um torrão em parafina líquida, formando uma camada impermeável no torrão, quando seco. O volume é determinado pelo empuxo causado pelo torrão, quando imerso na água. O método não funciona bem para solos com estrutura fraca, como os arenosos.

Segundo KIEHL (1979), outros métodos podem ser utilizados na determinação de densidade do solo, como o método do torrão mergulhado em areia, que se baseia no volume de areia deslocado por uma amostra de solo em uma proveta sobre vibrações; o método da escavação, onde se relaciona o volume de um furo no solo, através de areia ou de aparelho próprio para se determinar tais volumes, e a terra retirada deste buraco seca e pesada. Estes métodos são utilizados com mais freqüência em

engenharia civil e possuem, em geral, uma menor precisão que os demais.

O método de emissão de radiação gama, citado por FERRAZ e MANSELL (1979) e REICHARDT (1985), também pode ser usado para a determinação da densidade do solo, necessitando, entretanto, de um laboratório especializado para sua determinação.

### **3.4. A estatística no estudo da variabilidade de solos**

#### **3.4.1. Estatística clássica**

Na estatística clássica (ou de Fisher) vários parâmetros são utilizados para se expressar a variabilidade de um conjunto de dados. Segundo BUSSAB e MORETTIN (1987), os momentos estatísticos mais utilizados para este fim são a variância ou desvio padrão, o coeficiente de variação e a amplitude total, por serem fáceis de se calcular e de se interpretar. Estes indicadores de variabilidade, entretanto, devem ser utilizados com certas restrições.

A variância só poderá ser usada, isoladamente, se forem comparados grupos de dados que possuam unidades e médias iguais. O coeficiente de variação indica o grau de variabilidade do parâmetro, não refletindo o seu significado

físico, mas é bastante utilizado para comparar propriedades que possuam unidades diferentes. A amplitude total é pouco utilizada, porque leva em consideração apenas os extremos; portanto, não se tem idéia do que ocorre entre estes valores.

É importante salientar também que nenhum destes momentos referem-se a posição das amostras no espaço, a dimensão da área e o número de amostras de que provêm.

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

SOKAL e ROHLF (1969) afirmam que neste ramo da estatística os valores esperados num dado ponto são estimados levando-se em consideração a média da população e a variação dos valores medidos em torno da média. Esta estimativa pressupõe também que as amostras sejam independentes e que possuam distribuição normal.

BLACKWELL (1975) observou que a estatística clássica assume que as variáveis em estudo não estão correlacionadas e que possuem a mesma distribuição quando analisadas em separado ou em conjunto.

Segundo CASSEL e BAUER (1975) e HEATH (1981), se a distribuição de frequência for diferente da normal deve-se realizar uma transformação de dados para a normalização e o uso da estatística clássica. MEAD e CURNOW (1983) mostram que a normalidade dos dados é um pré-requisito básico para o uso da estatística de Fisher. MENK e NAGAI (1983) apresentam uma estratégia para caracterizar a variabilidade de dados de solos com distribuição não normal através de transformação dos dados, com modelos de translação e afirmam que a estatística clássica só produz resultados confiáveis se a distribuição for normal.

Um teste para verificar se os dados possuem distribuição de probabilidades normal é feito através dos coeficientes de assimetria ( $C_s$ ) e curtose ( $C_r$ ). Em SPIEGEL (1977) e em COSTA NETO (1979) pode ser encontrada uma definição de assimetria e curtose como:

(i) assimetria é o grau de desvio, ou afastamento da simetria de uma distribuição, e é dada pela equação :

$$C_s = \frac{\bar{X} - M_o}{s} \quad (4)$$

onde:

$C_s$  é o coeficiente de assimetria;

$\bar{X}$  é a estimativa da média da população;

$M_o$  é a moda ;

$s$  é a estimativa do desvio padrão da população.

(ii) curtose mede o grau de achatamento de uma curva em relação a distribuição normal, e é dada pela equação:

$$C_r = \frac{M_4}{s^4} \quad (5)$$

onde:

$C_r$  é o coeficiente de curtose;

$M_4$  é o momento de quarta ordem em relação a média;

$s^4$  é o quadrado da variância.

Os valores de  $C_s=0$  e  $C_r=3$ , caracterizam uma distribuição de probabilidade normal. Desta forma, para se verificar se uma população possui distribuição normal, utiliza-se da teoria da decisão estatística (teste de hipóteses), testando se os valores de  $C_s$  e  $C_r$  são, estatisticamente, iguais a 0 e a 3, respectivamente.

As estimativas da média e do desvio padrão são dadas pelas seguintes fórmulas:

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n} \quad (6)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (7)$$

onde:

$\bar{X}$  é a média da amostra;

$X_i$  é o valor amostral no ponto  $i$ ;

s é o desvio padrão;

n é o tamanho da amostra.

Em COSTA NETO (1977), dentre outros textos básicos de estatística, encontra-se uma equação que possibilita calcular o número de amostras necessárias (n) para se estimar a média ( $\bar{X}$ ), com um determinado erro (e) e uma confiança (C), quando a população possuir distribuição normal.

$$n = \left( \frac{Z_{\alpha/2} \times S}{e} \right)^2 \quad (8)$$

onde:

$Z_{\alpha/2}$  é o valor da normal reduzida com um nível de significância de  $\alpha$ ;

$e$  é o erro da estimativa.

OLIVEIRA (1973) utilizou a estatística clássica para avaliar a variabilidade de um Latossolo Roxo e de um Latossolo Vermelho Escuro-orto e concluiu que as características físicas e morfológicas apresentam maior homogeneidade do que as químicas. A água retida a 1/3 e a 15 atm, a argila e o pH em água e em KCl apresentaram CV inferior a 10%. O cálcio, o magnésio, o potássio, a soma de bases e a saturação em bases apresentaram CV acima de 40%.

Este autor concluiu ainda que, em geral, bastam 5 amostras para estimar a média das características físicas e

mineralógicas. As características químicas requerem um número mais elevado de amostras, atingindo até 150 amostras.

NIELSEN et al. (1973), numa área de 150 ha, com 120 pontos de amostragem, encontraram um CV de 17% para umidade, correspondente a um potencial mátrico de -0,2 bar, na camada de 35-45 cm. CAMERON (1978) encontrou distribuição normal para umidade do solo na saturação.

CASSEL e BAUER (1975) pesquisaram a densidade do solo e a umidade a 15 atm em três tipos de solos e concluíram que a densidade possuía distribuição de probabilidade normal e que a percentagem de água retida a 15 atm possui, no geral, uma distribuição aproximadamente normal.

Estes mesmos autores pesquisaram o número de amostras necessárias para a estimativa destas variáveis, com um determinado erro. Concluíram também que ao reduzir o erro cometido em 50%, em alguns casos, seria necessário quadruplicar o número de amostras para a estimativa da média.

SILVA (1988) encontrou normalidade para dados de textura do solo a várias profundidades e utilizou a média, a variância e o coeficiente de variação para avaliar a variabilidade dos dados, pois não encontrou dependência espacial para os dados e estes possuíam distribuição aproximadamente normal.

CARVALHO (1991) pode verificar, em sua revisão bibliográfica, que os atributos físicos relacionados com a movimentação de água no solo, geralmente, apresentam valores de CV bastante altos e distribuição de probabilidades log-normal. Já os outros atributos físicos do solo apresentam, geralmente, valores relativamente baixos de CV e distribuição de probabilidades normal.

A estatística clássica não permite testar a independência entre as amostras; portanto, ao se aplicar a estatística clássica está se assumindo independência entre amostras sem testar.

#### **3.4.2. Geoestatística ("Teoria das Variáveis Regionalizadas")**

As técnicas geoestatísticas levam em consideração a distribuição espacial das medidas, o que permite definir o raio de correlação espacial entre amostras. MATHERON (1963, 1971) desenvolveu uma teoria chamada "Teoria das Variáveis Regionalizadas", onde descreveu os fundamentos da geoestatística. DAVID (1977) definiu variável regionalizada como sendo o valor de uma função  $F(Z)$ , de interesse, num ponto  $Z$  do espaço  $A$ .

### 3.4.2.1 Semivariância e Autocorrelação

As duas funções mais freqüentemente utilizadas na "Teoria das Variáveis Regionalizadas" para a determinação da dependência espacial ou temporal de variáveis são a autocorrelação e a semivariância.

A função autocorrelação encontra-se definida em VAUCLIN et al (1982), como sendo a covariância entre valores amostrados, em relação a variância da população:

$$\rho(h) = \frac{\text{cov}(Z(x), Z(x+h))}{s^2} \quad (9)$$

e  $\rho(h)$  é estimado por:

$$r(k) = \frac{(n-k) \times ((\sum Z_i Z_{i+k}) - (\sum Z_i \sum Z_{i+k}))}{(n-k) \times (n-k-1) s^2} \quad (10)$$

$r(k)$  é o valor da autocorrelação;

$k$  é a distância entre amostras;

$Z_i$  é o valor da amostra no i-ésimo local;

$n$  é o número de observações da transeção;

$s^2$  é a estimativa da variância da população.

O uso desta função no estudo da dependência espacial ou temporal de uma variável aleatória só é válida se a hipótese de estacionaridade de segunda ordem for atendida.

Um fenômeno é estacionário de 2ª ordem se a esperança da variável aleatória (V.A.) for igual a média e se a variância da V. A. for finita.

$$a) E(Z(x))=m \quad \forall x$$

$$b) C(h)= E(Z(x)Z(x+h))-m \text{ só depende de } h.$$

Uma V. A. é uma função intrínseca se :

$$a) E(Z(x))=m$$

$$b) \text{Var}(Z(x)-Z(x+h))=E((Z(x)-Z(x+h))^2)=2\gamma(h).$$

Nota-se que a hipótese intrínseca está contida na hipótese de estacionaridade de 2ª ordem. Estes conceitos de estacionaridade podem ser encontrados em DAVID (1977).

Em CLARK (1979) encontra-se uma definição da função semivariância para uma distância fixa como sendo a soma dos quadrados da diferença entre valores amostrados, separados por aquela distância, dividido por duas vezes o número de pares possíveis:

$$\gamma(h) = \frac{\sum (Z(x+h) - Z(x))^2}{2 \times N(h)} \quad (11)$$

onde:

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

$N(h)$  é o número de pares 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  $(\gamma)$ ;

(ii) maior abrangência de sua definição, pois, incluem-se as funções aleatórias com variância infinita. Portanto, a hipótese de estacionaridade de 2ª ordem não é um pré-requisito básico para o seu uso, levando-se em consideração apenas a hipótese intrínseca.

CLARK (1979) concluiu que em condições ideais para distância zero ( $h=0$ ) a semivariância é zero ( $\gamma=0$ ) e a semivariância cresce com o aumento da distância entre amostras, até atingir um patamar (sill), permanecendo constante a partir deste ponto.

O valor da semivariância média das amostras é um estimador, sem tendência, da semivariância média da população, assumindo que a hipótese intrínseca foi satisfeita (DOURADO NETO, 1989). SILVA (1988) argumentou que quando o patamar é atingido tem-se a variância da população e as amostras são independentes.

O ajuste do modelo de semivariograma aos dados experimentais é um procedimento de grande importância quando se

deseja fazer interpolações na área em estudo.

CLARK (1979) sugeriu que este ajuste fosse feito pelo observador, tentando passar a curva o mais próximo possível de todos os pontos observados. Já DOURADO NETO (1989) utilizou o método dos quadrados mínimos, pelo processo de regressão não linear, para o ajuste da curva.

Vários modelos são propostos para estes ajustes. CLARK (1979) e VIEIRA et al (1983), citam os mais comuns, que são:

(i) modelo linear

$$\gamma(h) = C_0 + B \times h \quad (12)$$

(ii) modelo esférico

$$\gamma(h) = C_0 + C \times \left( 1,5 \times \left( \frac{h}{a} \right) - 0,5 \times \left( \frac{h^3}{a^3} \right) \right), 0 \leq h \leq a \quad (13)$$

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

(iii) modelo exponencial

$$\gamma(h) = C_0 + C \times \left( 1 - \exp\left(-\frac{3 \times h}{a}\right) \right) \quad (14)$$

(iv) modelo de Gauss

$$\gamma(h) = C_0 + C \times \left(1 - \exp\left(-\frac{3 \times h^2}{a^2}\right)\right) \quad (15)$$

Os parâmetros  $C_0$ ,  $C+C_0$  e  $a$  são, respectivamente, efeito pepita, patamar e alcance da dependência espacial.

No ajuste de curvas dos semivariogramas aparece um valor finito para distâncias próximas de zero. DELHOME (1976), BURGESS e WEBSTER (1980) chamaram este valor de "nugget effect" (efeito pepita). Segundo DELHOME (1976) essa descontinuidade seria devida a erros de medidas e/ou a variabilidades a distâncias menores que a amostrada.

O alcance ( $a$ ) é definido como o limite de dependência e independência espacial, ou seja, para distâncias maiores que  $a$  pode-se usar a estatística clássica, levando-se em consideração apenas a hipótese de independência entre amostras.

Segundo VIEIRA et al (1983), a função semivariância assume papel importante na interpolação de valores, através da técnica de "Krigagem", que leva a erros mínimos na interpolação.

O escalonamento é uma técnica adotada para generalização

de parâmetros e é realizado através de fatores de escala. Os semivariogramas podem ser escalonados se existir uma proporcionalidade entre as médias e as variâncias dos grupos de dados, ou seja, se com o aumento do valor médio ocorrer um aumento da variância dos dados. Este escalonamento pode ser feito utilizando-se a variância dos dados como fator de escala, sendo que cada  $\gamma(h)$  é dividido por  $s^2$ .

Trabalhos como os de VACHAUD et al. (1985), VIEIRA et al (1991) e VIEIRA et al. (no prelo), destacam a importância do uso da técnica de escalonamento do semivariograma na "Krigagem" e na redução do tempo computacional.

VACHAUD et al (1985) afirmam que existe uma alta probabilidade de que um local com alta percentagem de umidade no solo em relação a outros locais, num dado tempo, tenha também percentagem maior que os demais locais em outro tempo, caracterizando a estabilidade temporal da umidade. Baseados neste aspecto, estes autores propuseram um método para caracterizar esta estabilidade temporal da umidade, para prever o comportamento do solo com um número reduzido de observações. Esta metodologia leva em consideração a proporcionalidade entre os dados de umidade no tempo.

VAUCLIN et al (1982) concluíram que quando a hipótese de estacionaridade de segunda ordem for satisfeita o

autocorrelograma e o semivariograma são instrumentos equivalentes para avaliar o grau de dependência espacial entre observações. Afirmaram também que se apenas a hipótese intrínseca for satisfeita, só é válido o uso da função semivariância.

### 3.5 Aplicação da variabilidade espacial em solos

No início do século alguns pesquisadores estavam preocupados com a variabilidade dos solos no espaço. Mas com o aparecimento da teoria de Fisher sobre controle local e casualização as pesquisas sobre variação espacial de solos foram reduzidas.

Porém, a partir do final da década de 70 as pesquisas nesta área tomaram novo impulso e atualmente várias delas vêm sendo desenvolvidas.

CATANI (1954) abordou aspectos relacionados com variabilidade espacial em fertilidade.

VAUCLIN et al (1982) encontraram, para temperatura do solo, dependência entre amostras separadas por 7 m na direção leste-oeste e por 3 m na direção norte-sul da área pesquisada.

PREVEDELLO (1987), estudando a variabilidade espacial de parâmetros de solos e planta em uma Terra Roxa Estruturada, encontrou relação de dependência espacial em 41 dos parâmetros pesquisados.

SILVA (1988) pesquisou alguns atributos físicos de um Latossolo Roxo e não encontrou estrutura de dependência espacial para a maioria dos parâmetros estudados. Ajustou um modelo linear somente para a porcentagem de silte e argila, às profundidades de 25 e 50 cm. BONI et al (1993) encontraram dependência espacial para a espessura dos horizontes Ap e B21 (acima de 60 m) em um Latossolo Roxo. Em pesquisas com argila dispersa em água, GUIMARÃES et al (1992) concluíram que a variável não apresentou correlação espacial para a distância estudada.

Para medidas de resistência à penetração, SILVA et al (1989) encontraram dependência espacial para resistência à penetração em um Latossolo Vermelho Escuro trabalhado com máquinas e implementos agrícolas. PERFECT et al. (1990) não encontraram estrutura de dependência espacial para solos com vegetação natural tipo campo, concluindo ser a variação casual.

VACHAUD et al (1985) apresentaram um estudo da estabilidade temporal e da variabilidade espacial das medidas de umidade do solo.

REICHARDT (1985) pesquisou a variabilidade espacial da umidade de um solo em três faixas, uma com alfafa, outra com centeio e outra de solo nu. A umidade foi determinada através de sonda de nêutrons, tendo observado uma forte relação de dependência espacial.

LIBARDI et al (1986) concluíram que a umidade, a textura e a densidade do solo (Terra Roxa Estruturada), revelavam estrutura de dependência espacial. Encontraram um alcance de 16 m para a umidade, 15m para a argila, 10m para a areia e 40 m para o silte.

DOURADO NETO (1989) ajustou modelos linear, exponencial, esférico e de Gauss para potencial mátrico e da solução do solo. Os dados de chuvas não apresentaram estrutura de variância e os de irrigação apresentaram estrutura e indicaram periodicidade. As conseqüências da variabilidade espacial no potencial mátrico também foram objeto de pesquisa de VILLAGRA (1988), que observou sua influência na curva característica de água no solo e na calibração da sonda de nêutrons.

Para armazenamento de água no solo, TURATTI (1990) pôde observar que a variabilidade do solo ao longo de uma transeção deve ser considerada nos estudos de armazenamento e aplicação em balanços hídricos.

Outro estudo sobre umidade de solo com sonda de nêutrons foi realizado por TURATTI et al (1990), que concluíram que a variabilidade espacial do solo é fator importante na calibração de sonda de nêutrons, a ponto de não permitir que o método forneça valores precisos e absolutos de umidade do solo, acarretando um baixo coeficiente de determinação da regressão.

VIEIRA et al. (1991) utilizaram um semivariograma escalonado para interpolar e mapear chuvas máximas diárias para cinco períodos de retorno no Estado de São Paulo e fizeram inferências sobre a suscetibilidade dos solos à erosão.

Com o objetivo de comprovar a eficiência da técnica de escalonamento para estimativas através da krigagem, VIEIRA et al (no prelo) verificaram que pequenas diferenças entre o uso do semivariograma escalonado e não escalonados eram observadas. Estes autores utilizaram-se da variância e do patamar de cada grupo de dados como fator de escala.

Em estudos sobre o número necessário de amostras para estimativas de médias com determinado erro, McBRATNEY e WEBSTER (1983) pesquisaram algumas propriedades de solos e fizeram uma comparação com a estatística clássica. Para o pH em água e considerando um erro padrão de 0,1 unidades, 15 amostras seriam suficientes para a estimativa da média pela geoestatística. Utilizando-se da estatística clássica, seriam necessárias 40

amostras para a estimativa da média com o mesmo erro.

Em BORGHI et al (1993) pode-se verificar a importância do número de amostras no estudo da variabilidade espacial. Para apenas 15 amostras de estabilidade de agregados não foi possível a definição de um modelo de estrutura de variabilidade espacial. Já com 45 amostras foi possível ajustar um modelo e definir a região de dependência espacial.

WEBSTER e BURGESS (1984) fizeram um estudo de vários tipos de malhas, para estimativas de propriedades de solos. Concluíram que se a variação for isotrópica (mesma variação em todas as direções) a malha quadrada se mostrou mais eficiente e para variações anisotrópicas (maior variação em uma direção) a malha retangular foi mais eficiente.

Trabalhos de revisão, abordando aspectos teóricos de geoestatística e relacionando com algumas propriedades de solos foram publicados por TRANGMAR et al (1985) e REICHARDT et al (1986).

### **3.6 Sonda de Nêutrons**

Os primeiros estudos sobre a utilização da técnica de dispersão de nêutrons para a determinação de umidade do solo

surgiram por volta de 1950.

Em CRUCIANI (1971) encontra-se a seguinte classificação dos átomos, de acordo com suas energias cinéticas:

- (a) rápidos - energia superior a 100 KeV;
- (b) intermediários - energia entre 100 KeV e 100 eV;
- (c) lentos - energia entre 100 eV e 0,025 eV;
- (d) moderados - energia ao redor de 0,025 eV.

O princípio de moderação de nêutrons para determinação da umidade do solo consiste em colocar no solo uma fonte de nêutrons rápidos, que, colidindo com elementos leves do meio, diminuem de velocidade e são contados por um detector de nêutrons lentos.

Segundo ainda o mesmo autor, entre os elementos leves do solo, o isótopo  $H^1$  do hidrogênio é o melhor e o mais eficiente moderador, porque seu núcleo é constituído de um próton, cuja massa é praticamente igual a de um nêutron.

GARDNER e KIRKHAM (1952) e MCHENRY (1963) concluíram que, como a moderação de nêutrons por outros elementos é bem menor quando comparada com o hidrogênio, e como no solo a maior parte deste elemento está contido nas moléculas de água, a contagem de nêutrons pode ser correlacionada, linearmente, com o teor de umidade do solo.

PHILLIPS et al (1960) confrontaram o método gravimétrico com o de moderação de nêutrons e concluíram que a utilização da sonda de nêutrons promove resultados estatisticamente mais precisos, sendo ainda mais vantajoso pela rapidez de leitura e por não destruir a estrutura natural do solo.

SOUZA et al (1979), a fim de estudar a propagação de erros na medida de fluxos de água no solo, instalaram 4 tubos de alumínio para dar acesso a uma sonda de nêutrons até a profundidade de 150 cm, para leitura de umidade do solo. Concluíram que, em estudos que envolvam dinâmica da água no solo, para que os erros sejam minimizados é necessário que os equipamentos de medida sejam instalados em profundidades que ocupem parte representativa de um horizonte genético do solo.

BELTRAME e TAYLOR (1980) apresentaram procedimentos para a normalização da sonda, calibração a campo e avaliação de erros aleatórios de contagem. Observaram também que o tipo de tubo de acesso afetou as curvas de calibração. Foram utilizados tubos de PVC e de alumínio, sendo que estes últimos se mostraram mais eficientes.

A facilidade de operação do instrumento, o pequeno tempo requerido para leituras, a boa precisão, o volume de solo explorado em cada leitura e a determinação não destrutiva, permitindo fazer leituras ao longo do tempo, são algumas das

vantagens citadas por BARRADA (1965), do método de moderação de nêutrons em relação a outros métodos.

GARDNER (1987) argumentou que as sondas de nêutrons são instrumentos recomendados para medida de umidade do solo, por possibilitarem medidas no mesmo ponto, em qualquer época.

CRUCIANI (1971) concluiu que a calibração da sonda de nêutrons é indispensável e deve ser realizada no campo. Encontrou ainda um coeficiente de correlação de 94,9%, na calibração da sonda.

GREACEN (1981) apresentou várias formas de calibração de sondas e concluiu que não são freqüentes os casos em que o coeficiente de correlação entre contagem da sonda e umidade sejam maiores que 0,95.

O método de determinação de umidade com a sonda de nêutrons, como os demais métodos, apresenta erros como os de calibração, os devido ao próprio instrumento e ao local. HAVERKAMP (1984) e BACCHI e REICHARDT (1990) apresentam uma série de procedimentos matemáticos para a determinação e quantificação destes erros.

Usando uma sonda de nêutrons para medir a umidade de um solo laterítico e através de análise de variância, VISWAMBHARAN

(1986) concluiu que o erro de predição da umidade por volume foi da ordem de 0,87%.

Segundo HODGSON e CHAN (1987), uma maior precisão no uso da sonda de nêutrons é conseguida à medida que a profundidade aumenta, pois a profundidades maiores o solo é mais homogêneo (no caso estudado) e não se perde nêutrons para a atmosfera. Afirmaram, também, que para uma precisão de  $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , três amostragens com a sonda são suficientes e viáveis para se estimar uma média. Este estudo foi realizado em uma área de 4 ha com um solo do tipo "Cracking Grey Clay".

Na calibração de uma sonda de nêutrons, TURATTI et al (1990) obtiveram um coeficiente de correlação ( $R^2$ ) de 0,86 e concluíram que isto ocorre devido à variabilidade espacial do solo, representada pela umidade e densidade. Verificaram ainda que, dependendo do tipo de solo, as sondas de nêutrons podem apresentar problemas na obtenção de valores absolutos de umidade, mas, mesmo assim, são instrumentos ideais para medidas de variações temporais de umidade.

CULLEY e MCGOVERN (1990) usaram o método de moderação de nêutrons na determinação de umidade e densidade do solo e afirmaram que o método foi eficiente para o solo argiloso.

## 4 - MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 - Solo

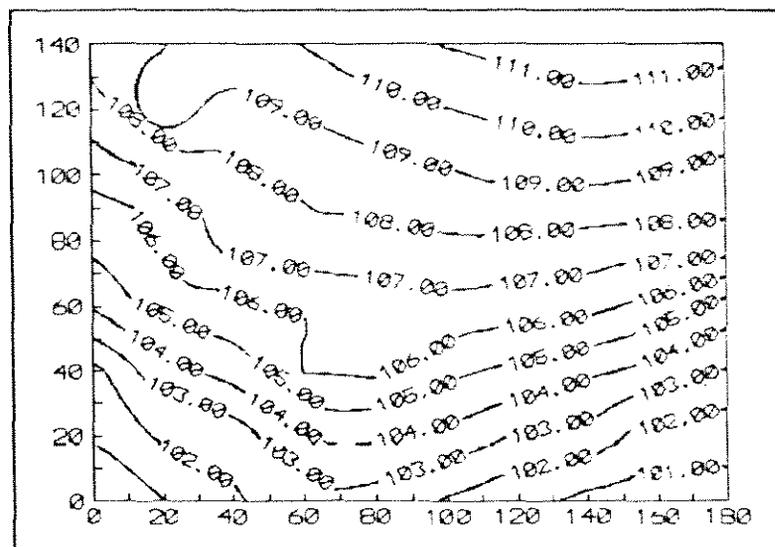
O solo foi classificado como Latossolo Roxo distrófico, A moderado, muito argiloso, unidade Barão Geraldo<sup>2</sup>, ocorrendo na área experimental localizada em Campinas, São Paulo, no Centro Experimental do Instituto Agronômico (Fazenda Santa Elisa) e apresenta a dimensão de 19200 m<sup>2</sup>, configurando um retângulo de 160 x 120 m.

Até 1975 a área recebeu culturas diversas e de 1975 a 1985 permaneceu em pousio. Após 1985 ficou sujeita a experimentações sobre variabilidade espacial de solos, onde culturas anuais (de inverno e de verão) foram instaladas no sistema de plantio direto. Por ocasião da realização deste experimento a área experimental estava com cultura de lab-lab.

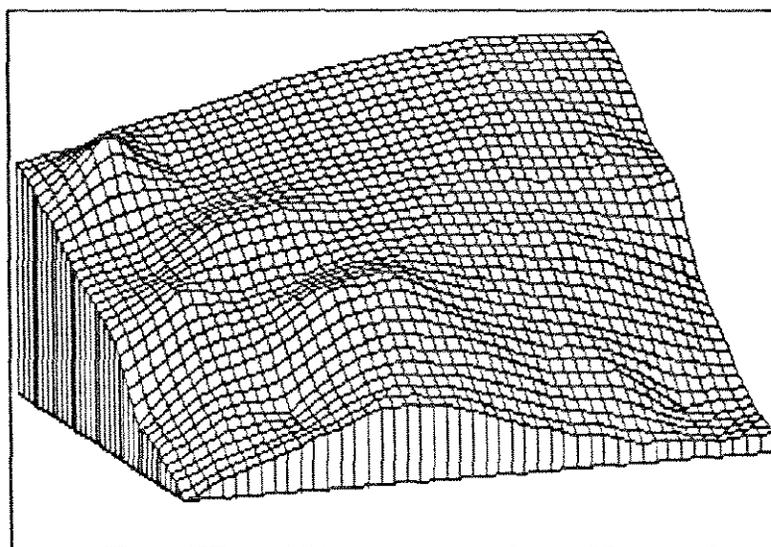
A representação esquemática da topografia da área experimental pode ser visualizada através do levantamento altimétrico (Figura 1) ou pela representação da Figura 2.

---

<sup>2</sup> Comunicação pessoal do Dr. JOÃO BERTOLDO de OLIVEIRA da Seção de Pedologia do I. A. C..



**Figura 1** - Levantamento altimétrico da área experimental localizada no Centro Experimental de Campinas - IAC - Campinas - SP.



**Figura 2** - Representação tridimensional da topografia da área experimental do Centro Experimental de Campinas - IAC - Campinas - SP (fator de escala em Z igual a 6).

#### 4.2 - Sonda de nêutrons

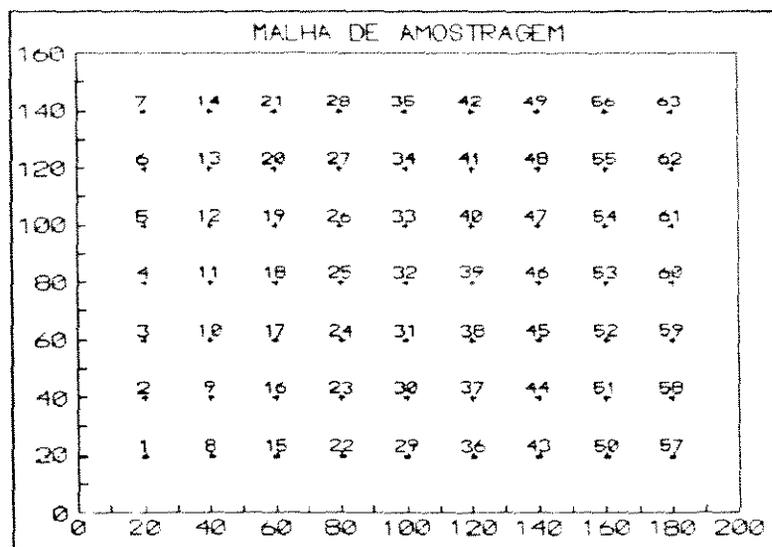
Foi utilizada uma sonda de nêutrons de fabricação francesa, SOLO 25S, com uma fonte de Americio-Berilo com 40mCi (1,48E3 Mbq) de atividade. A fonte possui 38,1 mm de diâmetro e as leituras podem ser feitas em tempo longo ou tempo curto.

Para dar acesso à sonda de nêutrons foram utilizados 63 tubos de alumínio, com diâmetro interno de 40 mm.

#### 4.3 - Esquema de amostragem

O esquema utilizado foi estruturado de modo a permitir uma amostragem sistemática, seguindo um arranjo cujo espaçamento entre pontos é de 20 m, totalizando 63 pontos, dispostos em 7 linhas e 9 colunas, formando uma malha quadriculada (grid) conforme a Figura 3.

As determinações de umidade, densidade do solo e as leituras com a sonda de nêutrons seguiram este arranjo. Para a caracterização das estruturas dos horizontes, foram utilizadas 10 trincheiras distribuídas em toda a área experimental e para as determinações de espessuras de horizontes utilizou-se 23 trincheiras.



**Figura 3** - Esquema de amostragem para umidade, densidade do solo e leituras com a sonda de nêutrons, na área experimental do Centro Experimental de Campinas - IAC - Campinas - SP.

#### 4.4 - Horizontes: designação, profundidade e estrutura

Para o reconhecimento dos horizontes do solo, suas profundidades e estruturas até 80 cm da superfície foram utilizadas 10 trincheiras distribuídas em toda área experimental, localizadas a 50 cm dos pontos 01, 04, 07, 15, 21, 32, 35, 57, 60 e 63 da malha de amostragem. A distância de 50 cm foi escolhida para não prejudicar as demais amostragens.

A demarcação dos horizontes foi realizada utilizando-se dos critérios convencionais adotados para descrições morfológicas de perfis de solos, dentre os quais os adotados pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

#### 4.5 - Determinações da umidade do solo

As amostragens para determinação da umidade tiveram início em fevereiro de 1992, quando da implantação da cultura, terminando em novembro de 1992, quando se efetuou a picagem do lab-lab, seguida da semeadura de milho na área experimental.

As determinações de umidade do solo foram realizadas na estação seca e chuvosa. Desta forma procurou-se uma adequada amplitude de variação desta variável. As amostragens foram feitas através do trado às profundidades de 30 e 60 cm, sendo que as amostras foram acondicionadas em latinhas de alumínio e levadas ao laboratório, onde se determinou o peso úmido de cada amostra. Estas permaneceram em estufa por um tempo superior a 24 h a 105°C e em seguida foram a uma balança de precisão, obtendo-se o peso seco. A relação entre a massa de água contida na amostra e a massa de solo seco resulta na umidade do solo com base em peso (Equação 1)<sup>3</sup>.

#### 4.6 - Determinação da densidade do solo

As 63 trincheiras para a determinação da densidade do

---

<sup>3</sup> As equações citadas no ítem Material e Métodos encontram-se no ítem Revisão Bibliográfica.

solo foram abertas a 50 cm de cada ponto de amostragem, a fim de não prejudicarem outras determinações de umidade realizadas durante a execução de experimento. Suas dimensões foram de aproximadamente 0,80 x 0,80 x 0,80 m, abertas no período de maio/92 a outubro/92.

A determinação da densidade do solo próxima a cada ponto de amostragem teve o objetivo de transformar a umidade com base em peso para umidade com base em volume e, também, por ter este parâmetro uma grande influência na calibração da sonda de nêutrons, conforme citam TURATTI et al (1990).

As coletas foram realizadas a 30 e 60 cm de profundidade, utilizando-se do método do anel volumétrico, acondicionando-se as amostras em recipientes para posterior secagem em estufa, durante  $\pm 36$  horas a 105°C, até peso constante, e posterior pesagem. A relação entre massa de solo seco e o volume do anel (Equação 3), fornece a densidade do solo de cada ponto da malha de amostragem.

#### **4.7 - Leituras com a sonda de nêutrons**

A instalação dos tubos de alumínio na área experimental seguiu o esquema da Figura 3. Através destes a sonda de nêutrons pode ser introduzida no solo às profundidades de 30 cm

e 60 cm, onde foram estabelecidas as leituras.

O procedimento adotado para os dias de leitura com a sonda foram:

a) Para a obtenção da contagem padrão do dia ( $N_s$ ), foram feitas 5 leituras com a fonte na blindagem, sendo a média destas a contagem padrão do dia; estas leituras foram realizadas no tempo longo do equipamento;

b) a sonda foi introduzida ao tubo de alumínio e a fonte acessada até as profundidades de 30 e 60 cm;

c) em seguida ativou-se o contador eletrônico de nêutrons lentos no tempo curto e obteve-se a contagem de nêutrons lentos no solo (N).

A relação entre N e  $N_s$  é chamada de razão de contagem (CR), cujo valor é utilizado juntamente com a umidade com base em volume ( $\theta$ ) para a elaboração das curvas de calibração do equipamento.

Tomando-se da CR como variável independente e  $\theta$  como variável dependente, através do método dos mínimos quadrados para a regressão linear elaborou-se a curva de calibração da sonda de nêutrons, com o objetivo de facilitar determinações de umidade do solo, conforme mostram TURATTI et al (1990).

#### 4.8 - Análise estatística

O tratamento estatístico para o estudo da variabilidade dos dados de umidade e densidade do solo foi realizado através da estatística "clássica" e da geoestatística, tendo sido também utilizada a metodologia de regressão linear para a calibração da sonda de nêutrons.

##### 4.8.1 - Estatística clássica

Os momentos estatísticos (média ( $\bar{X}$ ), variância ( $s^2$ ), desvio padrão ( $s$ ), coeficiente de variação (CV), mínimo (Min), máximo (Max), assimetria ( $C_s$ ) e curtose ( $C_r$ )) foram calculados para cada data de determinação da umidade do solo, nas profundidades de 30 cm e 60 cm, o mesmo valendo para a densidade do solo. Para a espessura de horizontes utilizou-se de 23 trincheiras no cálculo destes momentos.

As médias e desvio padrão foram calculados conforme as Equações 6 e 7. A relação entre o desvio padrão e a média resulta no Coeficiente de Variação.

Os coeficientes de assimetria e curtose foram obtidos através das Equações 4 e 5, tendo se verificado se estes coeficientes foram estatisticamente iguais a zero (0) e três (3), respectivamente. Utilizou-se, para fins de teste, de uma

tabela encontrada em JONES (1969), onde se obtém os limites superiores e inferiores dos coeficientes de assimetria e curtose, com os quais se aceita a hipótese de que a distribuição da variável em estudo seja normal com um nível de significância de 5%.

Após verificada a hipótese de normalidade da variável em estudo dimensionou-se o tamanho da amostra necessária para se estimar a média de umidade e de densidade do solo, conforme Equação 8, pois a densidade do solo é um parâmetro trabalhoso de ser amostrado, principalmente quando se faz amostragem em profundidade, necessitando-se da abertura de trincheiras. Desta forma, procura-se estabelecer um número reduzido de amostragem.

#### **4.8.2 - Geoestatística**

A análise de variabilidade dos dados pela geoestatística foi feita pela função semivariância, dada pela Equação 11.

Os procedimentos adotados nos cálculos geoestatístico para a umidade do solo em cada data e em cada profundidade de amostragem e para a densidade do solo em cada profundidade foram:

- a) Uso de softwares geoestatísticos desenvolvidos por VIEIRA et al (1983) para o cálculo das semivariâncias;
- b) Uso da variância dos dados como fator de escala para

a verificação da existência de proporcionalidade dos dados e posterior elaboração de um semivariograma escalonado. Verifica-se proporcionalidade quando os semivariogramas escalonados permitem o ajuste de um único modelo para a variável em estudo;

c) Verificar, dentre os modelos de semivariogramas linear, esférico, exponencial e de Gauss (Equações 12, 13, 14 e 15), qual o que melhor se ajustou ao semivariograma experimental ou ao modelo experimental escalonado;

d) determinação das estimativas dos parâmetros do modelo através do software Jack-Knifing (VIEIRA et al, 1983).

A variabilidade espacial dos dados foi demonstrada através dos semivariogramas experimentais e escalonados, onde a região de dependência espacial é definida pelo alcance (a).

Com a finalidade de mapear as variáveis em estudo para a visualização das isolinhas e gráficos tridimensionais de umidade e densidade do solo, utilizou-se do método de interpolação denominado "kriging", citado por BURROUGH (1985). Esta interpolação necessita do modelo do semivariograma para a resolução do sistema de krigagem e, segundo VIEIRA et al (1991), o modelo de semivariograma escalonado assume grande importância no cálculo do sistema kriging, reduzindo o tempo computacional.

A malha interpolada para elaboração dos mapas de

isolinhas e os tridimensionais foi de 5 x 5m, tendo utilizado-se de um programa computacional comercial para a elaboração dos mapas.

#### 4.8.3 - Calibração da sonda de nêutrons

Para a calibração da sonda de nêutrons foi utilizada a regressão linear (método dos mínimos quadrados), onde a variável dependente foi a umidade do solo e a variável independente foi a razão de contagem de nêutrons lentos. A regressão para cada profundidade foi realizada considerando-se:

- a) Dados de todas as datas de leitura com a sonda de nêutrons (modelo geral);
- b) Dados de cada data, isoladamente;
- c) Vinte e cinco pontos por data na região de dependência espacial (modelo dependente geral);
- d) Vinte e cinco pontos inclusos na região de dependência para cada data;
- e) Quatro pontos situados na região de independência por data, totalizando doze pontos ( modelo independente geral).

Tais considerações foram feitas com o objetivo de verificar a influência da variabilidade espacial na calibração da sonda de nêutrons.

Para a adequação do modelo ajustado dos valores de  $\theta$  em função de CR, utilizou-se o coeficiente de determinação como fator de aceitação ou rejeição do modelo ajustado, porque, devido ao grande número de amostras o teste de F pode acusar significância, mesmo com um valor relativamente baixo de coeficiente de determinação ( $R^2 < 0,70$ ) e os valores determinados através deste modelo não seriam representativos da umidade do solo.

Foram utilizados os softwares QPRÓ e Sanest para o ajuste das curvas de calibração da sonda de nêutrons.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 - Horizontes: designação, profundidade e estrutura

O perfil do solo até a profundidade de 80 cm revelou a presença de quatro horizontes, designados, na seqüência vertical, como: Ap, AB, B21 e B22, com transições: de Ap para AB ondulada e clara; de AB para B21 plana e clara e de B21 para B22 plana e gradual.

No Quadro 1 encontram-se os momentos estatístico para as espessuras de horizontes, referentes a um conjunto de 23 trincheiras. O limite inferior do B22 encontrava-se acima de 80 cm de profundidade em toda a área, não sendo possível determinar sua espessura.

A relação entre média e desvio padrão dos horizontes indicam a não existência de uma proporcionalidade entre as espessura dos horizontes, sendo, portanto, a variação das espessuras independente uma da outra.

**Quadro 1** - Momentos estatísticos para espessuras dos horizontes Ap, AB e B21 de um Latossolo Roxo localizado no Centro Experimental de Campinas - IAC - Campinas - SP.

Hor.	Momentos estatísticos*							
	Média	Var.	D. P.	C. V.	Min	Max	Ass.	Curt.
Ap	5,696	3,342	1,828	32,10	3,00	9,00	0,241	1,655
AB	19,57	18,85	4,342	22,19	12,00	28,00	0,149	2,070
B21	25,52	17,99	4,241	16,62	16,00	32,00	-0,73	2,519

\* Média(cm); Var(cm<sup>2</sup>); D.P.(cm); Min(cm); Max(cm)

Os coeficientes de variação revelam a maior variabilidade de espessura para o horizonte Ap, seguido pelo horizonte AB e o que apresentou menor variabilidade foi o B21. Isto ocorre apesar do Ap apresentar a menor amplitude total de espessura, confirmando, portanto, a impossibilidade de se analisar a variabilidade de um atributo sem a análise conjunta dos momentos e sem o conhecimento físico do fenômeno.

Através dos coeficientes de assimetria e curtose, verifica-se uma distribuição de probabilidades aproximadamente normal para a espessura do horizonte Ap e distribuição normal para AB e B21, pois, conforme JONES (1969), para um tamanho de amostra (n) igual a 23 e uma confiança de 95%, os limites de aceitação da hipótese de normalidade dos dados são de  $\pm 0,903$  para a assimetria e de 1,81 a 4,74 para a curtose. Portanto, levando-se em consideração esta hipótese, pode-se utilizar a estatística clássica na análise dos dados.

Em algumas trincheiras pôde-se observar que o limite inferior dos horizontes AB e B21 coincidiu com as profundidades de 30 e 60 cm, respectivamente, que foram as profundidades de amostragem da densidade e da umidade do solo.

Com relação à estrutura, de uma maneira geral o horizonte Ap apresentou uma estrutura granular média forte e o horizonte AB composta de blocos médios e granular grande forte. O horizonte B21 revelou uma estrutura composta de blocos médios e granular grande e forte e o B22 microgranular (aspecto maciço poroso).

Na parte superior da malha de amostragem (Figuras 1 e 3), observou-se um Latossolo Roxo típico, com uma macroestrutura do B22 de aspecto maciço poroso que se desfez em microgranular; não se detectou presença de cerosidade nos horizontes. Ao se caminhar para a parte mais baixa da área experimental verificou-se uma ligeira tendência de transição de Latossolo Roxo para Terra Roxa Estruturada, com a estrutura do horizonte B tendendo a blocos com cerosidade fraca, pouca e descontínua.

Uma visualização geral das espessuras dos horizontes e do tipo de estrutura em cada horizonte da unidade experimental é apresentada no Anexo 1.

## 5.2 - Momentos estatísticos da umidade e da densidade do solo

### 5.2.1 - Umidade do solo

As amostragens para determinação de umidade do solo foram realizadas nos dias 4 de fevereiro, 16 de maio, 2 de junho, 22 de julho, 1 de setembro, 29 de setembro, 15 de outubro, 27 de outubro, 10 de novembro e 24 de novembro, totalizando 10 tomadas, a 30 e 60 cm de profundidade, conforme dados apresentados detalhadamente no Anexo 2. Os momentos estatísticos para cada amostragem encontram-se no Quadro 2.

Observa-se que a umidade do solo nas datas de amostragem teve uma amplitude de 17,30% a 38.15% e de 18.00% a 38.09% para 30 e 60cm de profundidade, respectivamente. O coeficiente de variação indica uma variabilidade aproximadamente constante da umidade em todas as datas, ou seja, houve uma redução da variância dos dados com a redução da média. Portanto, pode-se observar uma proporcionalidade na variabilidade da umidade do solo. Observa-se ainda uma tendência de valores de umidade superiores, mas com menor variação (menor CV), para a profundidade de 60cm, em relação a 30cm. Esta maior variabilidade da umidade a 30cm de profundidade pode ser devida a influência de práticas agrícolas e do sistema de manejo do solo, que atualmente é o plantio direto.

**Quadro 2** - Momentos estatísticos da variável umidade do solo ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ), nas profundidade de 30 e 60cm, nos meses de fevereiro, maio, junho, julho, setembro, outubro e novembro de 1992.

Datas	Prof	Momentos estatísticos*							
		Media	Var	D. P.	C. V.	Min.	Max.	Ass.	Curt
04/02	30	31,05	7,122	2,669	8,59	22,32	38,15	-0,06	3,92
	60	31,65	6,325	2,515	7,94	26,54	38,09	0,58	3,12
16/05	30	28,71	5,911	2,431	8,47	23,47	34,97	0,63	3,14
	60	29,45	6,725	2,593	8,81	18,00	35,65	-1,04	7,76
02/06	30	27,91	6,679	2,584	9,26	21,37	35,01	0,52	3,88
	60	29,24	5,246	2,290	7,83	24,16	35,98	0,70	3,85
22/07	30	25,01	3,926	1,982	7,92	21,19	31,02	0,58	3,97
	60	26,15	3,632	1,958	7,48	22,05	31,12	-0,01	2,87
01/09	30	22,30	3,569	1,889	8,47	17,30	27,88	0,09	3,33
	60	24,11	3,295	1,815	7,53	18,92	29,00	-0,12	3,67
29/09	30	26,59	4,872	2,207	8,30	19,30	33,46	0,05	4,88
	60	27,79	5,109	2,260	8,13	23,33	35,66	0,66	4,09
15/10	30	29,14	4,624	2,150	7,38	22,90	37,11	0,59	5,54
	60	29,94	4,358	2,088	6,97	25,92	35,74	0,36	3,29
27/10	30	24,51	5,916	2,432	9,92	17,82	29,91	-0,22	3,14
	60	26,23	3,447	1,857	6,58	24,51	34,22	0,54	3,40
10/11	30	28,80	4,346	2,085	7,24	22,15	34,96	0,01	4,45
	60	30,26	3,964	1,991	6,58	26,03	35,06	0,43	2,87
24/11	30	30,96	5,588	2,364	7,64	24,33	35,79	-0,11	2,89
	60	31,15	4,229	2,056	6,60	26,88	37,58	0,47	3,60

\* Prof(cm); Média( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); Var( $(\text{cm}^3/\text{cm}^3)^2$ ); D.P( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); C.V.(%); Min( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); Max( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

Os coeficientes de assimetria e curtose indicam que a umidade do solo segue uma distribuição normal, pois, praticamente para todas as datas, seus valores estão entre  $\pm 0,554$  para a assimetria e 2,13 e 4,27 para a curtose, conforme a tabela encontrada em JONES (1969), com n igual a 63 amostras. Estes intervalos de confiança para a assimetria e a curtose

indicam que existe uma probabilidade de 95% de que a distribuição de umidade do solo seja normal. A exemplo de resultados também obtidos por CASSEL e BAUER (1975) e LIBARDI et al (1986).

Considerando-se apenas a hipótese de normalidade da variável, seriam necessárias 28 amostras de solo para se estimar a média de umidade, cometendo-se um erro máximo de 1% no valor de umidade e a um nível de significância de 5%.

Em virtude da tendência de uma heterogenidade, observada na descrição morfológica do solo, para fins de comparação da variabilidade existente entre toda a área e as regiões consideradas LR típico e transição de LR para TE, calculou-se a média, D.P., Var. e C.V., da linha superior e inferior da malha, em três datas de determinação de umidade, escolhidas aleatoriamente dentre as 10 datas de leituras. Os resultados desta comparação encontram-se no Quadro 3.

Verifica-se que há uma tendência, principalmente da camada de 30 cm, em apresentar uma maior variação em relação à média na faixa considerada de transição de LR para TE, seguida pela área toda e finalmente pela faixa de LR. A área total sofre uma ponderação e fica na faixa intermediária de variação, tendendo para o LR que é encontrado na maior parte da área.

A 60 cm de profundidade observam-se valores praticamente iguais para todos solos, ou seja, nesta profundidade a distribuição da água no solo não variou entre as faixas, mas mesmo assim nota-se uma tendência do LR apresentar uma variabilidade menor em relação ao solo de transição.

**Quadro 3** - Comparação entre a variabilidade da umidade do solo ocorrida em toda a área experimental com a variabilidade das regiões de LR e transição de LR e TE, através de momentos estatísticos.

Datas	Solo	Prof*	Momentos estatísticos*			
			Médias	Var.	D.P.	C.V.
16/05	A. Total	30	28,71	5,911	2,431	8,47
	LR	30	28,18	3,079	1,755	6,23
	LR/TE	30	28,20	9,890	3,145	11,15
	A. Total	60	29,45	6,725	2,593	8,81
	LR	60	28,31	2,159	1,469	5,19
	LR/TE	60	31,96	2,550	1,597	4,99
01/09	A. Total	30	22,30	3,569	1,889	8,47
	LR	30	22,54	2,200	1,483	6,58
	LR/TE	30	21,56	7,962	2,822	13,09
	A. Total	60	24,11	3,295	1,815	7,53
	LR	60	23,95	2,077	1,441	6,02
	LR/TE	60	24,79	4,140	2,035	8,21
10/11	A. Total	30	28,80	4,346	2,085	7,24
	LR	30	28,69	5,617	2,370	8,26
	LR/TE	30	28,77	11,100	3,332	11,58
	A. Total	60	30,26	3,964	1,991	6,58
	LR	60	29,49	2,801	1,673	5,67
	LR/TE	60	31,04	2,102	1,450	4,67

\* Prof(cm); Média( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); Var. ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )<sup>2</sup>; D.P( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); C.V.(%)

O fato da TR apresentar maior variabilidade que o LR pode estar relacionado com o grau de desenvolvimento do solo, sendo que o Latossolo Roxo, por possuir um grau de desenvolvimento maior que a TR, apresenta-se com uma maior homogeneidade de suas características físicas, proporcionando uma distribuição mais

uniforme da água no solo. Além disto nos LR/TE acredita-se que seja uma transição onde as características são ora TR ora LR aumentando o CV.

Observa-se ainda, por estes dados, que as diferenças de CV entre a faixa de LR e LR/TE não é muito grande, mas espera-se um aumento nesta diferença quando for comparado um solo bem desenvolvido com solos pouco desenvolvidos, como por exemplo latossolos com podzólicos ou cambissolos. Este fato foi verificado por HARRADINE citado por OLIVEIRA (1973), que estudou a variação de propriedades físicas e químicas de quatro séries de solos e relacionando-as com o estágio de desenvolvimento de perfis, tendo observado que solos de origem recente variam, usualmente, em muitas de suas propriedades, mais do que aqueles considerados mais velhos ou maduros.

#### 5.2.2 - Densidade do solo

Os momentos estatísticos da densidade do solo podem ser visualizados através do Quadro 4 e os dados de densidade do solo encontram-se no Anexo 2.

Segundo KIHTEL (1979) a densidade para solos argilosos deve estar entre  $1,0 \text{ g/cm}^3$  e  $1,25 \text{ g/cm}^3$ . Os dados médios da

densidade do solo a 30 e 60 cm revelam valores nesta faixa, indicando, portanto, que a área experimental, segundo este critério, não apresenta sintomas de compactação.

**Quadro 4** - Momentos estatístico para a variável densidade do solo ( $\text{g/cm}^3$ ), nas profundidade de 30 e 60cm.

Prof*	Momentos estatísticos*							
	Média	Var.	D.P.	C.V.	Min.	Max.	Ass.	Curt.
30	1,15	0,005	0,070	6,08	0,93	1,35	-0,08	4,43
60	1,09	0,004	0,061	5,62	0,97	1,25	0,24	2,75

\* Prof(cm); Média( $\text{g/cm}^3$ ); Var. ( $(\text{g/cm}^3)^2$ ); D.P. ( $\text{g/cm}^3$ ); C.V. (%); Min( $\text{g/cm}^3$ ); Max( $\text{g/cm}^3$ ).

Observou-se uma tendência de valores numericamente superiores para densidade do solo a 30 cm de profundidade. Este fato pode ser explicado pelo tipo de estrutura observada a essa profundidade, predominantemente em blocos (horizontes AB ou B21), enquanto que a 60 cm há um predomínio da estrutura microgranular (horizonte B22). Pode ser também porque a porosidade total seja maior a 60 cm, em função da maior microporosidade. A 30 cm o maior efeito de raízes aumenta a macroporosidade.

O coeficiente de variação para as duas profundidades demonstra a pequena variabilidade existente neste parâmetro, indicando a necessidade de poucas amostras coletadas, para a representação da densidade do solo; pode-se observar também que existe uma proporcionalidade entre as profundidades de

amostragem, pois ocorre uma redução da variância dos dados com a redução da média.

Assim como para a umidade do solo, observa-se que os coeficientes de assimetria e curtose da densidade do solo estão próximos dos limites do intervalo de confiança de normalidade da variável com 95% de confiança, tendo, portanto, uma distribuição de probabilidades aproximadamente normal. Estes resultados estão de acordo com os encontrados por CASSEL e BAUER (1975), KACHANOSKI et al (1985) que também encontraram distribuição normal para os valores de densidade do solo.

Levando-se em consideração a normalidade dos dados, 8 amostras, ou seja, 8 trincheiras seriam necessárias para se estimar a média da densidade, com um erro de  $0,05 \text{ g/cm}^3$  e uma confiança de 95%. KACHANOSKI et al (1985) sugerem 7 amostras para estimar a densidade média do solo por eles pesquisado, com uma confiança de 95% e um erro de estimativa de 5%. Este solo era uma mistura de "Typic Agriboralls" e "Typic Haploboralls" e a amostragem foi realizada ao longo de uma transeção de 46 m em uma área de vegetação natural.

Assim como para a umidade do solo, é apresentada no Quadro 5 uma comparação entre a variabilidade da densidade do solo em toda área experimental com a variabilidade da linha superior e inferior da malha de amostragem, através de alguns

momentos estatísticos.

Através deste quadro pode-se observar que, da mesma forma como o ocorrido para a umidade, a faixa de LR foi a que apresentou a menor variabilidade, demonstrada através do coeficiente de variação, principalmente a 30 cm. HARRADINE citado por OLIVEIRA (1973) obteve correlação inversa entre maturidade do solo e variabilidade da densidade do solo.

**Quadro 5** - Comparação entre a variabilidade da densidade do solo ocorrida em toda área experimental com a variabilidade de um LR e um LR transição para TE, através de alguns momentos estatísticos.

Solo	Prof*	Momentos estatísticos*			
		Média	Var.	D. P.	C. V.
A. Total	30	1,149	0,005	0,070	6,08
LR	30	1,104	0,004	0,061	5,50
LR/TE	30	1,173	0,011	0,105	8,97
A. Total	60	1,094	0,004	0,061	5,62
LR	60	1,058	0,001	0,036	3,39
LR/TE	60	1,148	0,003	0,053	4,64

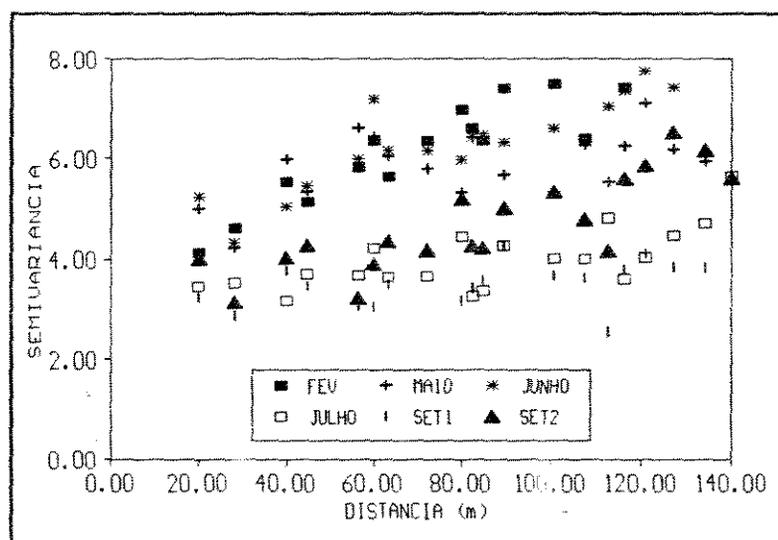
\* Prof(cm); Média(g/cm<sup>3</sup>); Var.((g/cm<sup>3</sup>)<sup>2</sup>); D.P.(g/cm<sup>3</sup>); C.V.(%); Min(g/cm<sup>3</sup>); Max(g/cm<sup>3</sup>).

### 5.3. Semivariogramas médios para umidade e densidade do solo

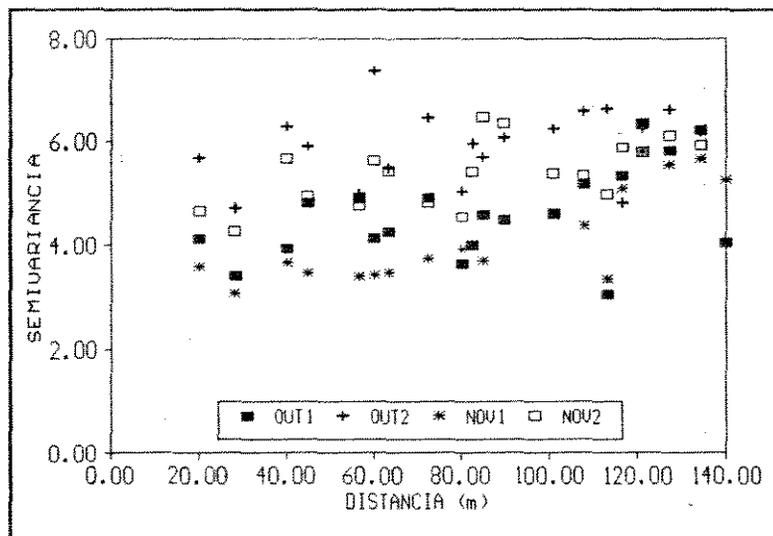
Os valores das semivariâncias médias para cada característica com o respectivo número de pares utilizados para este cálculo encontram-se no Anexo 3.

### 5.3.1 - Umidade do solo

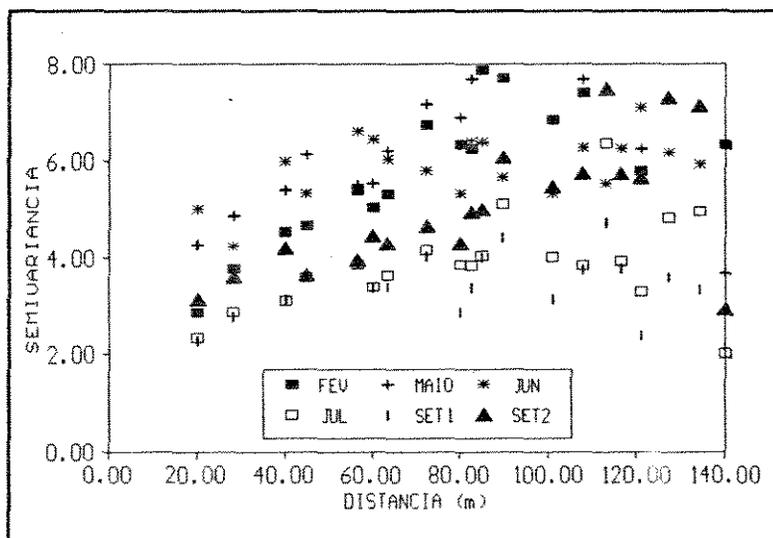
Foram elaborados, com os valores das semivariâncias médias, os semivariogramas experimentais de cada data e cada profundidade de amostragem. Estes semivariogramas estão representados pelas Figuras 4 e 5 para 30 cm e Figuras 6 e 7 para 60 cm de profundidade, confirmando a proporcionalidade existente entre as datas de determinação de umidade, também verificada através dos momentos estatísticos.



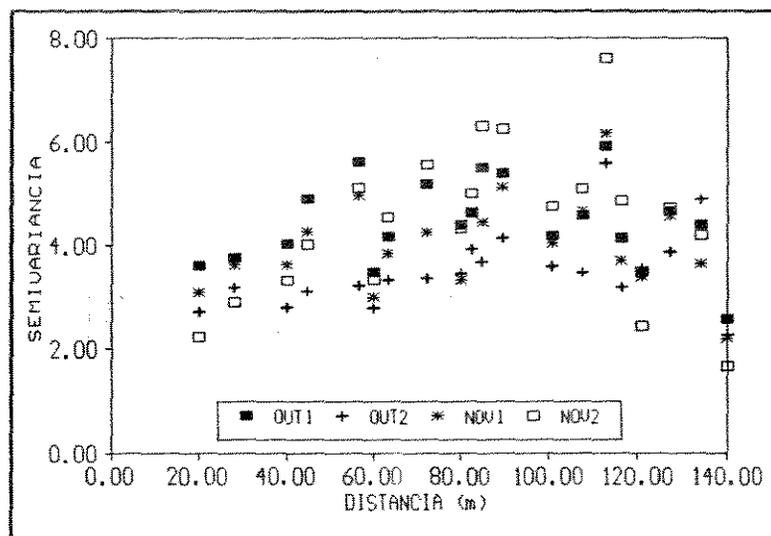
**Figura 4-** Semivariograma experimental para a umidade do solo a 30 cm de profundidade em 04/02, 16/05, 01/06, 22/07, 01/09 e 29/09 de 1992.



**Figura 5-** Semivariograma experimental para a umidade do solo a 30 cm de profundidade em 15/10, 27/10, 10/11 e 24/11 de 1992



**Figura 6-** Semivariograma experimental para umidade do solo a 60 cm de profundidade em 04/02, 16/05, 01/06, 22/07, 01/09 e 29/09 de 1992.



**Figura 7-** Semivariograma experimental para a umidade do solo a 60 cm de profundidade em 15/10, 27/10, 10/11 e 24/11 de 1992.

Analisando as Figuras 4 a 7 e relacionando-as com os valores de variâncias do Quadro 2, pode-se observar que os maiores valores de semivariâncias coincidem com as datas que apresentam maior variância ( $s^2$ ) dos dados.

Tendo em vista a proporcionalidade existente para umidade do solo, optou-se pelo escalonamento das semivariâncias; desta forma foi possível estabelecer um único semivariograma para a umidade a 30 cm e outro para umidade a 60 cm. Utilizou-se a variância de cada grupo de dados como fator de escala, a exemplo de VIEIRA et al (1991), que fez uso da variância das chuvas máximas diárias como fator de escalonamento dos

semivariogramas.

Com os valores de semivariâncias escalonadas e através da visualização dos semivariogramas experimentais, observou-se que o modelo que mais se ajustou aos dados foi o exponencial; o efeito pepita ( $C_0$ ) de 0,4; o patamar ( $C_0+C$ ) de 1,00 e o alcance ( $a$ ) de 80 m caracterizam o modelo ajustado para a umidade a 30 cm de profundidade e o  $C_0$  igual a 0,25;  $C_0+C$  igual a 1,1 e o  $a$  igual a 80 m são os parâmetros para o modelo exponencial de variabilidade espacial a 60 cm de profundidade. Desta forma, resultam as Equações 16 e 17:

- para 30 cm:

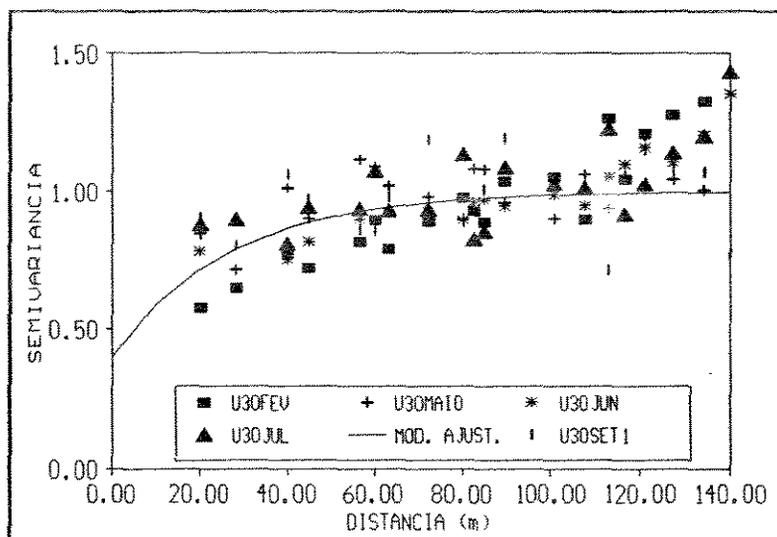
$$\gamma(h) = 0,4 + 0,6 \times \left(1 - \exp\left(-\frac{(3 \times h)}{80}\right)\right) \quad (16)$$

- para 60 cm:

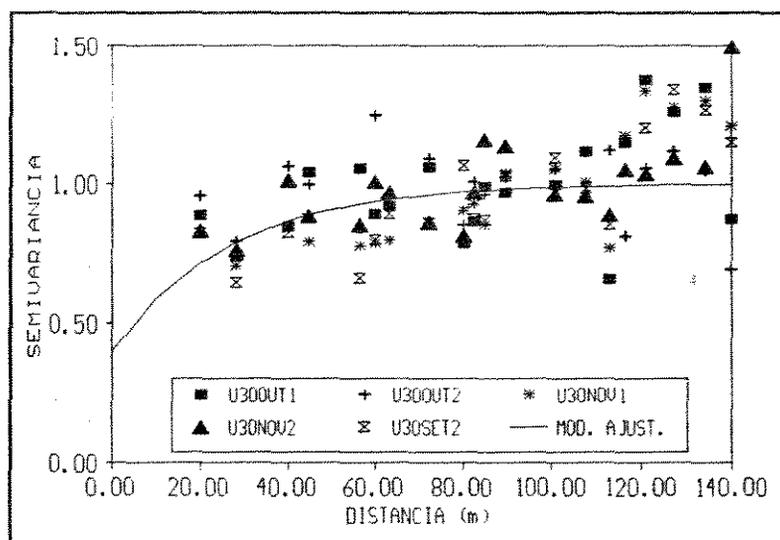
$$\gamma(h) = 0,25 + 0,85 \times \left(1 - \exp\left(-\frac{(3 \times h)}{80}\right)\right) \quad (17)$$

As figuras 8, 9, 10 e 11 mostram os semivariogramas escalonados para 30 e 60 cm, com os respectivos modelos ajustados.

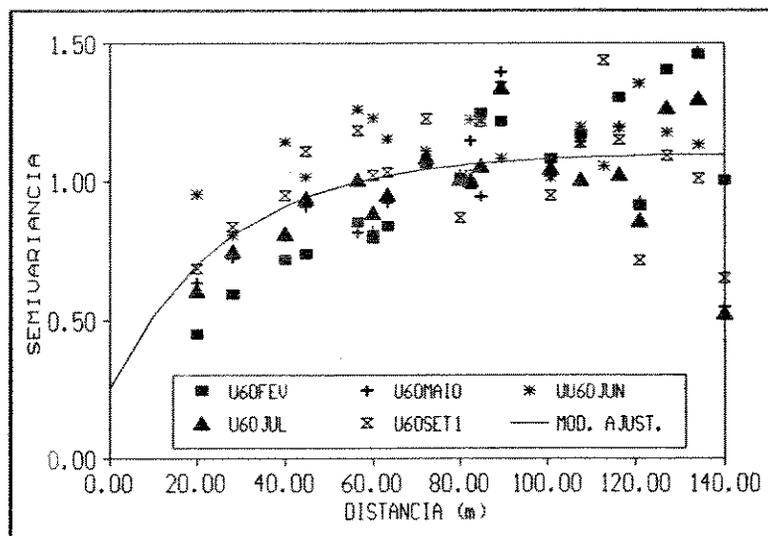
Apesar da pequena diferença dos parâmetros ( $C_0$  e  $C$ ) do modelo a 30cm e 60 cm, optou-se pelo ajuste de um modelo para cada profundidade, objetivando-se a melhoria da precisão das estimativas das umidade em cada profundidade.



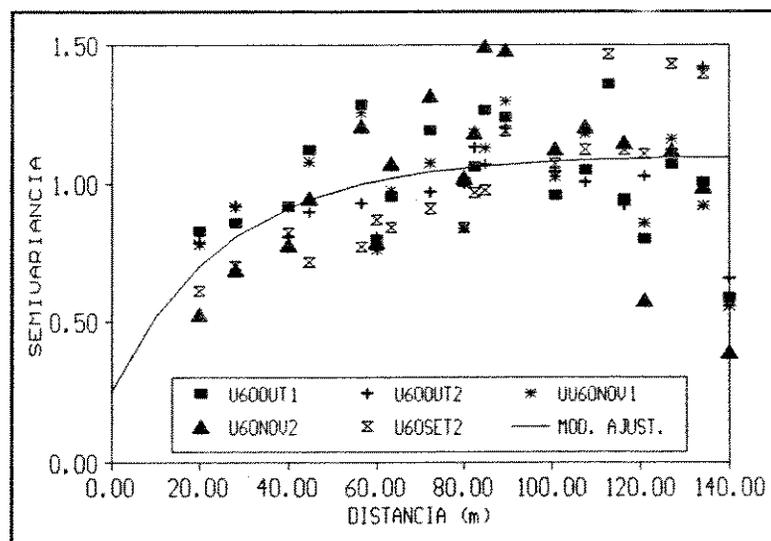
**Figura 8-** Semivariograma experimental escalonado e modelo ajustado para a umidade do solo a 30 cm de profundidade em 04/02, 16/05, 01/06, 22/07, 01/09 de 1992 (Equação 16).



**Figura 9 -** semivariograma experimental escalonado e modelo ajustado para a umidade do solo a 30 cm de profundidade em 29/09, 15/10, 27/10, 10/11 e 24/11 de 1992 (Equação 16).



**Figura 10-** Semivariograma experimental escalonado e modelo ajustado para a umidade do solo a 60 cm de profundidade em 04/02, 16/05, 01/06, 22/07 e 01/09 de 1992 (Equação 17).



**Figura 11-** Semivariograma experimental escalonado e modelo ajustado para a umidade do solo a 60 cm de profundidade em 29/09, 15/10, 27/10, 10/11 e 24/11 de 1992 (Equação 17).

O alcance de 80 m para a umidade determina a amplitude de dependência espacial entre as amostras. Aquelas separadas por distâncias maiores que 80 m não estão correlacionadas e, neste caso, a hipótese de independência entre amostra, imposta pela estatística clássica, é atendida.

É possível que, pelas próprias características pedológicas, a variabilidade espacial das características de uma TE seja maior que a de um LR; portanto a TE, em princípio, deve ter um alcance de dependência menor que um LR. LIBARDI et al (1986) encontraram 16 m de alcance para umidade de uma TE.

Na região de dependência espacial definida acima do alcance de 80 m o uso das técnicas da geoestatística para estimativas de valores médios de umidade do solo leva a resultados mais precisos do que usando a estatística clássica. Isto se deve ao fato de os dados amostrados receberem uma ponderação na estimativa da média, conforme sua distância (posição) na região de dependência espacial. Estes ponderadores são obtidos através da resolução do sistema de equações "kriging".

O modelo único para cada profundidade permitiu fazer estimativas de umidade de todas as datas de amostragem, pelo método da krigagem. O uso de apenas um modelo leva a uma economia, em termos de tempo computacional, e esta técnica

produz resultados semelhantes aos encontrados quando se usa os modelos individuais não escalonados.

Considerando-se as justificativas apresentadas no item "Estatística clássica", sobre heterogenidade observadas na descrição morfológica da área experimental, calculou-se a variabilidade das duas linhas inferiores e superiores da malha, a fim de se comparar com a variabilidade da área total, determinados anteriormente. Estes valores calculados mostraram que, da mesma forma já discutida na estatística clássica, em geral, as semivariâncias do LR foram menores em relação a toda área e ao LR/TE, revelando este último, geralmente, valores maiores.

A comparação entre as semivariâncias só foi feita para distâncias próximas à origem, devido ao número reduzido de amostras para o LR e o LR/TE.

### 5.3.2 - Densidade do solo

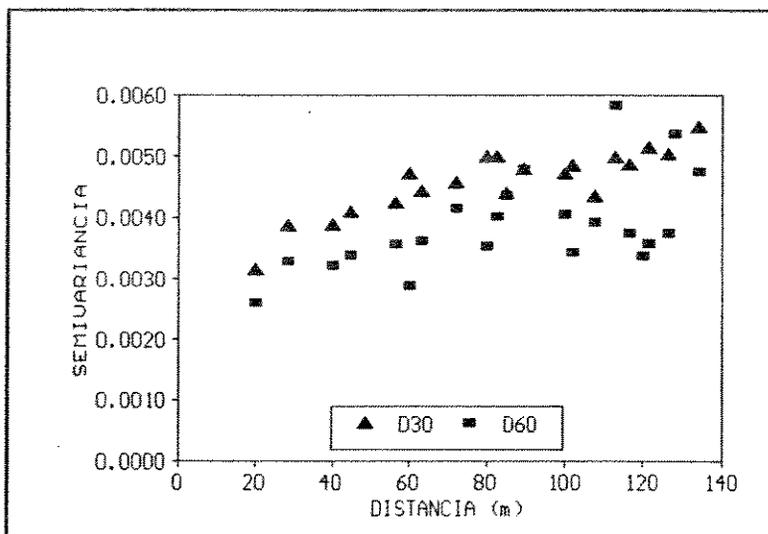
A Figura 12 mostra o semivariograma experimental para a densidade do solo a 30 e a 60 cm de profundidade. Observa-se a ocorrência da proporcionalidade entre as profundidades para a densidade do solo, indicando que existe uma tendência ao

aumento da variância com o aumento da média de densidade. Nesta unidade experimental observou-se que a densidade média do solo reduziu conforme a profundidade de amostragem.

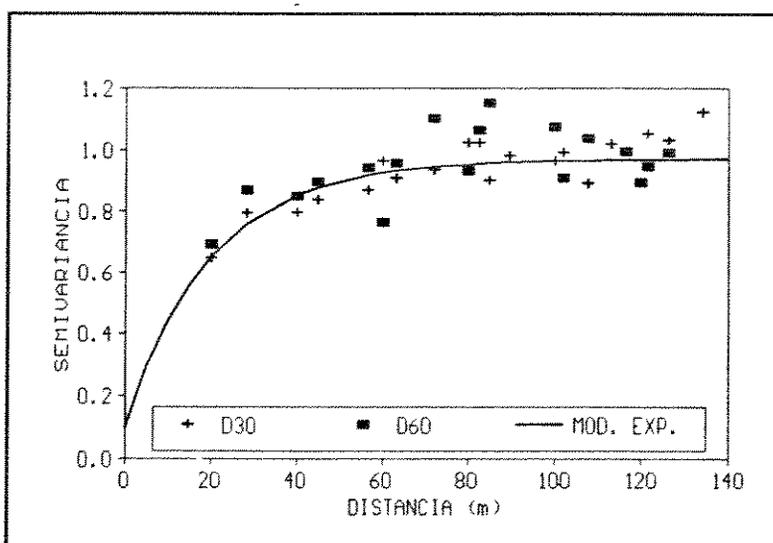
Utilizando-se da variância dos valores de densidade do solo como fator de escala do semivariograma experimental, em conformidade com o que foi feito para umidade do solo, obteve-se o semivariograma escalonado para esta variável, como mostra a Figura 13 e ajustou-se um modelo exponencial aos dados experimentais escalonados. Os parâmetros para este modelo foram:  $C_0=0,1$ ;  $C_0+C=0,97$  e  $a=70$  m , sendo a Equação 18 o modelo matemático da variabilidade espacial da densidade do solo.

$$\gamma(h) = 0,1 + 0,87 \times \left(1 - \exp\left(-\frac{(3 \times h)}{70}\right)\right) \quad (18)$$

A Equação 18 juntamente com o semivariograma experimental escalonado estão representados graficamente na Figura 13.



**Figura 12** - Semivariograma da densidade do solo a 30 e 60cm de profundidade - valores experimentais



**Figura 13** - Semivariograma escalonado e modelo ajustado para densidade do solo a 30 e 60 cm de profundidade.

O alcance de 70 m para a variabilidade espacial da densidade do solo revela que tal atributo possui uma amplitude de correlação espacial de 70 m e, da mesma forma que a umidade do solo, a densidade estimada na região de dependência espacial é mais precisa com o uso das técnicas geoestatísticas.

No cálculo das semivariâncias para a densidade do solo também se pôde verificar menor variabilidade para o LR em relação à transição entre LR e TE e a área experimental como um total. Estes cálculos também foram realizados considerando-se as duas linhas inferiores da malha como transição de LR para TE e as duas linhas superiores como um LR.

A krigagem foi realizada para esta variável na estimativa de pontos não amostrados e posterior elaboração de mapas de isolinhas.

#### **5.4. Isoumidades e Isodensidades**

##### **5.4.1 - Isoumidades**

Com o modelo de semivariograma ajustado aos dados e utilizando-se da metodologia de interpolação denominada krigagem, estimou-se a umidade do solo em uma malha de 5x5m e elaborou-se os mapas de isoumidades para cada dia e profundidade de amostragem (Figuras 14 a 33).

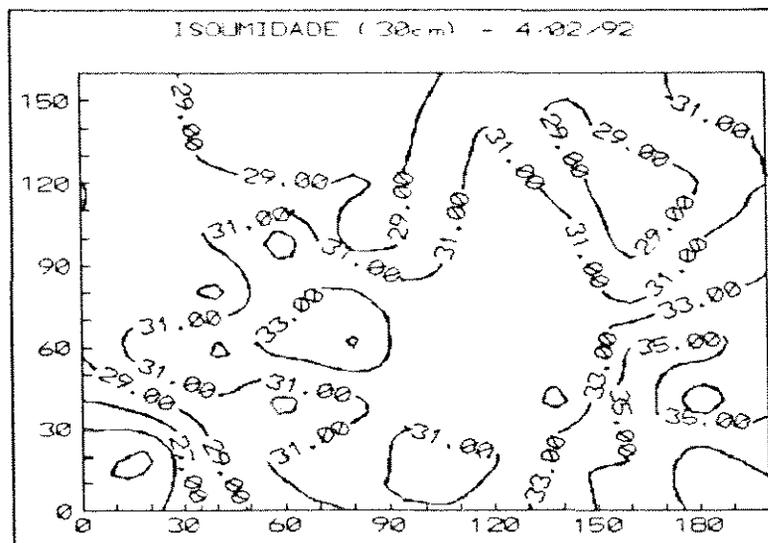


Figura 14 - Isolinhas da umidade do solo a 30 cm de profundidade em 04/02/92.

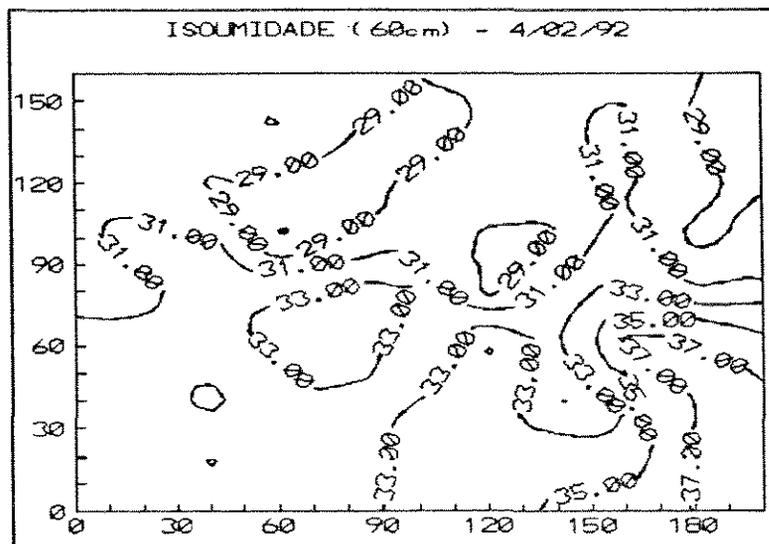
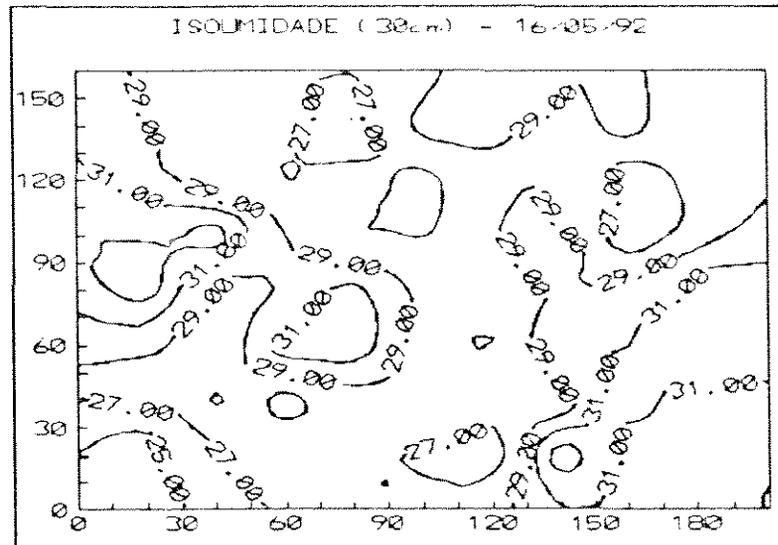
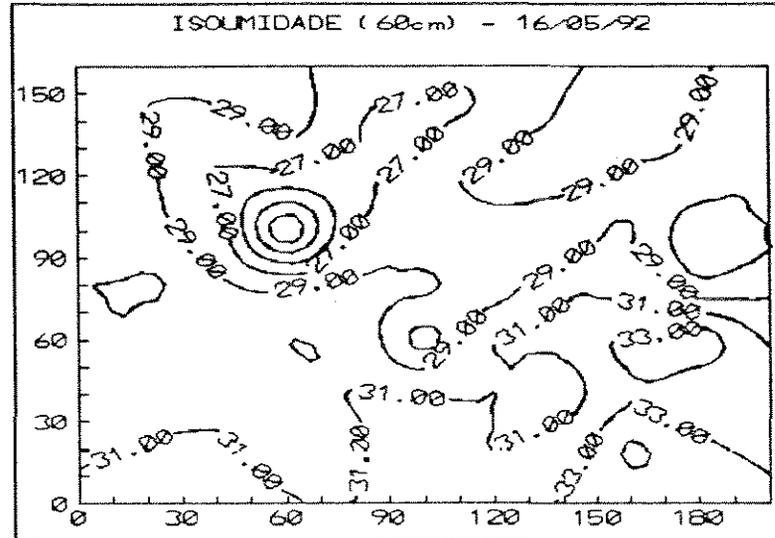


Figura 15 - Isolinhas de umidade do solo a 60 cm de profundidade em 04/02/92.



**Figura 16** - Isolinhas de umidade do solo a 30 cm de profundidade em 16/05/92.



**Figura 17** - Isolinhas de umidade do solo a 60 cm de profundidade em 16/05/92.

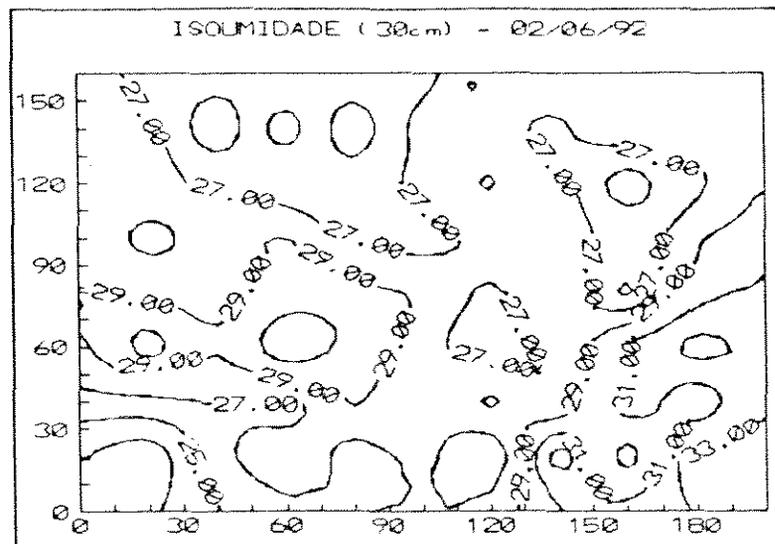


Figura 18 - Isolinhas de umidade do solo a 30 cm de profundidade em 02/06/92.

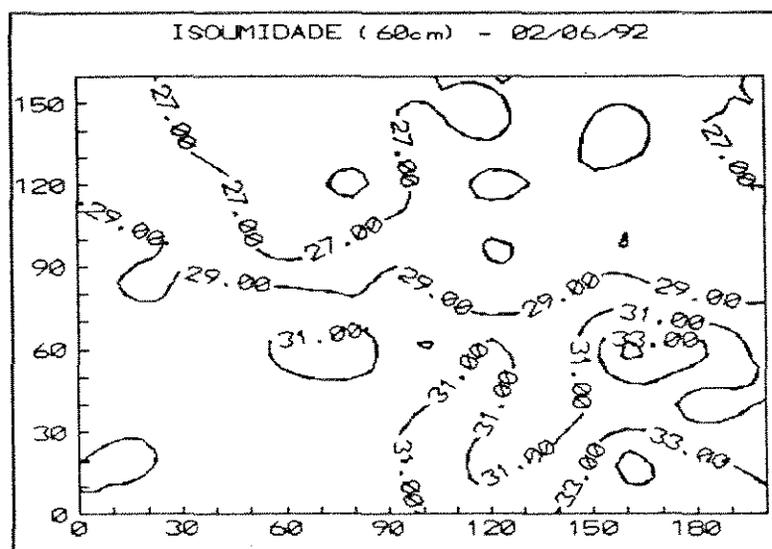


Figura 19 - Isolinhas de umidade do solo a 60 cm de profundidade em 02/06/92.

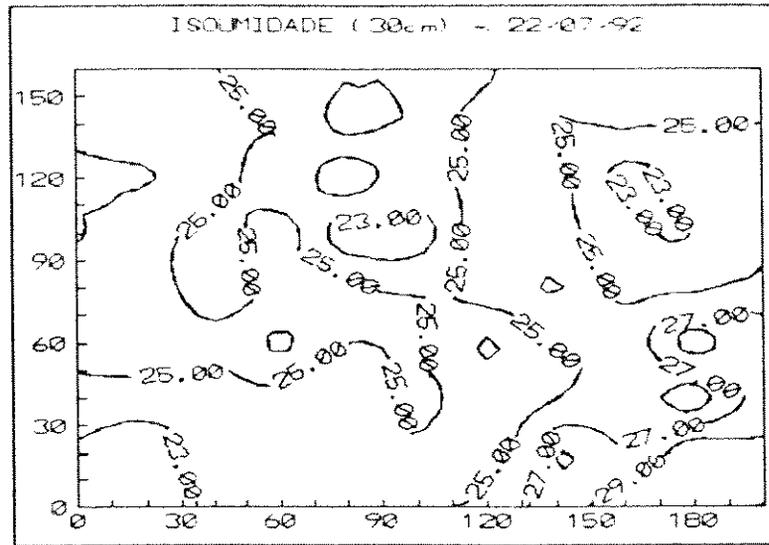


Figura 20 - Isolinhas de umidade do solo a 30 cm de profundidade em 22/07/92.

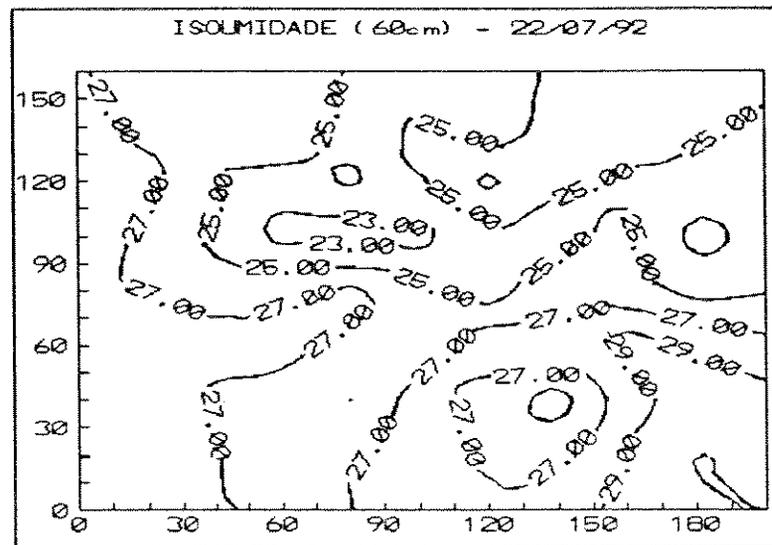


Figura 21 - Isolinhas de umidade do solo a 60 cm de profundidade em 22/07/92.

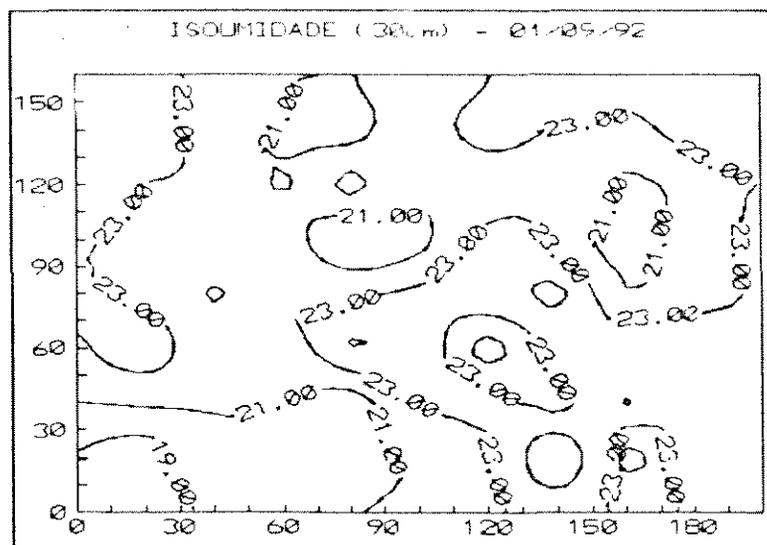


Figura 22 - Isolinhas de umidade do solo a 30 cm de profundidade em 01/09/92.

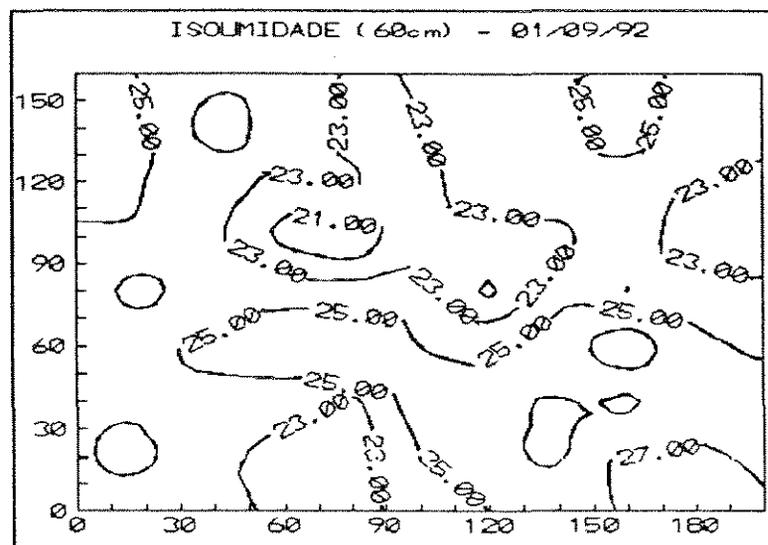


Figura 23 - Isolinhas de umidade do solo a 60 cm de profundidade em 01/09/92.

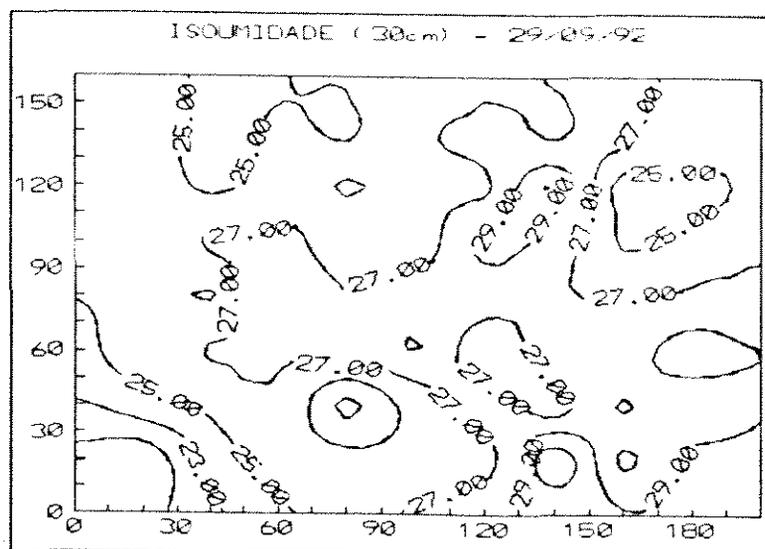


Figura 24 - Isolinhas de umidade do solo a 30 cm de profundidade em 29/09/92.

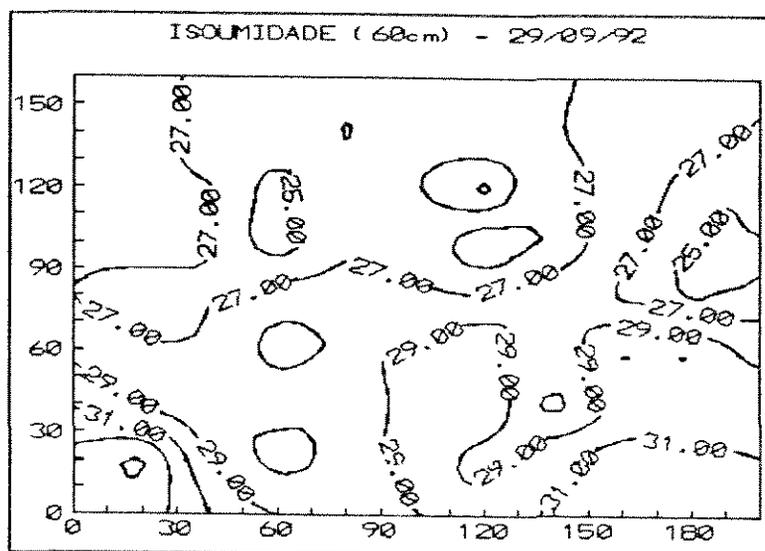
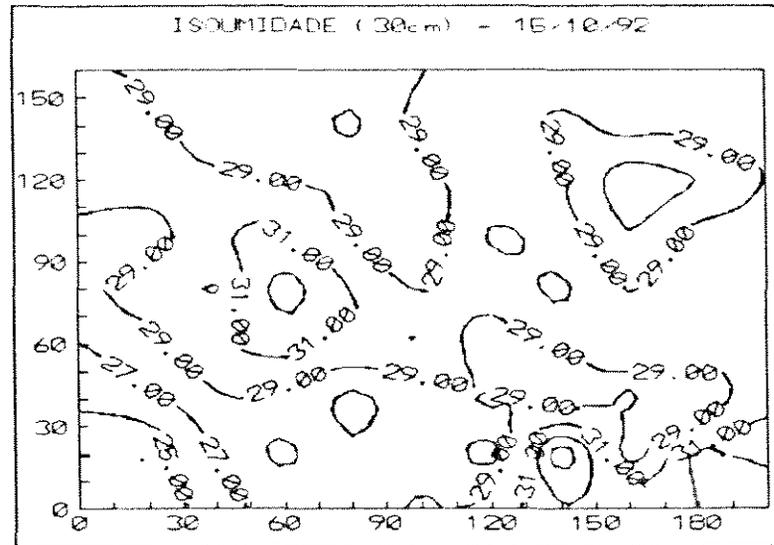
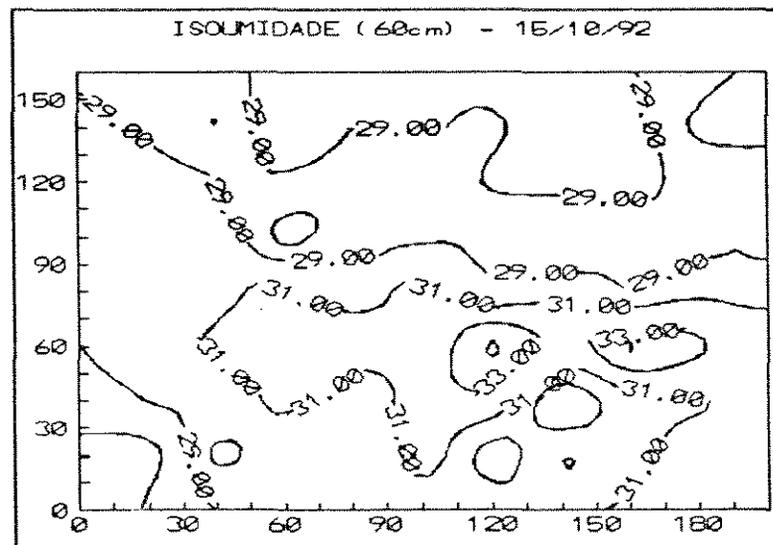


Figura 25 - Isolinhas de umidade do solo a 60 cm de profundidade em 29/09/92.



**Figura 26** - Isolinhas de umidade do solo a 30 cm de profundidade em 15/10/92.



**Figura 27** - Isolinhas de umidade do solo a 60 cm de profundidade em 15/10/92.

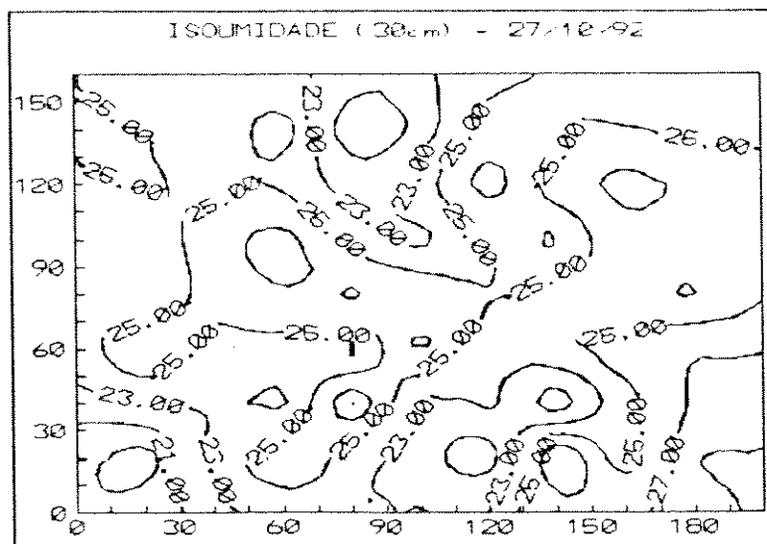


Figura 28 - Isolinhas de umidade do solo a 30 cm de profundidade em 27/10/92.

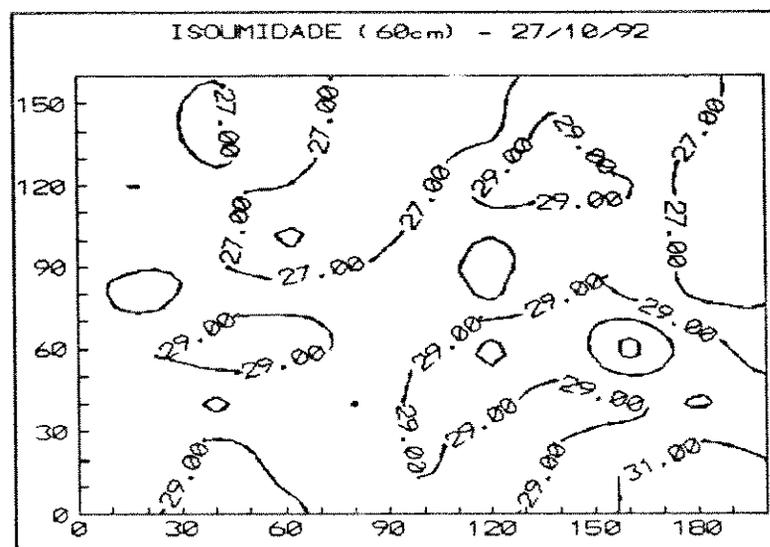


Figura 29 - Isolinhas de umidade do solo a 60 cm de profundidade em 27/10/92.

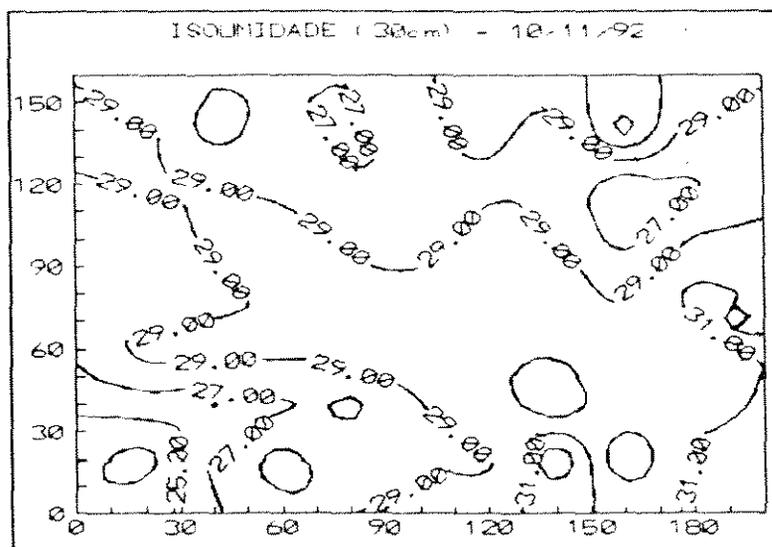


Figura 30 - Isolinhas de umidade do solo a 30 cm de profundidade em 10/11/92.

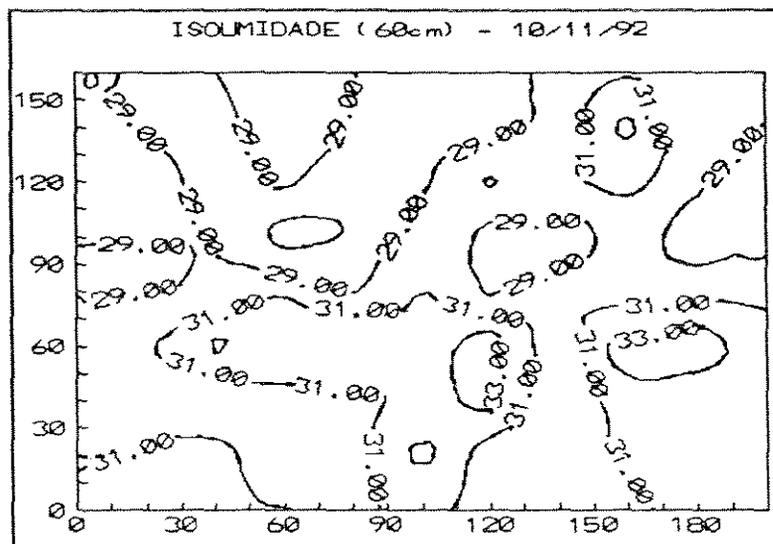


Figura 31 - Isolinhas de umidade do solo a 60 cm de profundidade em 10/11/92.

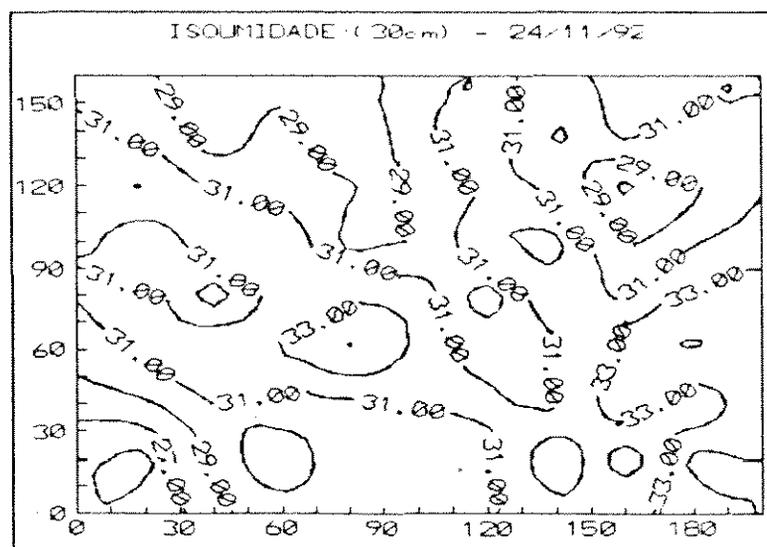


Figura 32 - Isolinhas de umidade do solo a 30 cm de profundidade em 24/11/92.

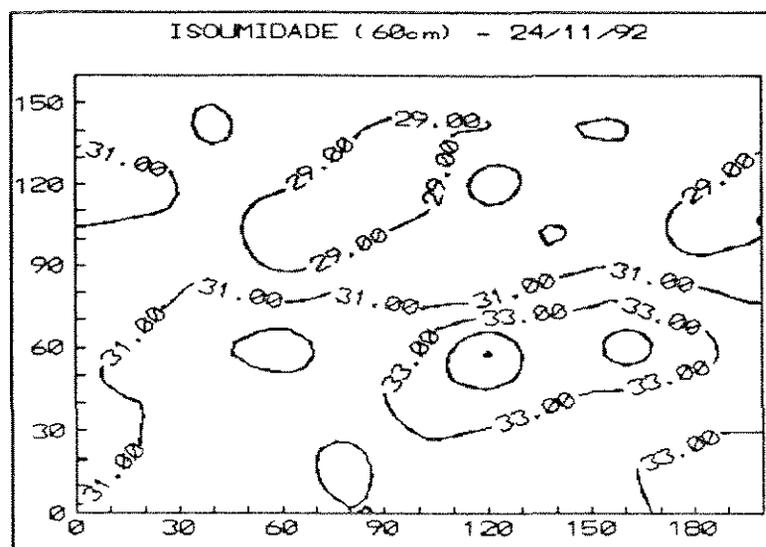


Figura 33 - Isolinhas de umidade do solo a 60 cm de profundidade em 24/11/92.

A disposição das isolinhas entre as profundidades de amostragem são semelhantes, sendo, no entanto, a variação a 60 cm menor do que a 30 cm; isto pode ser verificado através da concentração de linhas nas figuras das duas profundidades.

Comparando-se as datas de amostragem, pode-se verificar uma semelhança entre os mapas de isoumidades. Tal fato se deve à proporcionalidade existente entre as datas de amostragem, fato já mencionado anteriormente.

A amplitude de variação das isolinhas nas datas de maior umidade (4 de fevereiro, 29 de setembro, 15 de outubro, 27 de outubro, 10 de novembro e 24 de novembro) é menor em relação às datas de menor umidade (16 de maio, 01 de junho e 22 de julho).

Observa-se também que a umidade do solo determina isolinhas, que ora estão na direção X e ora estão na direção Y da malha de amostragem, verificando-se, portanto, uma isotropia dentro da área. Este fato vem corroborar com a opção feita previamente pelo semivariograma médio como um bom estimador da umidade do solo na área experimental.

As Figuras 34 a 53 mostram a variação espacial da umidade nas datas e profundidades de determinação. Através destes mapas

pode-se ter uma visualização geral da variação da umidade do solo na área experimental. Verificam-se coincidências de picos de umidade nas mesmas coordenadas, em todas as datas de amostragem. Este fato vem confirmar a estabilidade temporal da umidade do solo citada por VACHAUD et al (1985). Por estas figuras é possível observar também a menor variação da umidade do solo a 60 cm de profundidade.

#### 5.4.2 - Isodensidades

Nas Figuras 54 e 55 estão representadas as isolinhas de densidade do solo, podendo-se observar uma pequena variação da densidade do solo tanto a 30 como a 60 cm. Os valores de densidade a 30 cm são superiores, se comparados aos obtidos a 60 cm, provavelmente em função do tipo de estrutura predominante às duas profundidades, e também devido ao fato de a 60 cm a massa de solo estar menos perturbada pelas práticas agronômicas.

Os mapas de isolinhas (Figuras 54 e 55) e os mapas tridimensionais da variação da densidade ( Figuras 56 e 57) mostram, respectivamente, uma maior concentração de linhas e um maior número de picos e depressões a 30 cm de profundidade; portanto, pode-se visualizar a maior variabilidade da densidade do solo a 30 cm de profundidade.

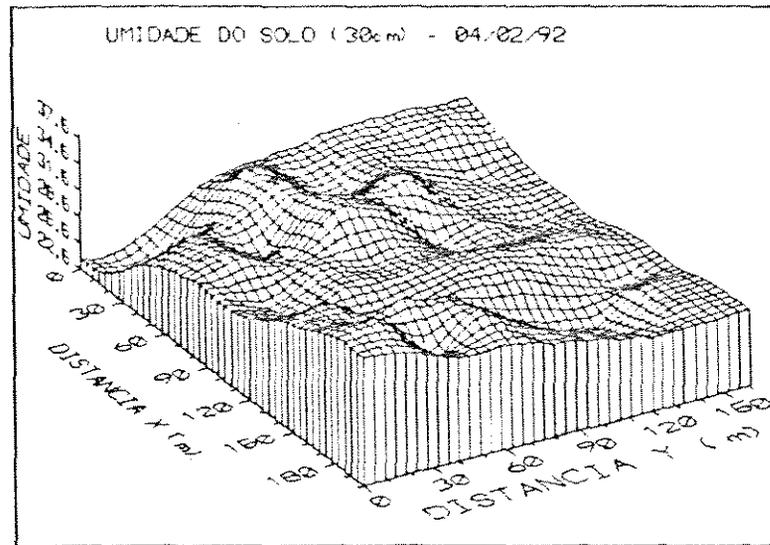


Figura 34 - Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 30 cm de profundidade em 04/02/92.

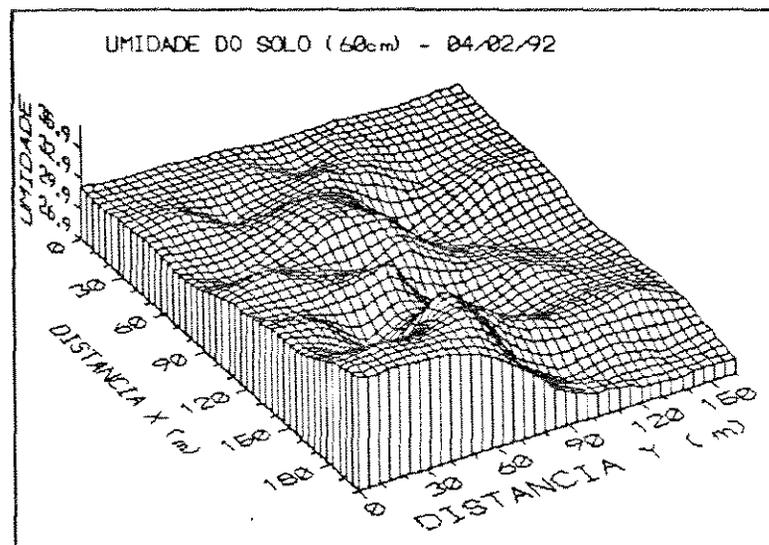
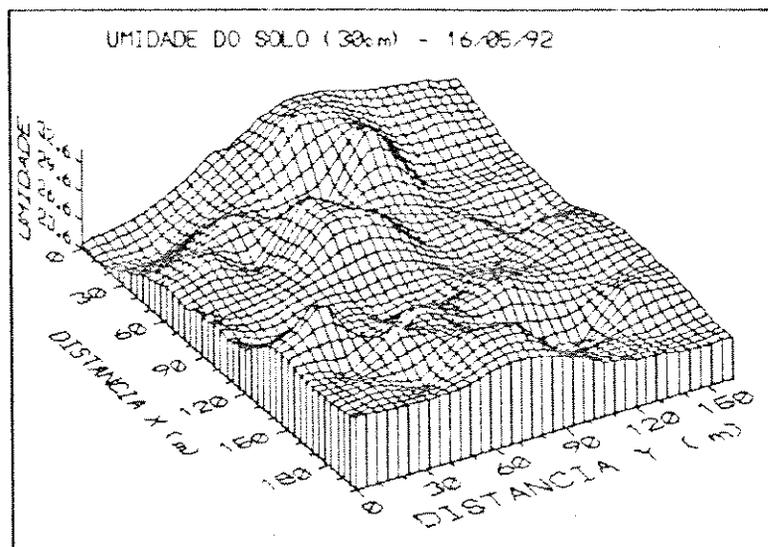
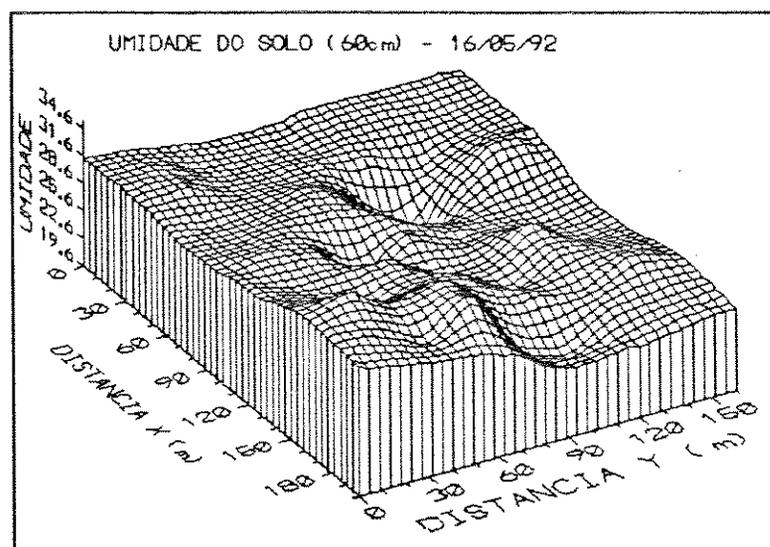


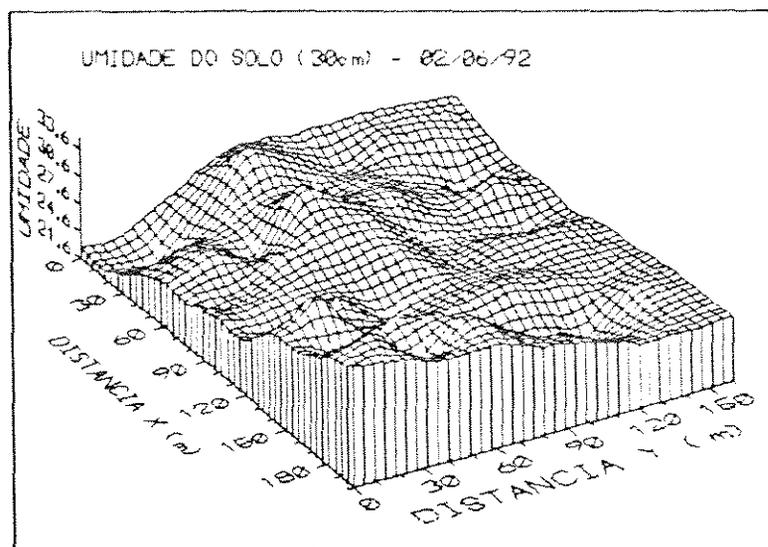
Figura 35 - Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 60 cm de profundidade em 04/02/92.



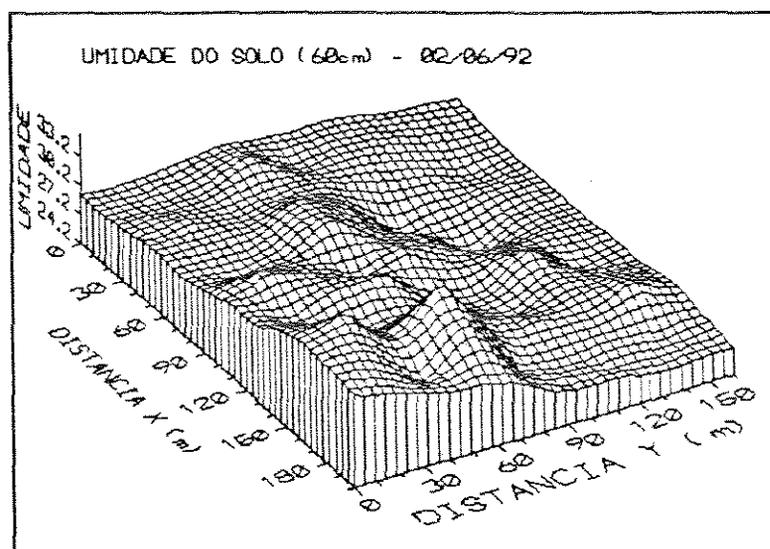
**Figura 36** - Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 30 cm de profundidade em 16/05/92.



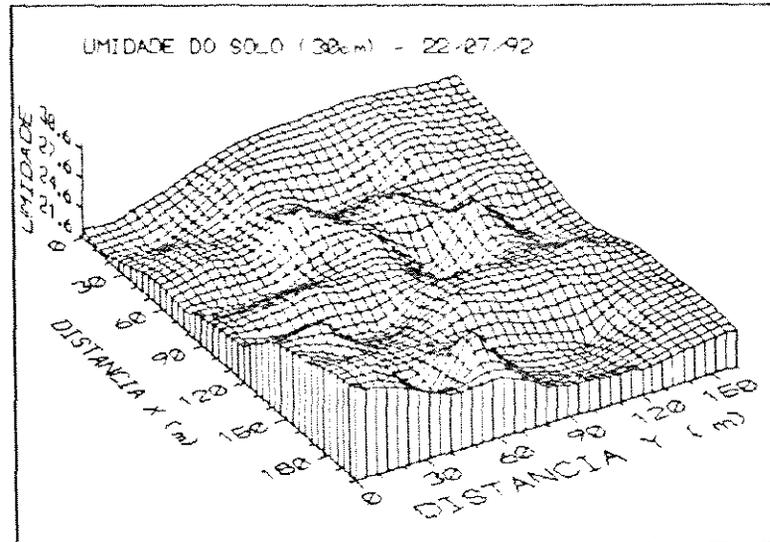
**Figura 37** - Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 60 cm de profundidade em 16/05/92.



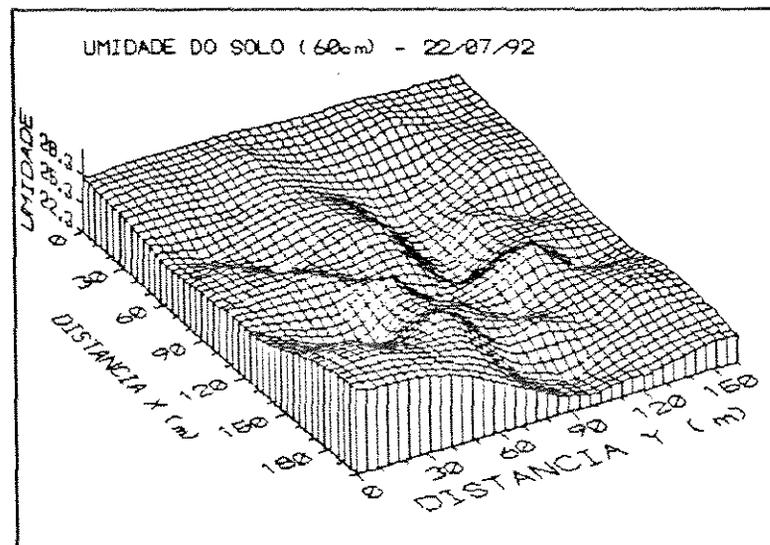
**Figura 38** - Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 30 cm de profundidade em 02/06/92.



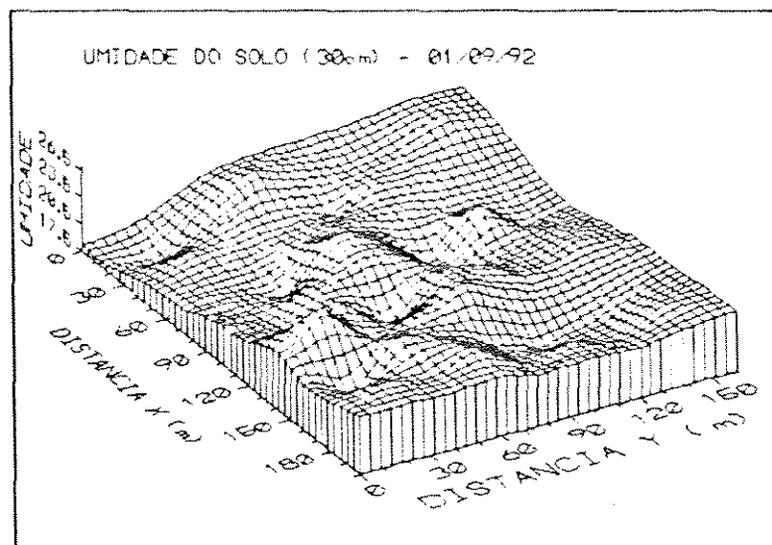
**Figura 39** - Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 60 cm de profundidade em 02/06/92.



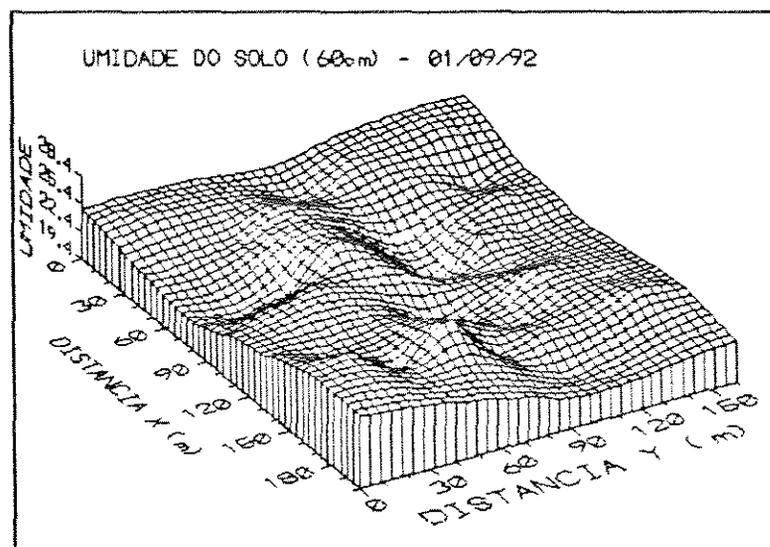
**Figura 40** - Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 30 cm de profundidade em 22/07/92.



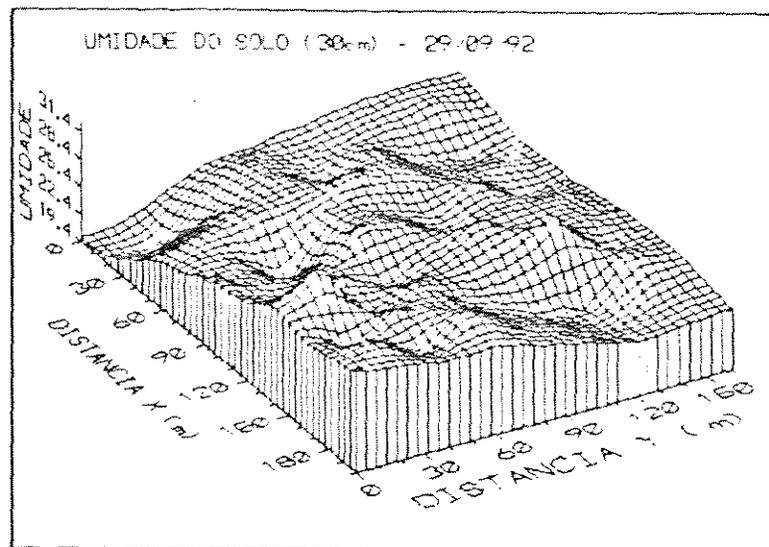
**Figura 41** - Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 60 cm de profundidade em 22/07/92.



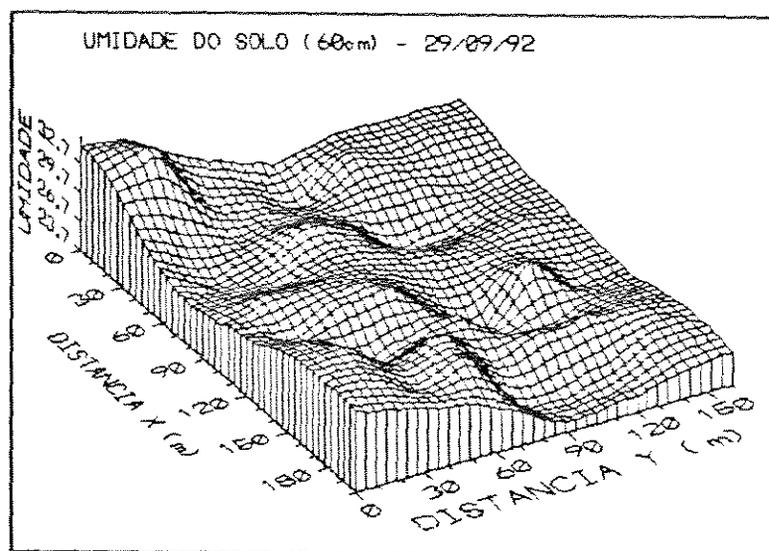
**Figura 42** - Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 30 cm de profundidade em 01/09/92.



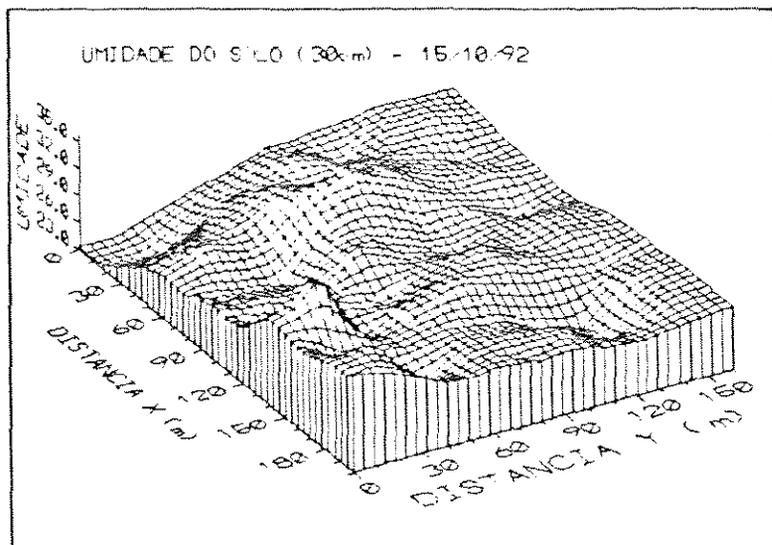
**Figura 43** - Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 60 cm de profundidade em 01/09/92.



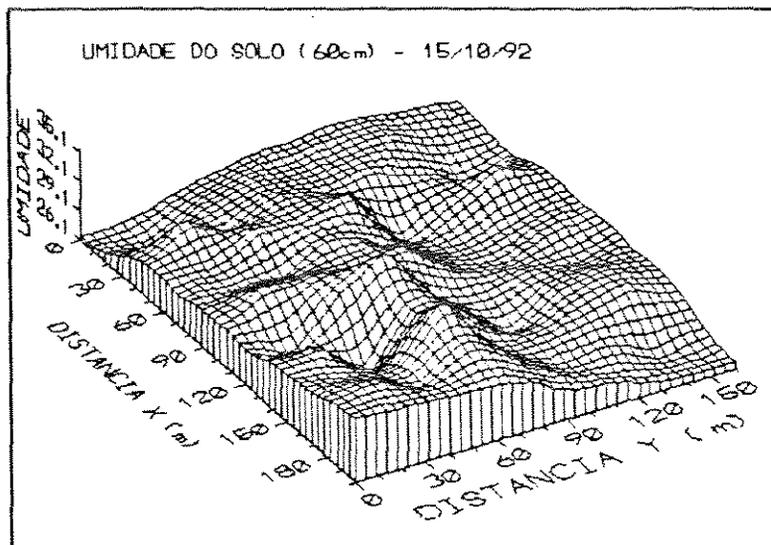
**Figura 44** - Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 30 cm de profundidade em 29/09/92.



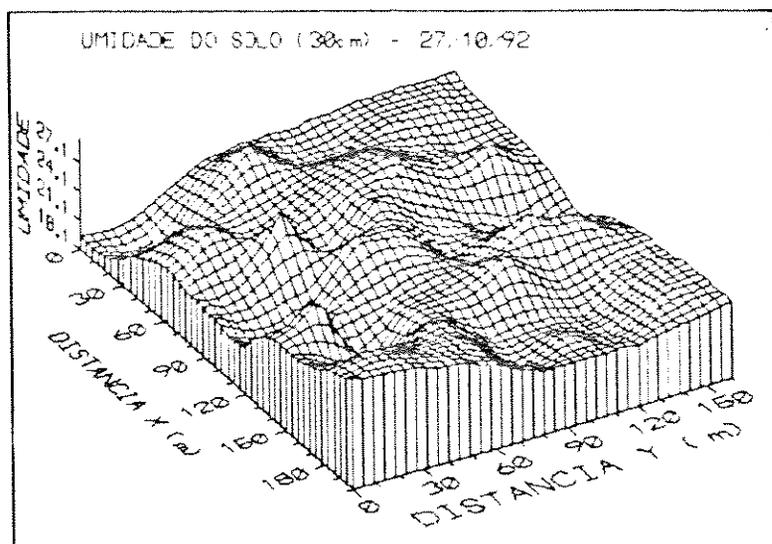
**Figura 45** - Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 60 cm de profundidade em 29/09/92.



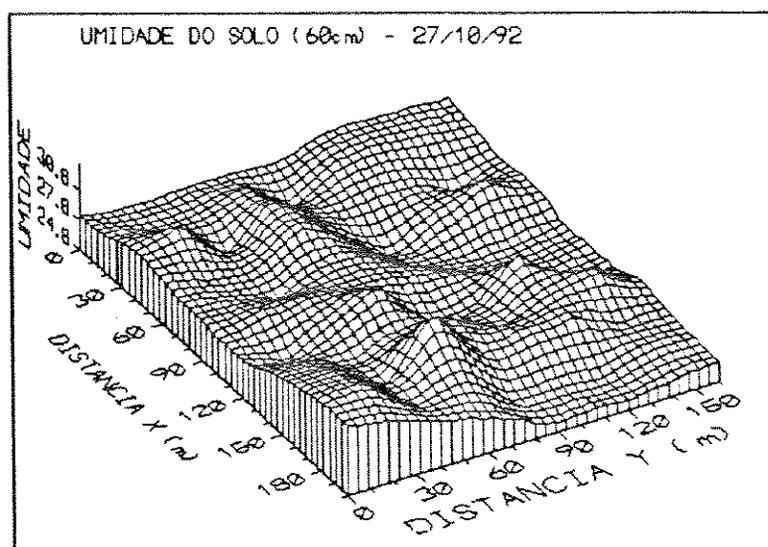
**Figura 46** - Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 30 cm de profundidade em 15/10/92.



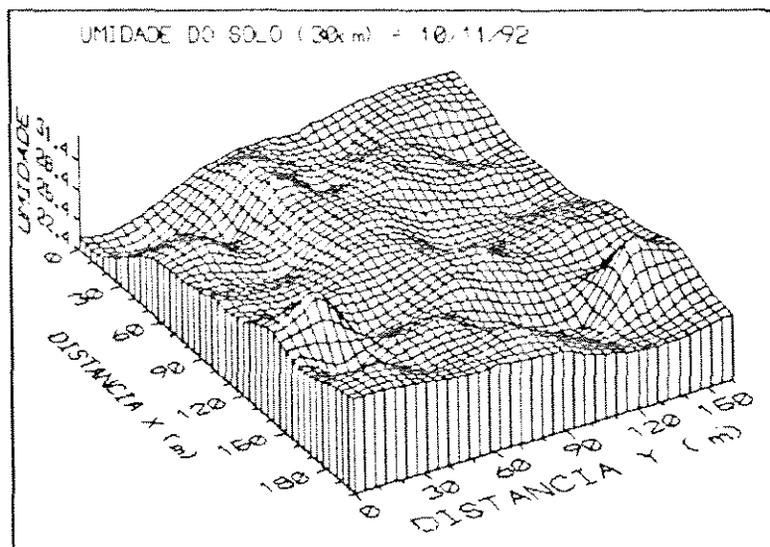
**Figura 47** - Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 60 cm de profundidade em 15/10/92.



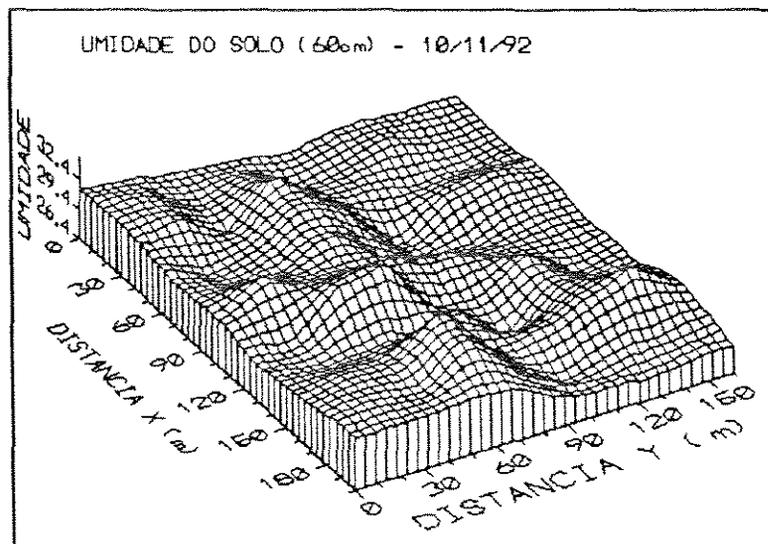
**Figura 48** - Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 30 cm de profundidade em 27/10/92.



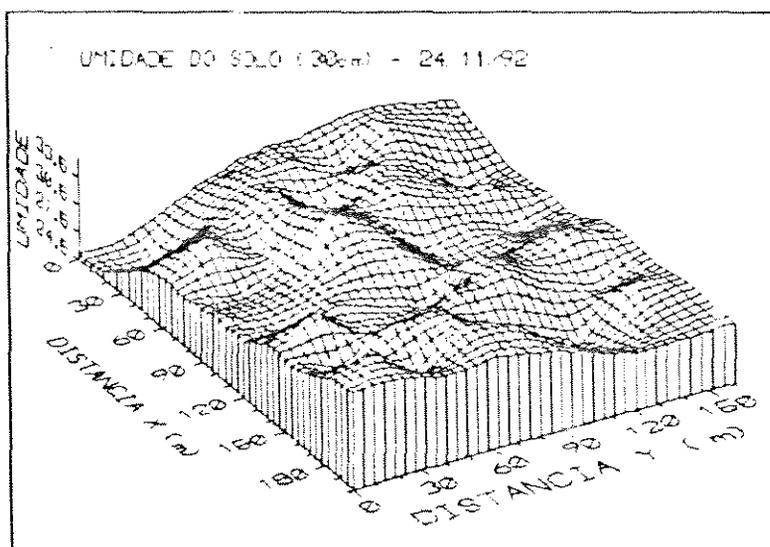
**Figura 49** - Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 60 cm de profundidade em 27/10/92.



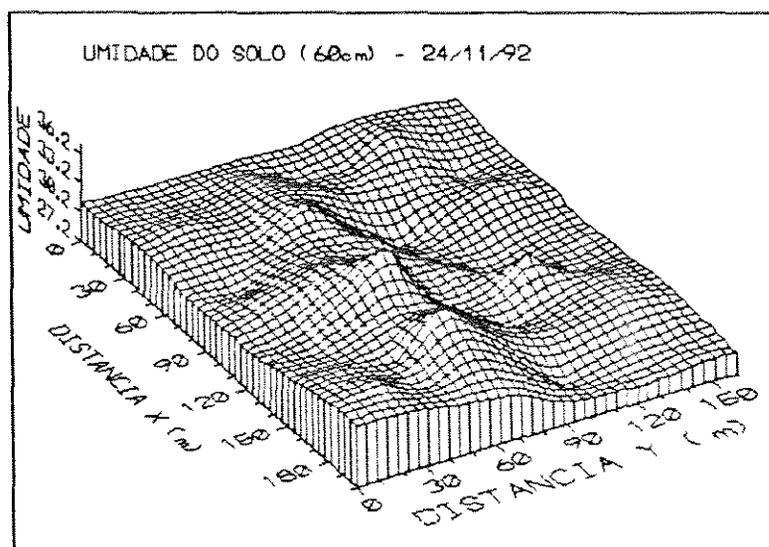
**Figura 50** - Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 30 cm de profundidade em 10/11/92.



**Figura 51** - Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 60 cm de profundidade em 10/11/92.



**Figura 52** - Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 30 cm de profundidade em 24/11/92.



**Figura 53** - Variação espacial em três dimensões da umidade do solo a 60 cm de profundidade em 24/11/92.

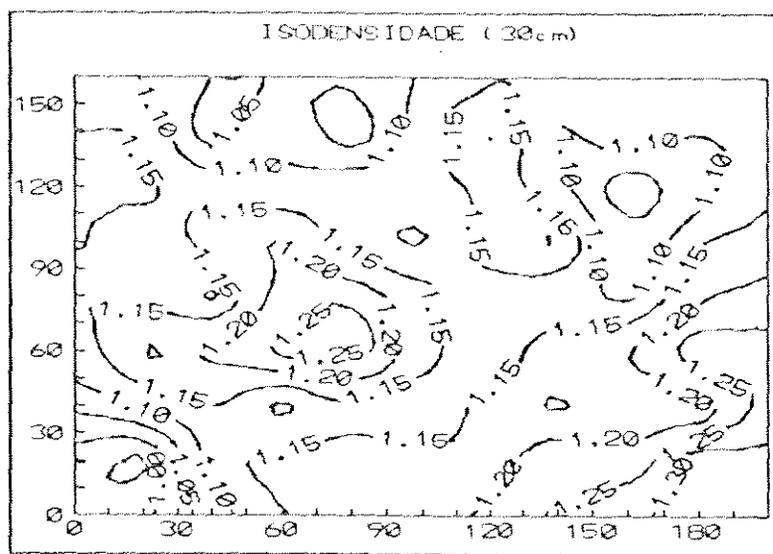


Figura 54 - Isolinhas da densidade do solo a 30 cm de profundidade.

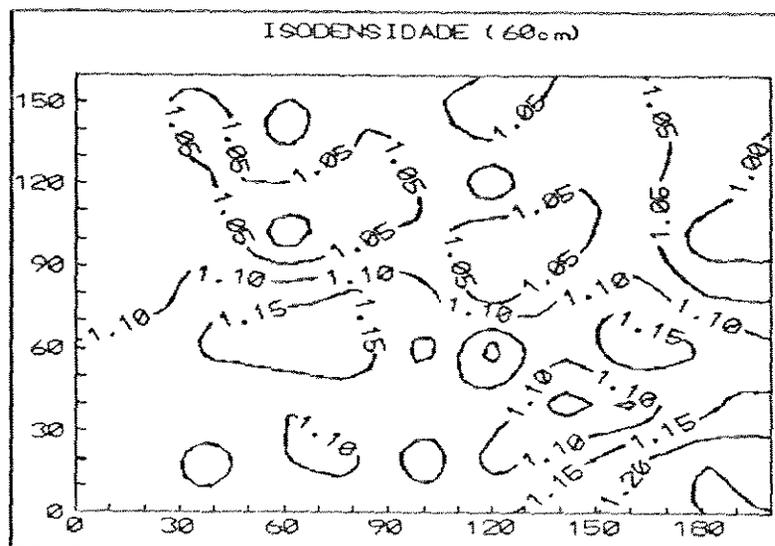


Figura 55 - Isolinhas da densidade do solo a 60 cm de profundidade.

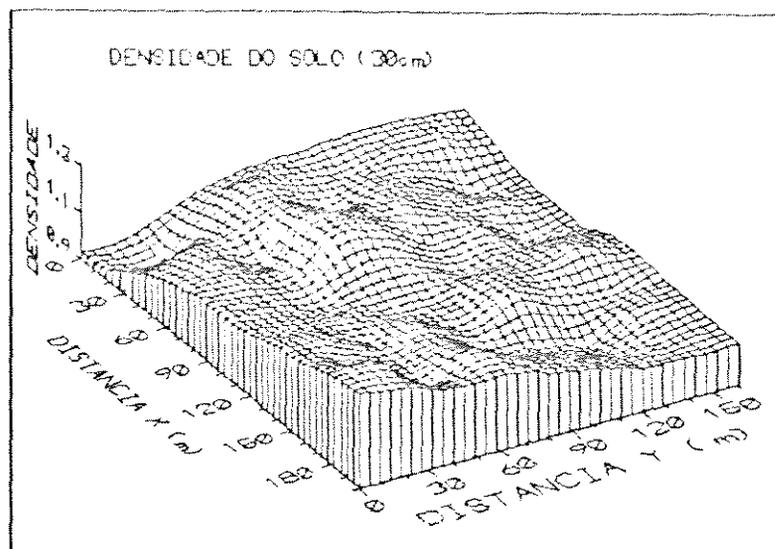


Figura 56 - Variação espacial em três dimensões da densidade do solo a 30 cm de profundidade.

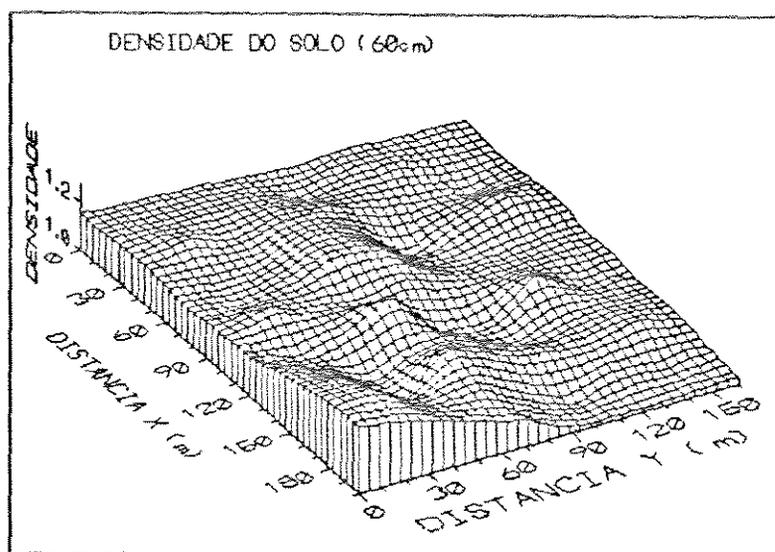


Figura 57 - Variação espacial em três dimensões da densidade do solo a 60 cm de profundidade.

Comparando-se os mapas tridimensionais de umidade e densidade do solo verifica-se que a região de maior e menor umidade coincidem, respectivamente, com as regiões de maior e menor densidade. Isto mostra o interrelacionamento existente entre a umidade e a densidade do solo e indica que provavelmente, a variabilidade espacial da densidade do solo irá influir na variabilidade espacial da umidade, principalmente se o método para a obtenção da umidade com base em volume for o de se multiplicar a umidade com base em peso pela umidade com base em volume.

O fato da umidade ser menor nas regiões de menores densidade pode estar relacionada com um número maior de macroporos, tendo o solo, nestas condições, uma maior drenagem.

A proporcionalidade entre as profundidades de amostragem para a densidade do solo é verificada através das isolinhas e das representações em três dimensões, com semelhança na continuidade dos mapas.

#### 5.5. Calibração da sonda de nêutrons

As leituras para a calibração da sonda de nêutrons em campo foram feitas nos dias 16 de maio, 01 de junho e 22 de

julho de 1992, conforme disponibilidade do equipamento.

Os resultados da calibração da sonda através de regressão linear do tipo  $y=A+Bx$  (Métodos dos Quadrados Mínimos) encontram-se no Quadro 6.

Os resultados mostram que os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) estão todos abaixo de 50%; portanto, não foi possível fazer a calibração da sonda com a umidade natural do solo.

O fato de  $R^2$  estar abaixo de 50% foi consequência da pequena amplitude de variação da umidade do solo. Esta variação poderia ter sido obtida se as leituras tivessem sido realizadas durante todo o ano e este ano apresentasse grande amplitude de variação pluviométrica. Neste experimento não foi possível fazer leituras de umidade com a sonda de nêutrons, pois o equipamento a ser utilizado, de propriedade do Instituto Agrônômico, apresentou defeitos e não foi consertado em tempo hábil. O equipamento cedido pelo CENA/USP dependia de disponibilidade para seu uso e a partir do segundo semestre de 1992, por problemas de intensidade de uso pelo CENA, não foi possível seu empréstimo.

Quadro 6 - Regressão linear da umidade em função da contagem relativa (CR) de neutrons moderados no solo para a calibração da sonda SOLO 25S.

Modelo	Prof. (cm)	A	B	R <sup>2</sup> (%)
Geral*	30	13,366	5,247	9,94
	60	11,114	6,619	17,35
16/5**	30	19,494	3,507	3,52
	60	19,083	4,146	3,07
02/06**	30	26,156	0,504	0,07
	60	9,494	7,210	29,67
22/07**	30	20,177	1,924	1,93
	60	16,349	3,931	17,18
Dep-geral***	30	14,524	4,791	11,57
	60	6,092	8,396	25,19
Dep-16/05****	30	30,233	-0,631	0,21
	60	21,396	2,833	1,64
Dep-02/06****	30	36,550	-3,107	3,26
	60	-8,573	13,825	42,88
Dep-22/07****	30	19,562	2,162	3,08
	60	25,211	0,136	0,01
Ind-ger*****	30	31,233	-1,446	0,30
	60	8,949	7,581	44,02

\* modelo geral - consideraram-se todos os pontos de amostragem de todas as datas

\*\* modelo individual - todos os pontos de cada data, isoladamente

\*\*\* modelo dependente geral - 25 pontos por data, na região de dependência espacial, totalizando 75 pontos.

\*\*\*\* modelo dependente individual - 25 pontos de cada data inclusos na região de dependência espacial

\*\*\*\*\* modelo independente geral - 4 pontos por data, inclusos na região de independência espacial, totalizando 12 pontos.

Os valores de umidade em cada data dispersaram pouco em torno da média e as médias das datas ficaram próximas uma das outras. As umidades médias determinadas em 16/05, 01/06 e 22/07 nas profundidade de 30 e 60cm foram, respectivamente, 28,71 e

29,45; 27,912 e 29,24; 25,01 e 26,15.

Os dados de precipitação (Anexo 4) revelam que as chuvas ocorridas nos meses de maio, junho e julho não contribuíram para o aumento da umidade, mas foram suficientes para manter os dados de umidade do solo próximos uns dos outros nestas datas de amostragem.

Apesar dos baixos valores de  $R^2$  das regressões, pode-se notar uma tendência de estes valores serem superiores quando se utiliza apenas os dados da região de dependência espacial. Este fato está de acordo com TURATTI et al (1990), que concluíram que a variabilidade espacial do solo é a principal causa da dispersão dos pontos nas curvas de calibração das sondas de nêutrons.

É de se esperar que para amplitudes de variação maiores de umidade do solo seja possível calibrar uma sonda de nêutrons no campo e que, considerando-se apenas os dados situados na região de dependência espacial, o coeficiente de determinação seja superior em relação ao modelo onde se consideram todos os pontos para a calibração.

Para calibração da sonda em campo, levando-se em consideração a variabilidade espacial do solo, sugere-se, pois, que as leituras sejam feitas em épocas com grande variação de

umidade do solo, ou seja, que se façam leituras na estação chuvosa e na estação seca, quando se contar somente com chuva natural, ou que se faça uma irrigação na área experimental, de preferência deixando a umidade do solo próxima à umidade de saturação e que se acompanhe o secamento natural do solo com leituras e coletas de amostras diárias.

## 6. CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos pode-se concluir que:

a) A umidade e a densidade do solo possuem uma estrutura de variabilidade espacial para o Latossolo Roxo, com alcances da dependência espacial de 80 e 70 m, respectivamente. O planejamento amostral destas variáveis devem considerar estas variabilidades.

b) Ocorreu estabilidade de distribuição da água do solo com o tempo e da densidade do solo com a profundidade de amostragem. Esta estabilidade foi verificada através da proporcionalidade entre as variâncias das umidades nas datas de determinação e da densidade do solo nas profundidades de determinação.

c) Da mesma forma que a umidade e a densidade do solo apresentam variabilidade no espaço, outros atributos do solo podem também apresentar esta variação e isto deve ser considerado quando se instala experimentos em campo.

d) Devido a baixa amplitude de variação ocorrida nos valores de umidade do solo, não foi possível calibrar a sonda de nêutrons com a umidade natural do solo. Com número maior de épocas de leituras com a sonda (maior amplitude de variação de umidade), seria possível a sua calibração e o método seria recomendado para a determinação de umidade do solo.

7 - ANEXOS

ANEXO 1

Profundidades e estruturas dos  
horizontes até 80 cm de profundidade

Quadro 7 - Designação, profundidade e estrutura dos horizontes, até 80 cm de profundidade, de um Latossolo Roxo do Centro Experimental de Campinas - IAC - Campinas - SP. ( Levantamento Realizado em 10 trincheiras distribuídas da área)

Trincheira	Horiz.	Esp. Hor.(cm)	Características
01	Ap	0-7	Estrutura granular, média forte
	AB	7-30	Estrutura composta de blocos médios e granular grande e forte.
	B21	30-62	Estrutura composta de blocos médios e granular grande e forte com cerosidade fraca e pouca
	B22	62-76+	Estrutura em blocos pequenos e fracos, com cerosidade fraca e pouca.
04	Ap	0-8	Estrutura granular, média e forte
	AB	8-25	Estrutura composta de blocos médios e granular grande e forte
	B21	25-47	Estrutura composta de blocos médios e granular grande e forte, com cerosidade muito fraca, pouca e descontínua
	B22	47-76+	Estrutura microgranular forte (maciça que se desfaz em microgranular)

---

07	Ap	0-9	Estrutura granular, média e forte
	AB	9-21	Estrutura granular pequena e forte
	B21	21-48	Estrutura composta de blocos pequenos e granular pequena e forte
	B22	48-79+	Estrutura maciça que se desfaz em microestrutura

---

15	Ap	0-7	Estrutura granular, média e forte
	AB	7-35	Estrutura composta de blocos médios e granular grande e forte
	B21	35-63	Estrutura composta de blocos médios e granular grande e forte, com cerosidade fraca, pouca e descontínua
	B22	63-81+	Estrutura microgranular forte (maciça que se desfaz em microgranular)

---

21	Ap	0-8	Estrutura granular, média e forte
	AB	8-33	Estrutura composta de blocos médios e granular grande e forte
	B21	33-52	Estrutura composta de blocos médios e granular grande e forte com cerosidade fraca e pouca
	B22	52-76+	Estrutura em blocos pequenos e fracos, com cerosidade fraca e pouca

---

32	Ap	0-7	Estrutura granular, média e forte
	AB	7-23	Estrutura composta de blocos médios e granular grande e fraca
	B21	23-53	Estrutura composta de blocos médios e granular grande e fraca
	B22	53-77+	Óxido
35	Ap	0-5	estrutura granular, média e forte
	AB	5-19	Estrutura granular pequena e forte
	B21	19-35	Estrutura composta de blocos pequenos e granular pequena e forte
	B22	35-78+	Estrutura maciça que se desfaz em micrigranular
57	Ap	0-8	estrutura granular, média e forte
	AB	8-30	Tendência de formação de blocos grandes, estrutura forte
	B21	30-52	Blocos pequenos, fortes com sinais de cerosidade fraca e pouca
	B22	52-82+	Estrutura em blocos médios se desfazendo em blocos muito pequenos e fortes com cerosidade moderada e fraca comum

---

60	Ap	0-6	Estrutura granular, média e forte
	AB	6-33	Estrutura composta de blocos grandes e granular grande e forte
	B21	33-62	Estrutura composta de blocos médios e granular médio a fraco
	B22	62-73+	Estrutura maciça que se desfaz em microgranular

---

63	Ap	0-8	Estrutura granular, média e forte
	AB	8-25	Estrutura composta de blocos médios e granular grande
	B21	25-51	Estrutura composta de blocos médios e granular grande, moderada
	B22	51-75+	Blatossólico

---

ANEXO - 2

Valores determinados de umidade do solo  
nas datas de amostragem e a 30 e 60 cm  
de profundidade e valores de densidade  
do solo nas profundidades de 30 e 60cm.

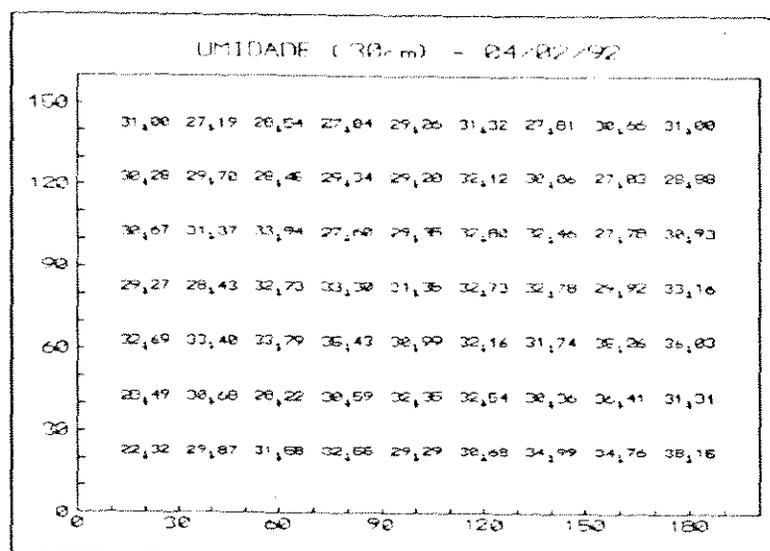


Figura 58- Umidade do solo a 30 cm de profundidade em 04/02/92.

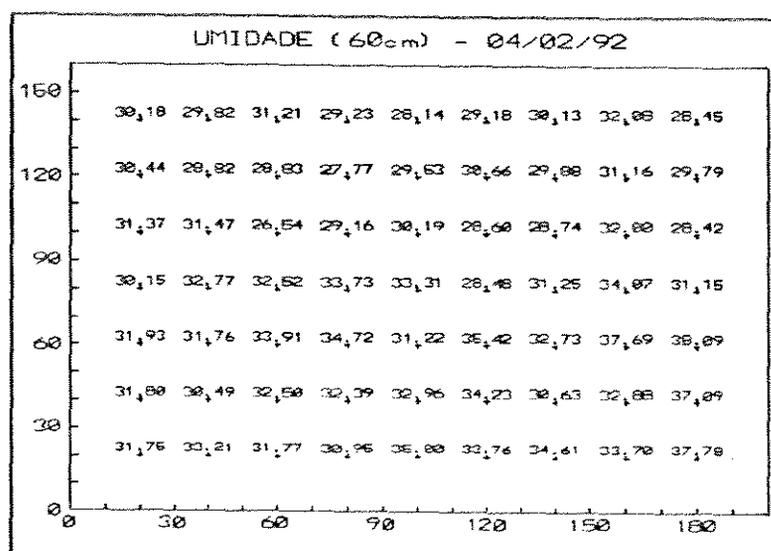


Figura 59- Umidade do solo a 60 cm de profundidade em 04/02/92.

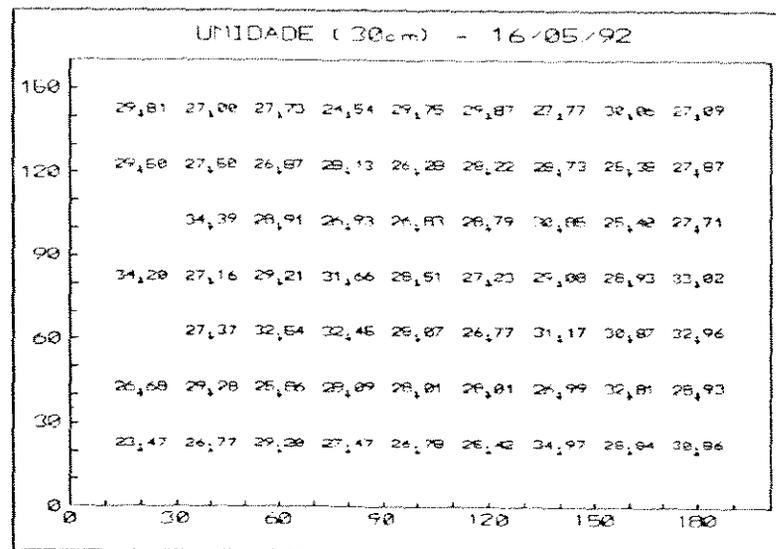


Figura 60- Umidade do solo a 30 cm de profundidade em 16/05/92.

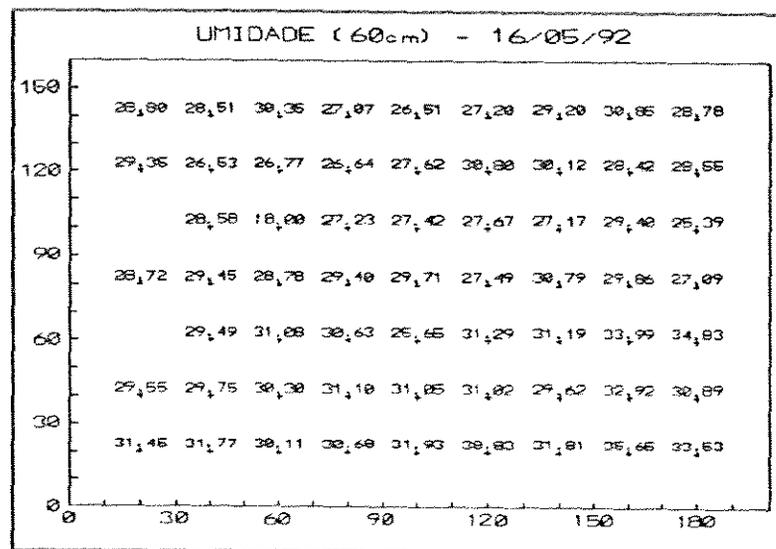


Figura 61- Umidade do solo a 60 cm de profundidade em 16/05/92.

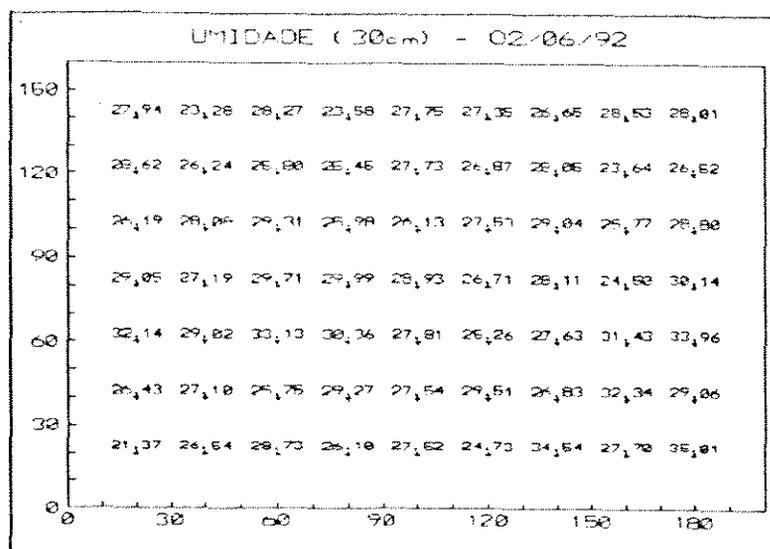


Figura 62- Umidade do solo a 30 cm de profundidade em 02/06/92.

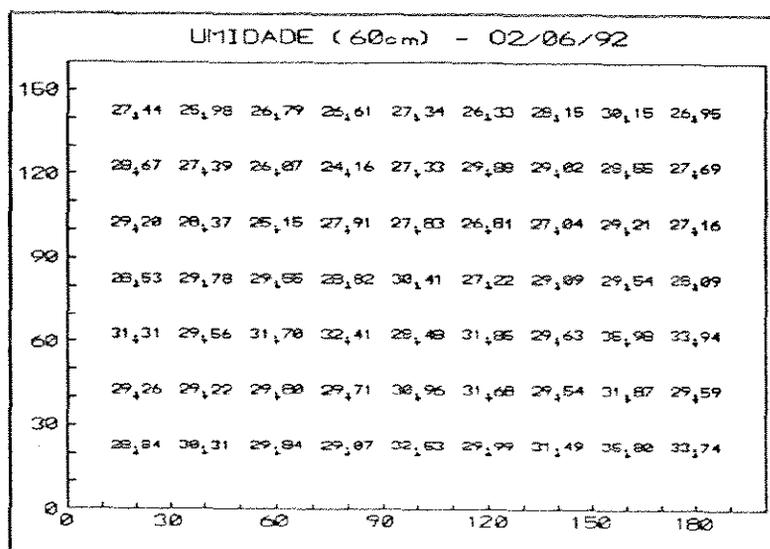


Figura 63- Umidade do solo a 60 cm de profundidade em 02/06/92

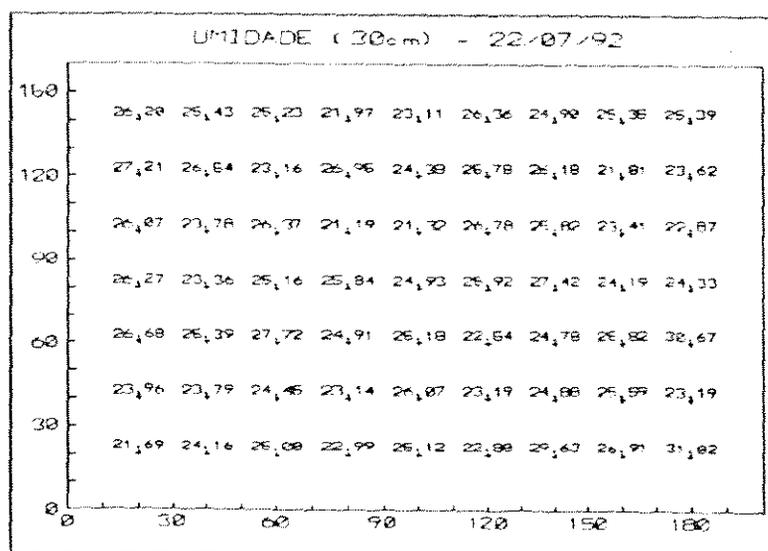


Figura 64- Umidade do solo a 30 cm de profundidade em 22/07/92.

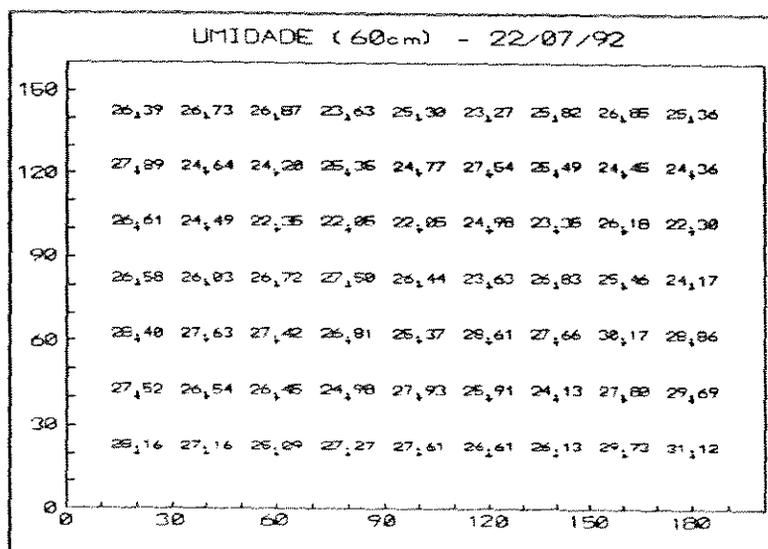


Figura 65- Umidade do solo a 60 cm de profundidade em 22/07/92.

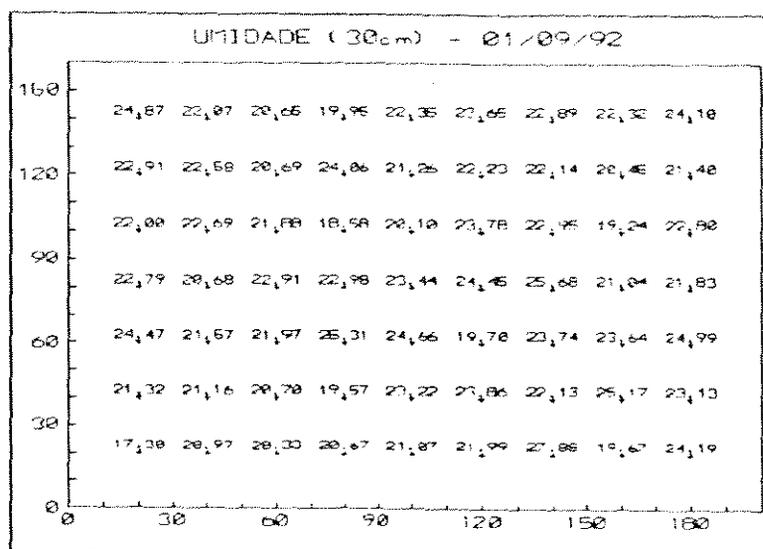


Figura 66- Umidade do solo a 30 cm de profundidade em 01/09/92.

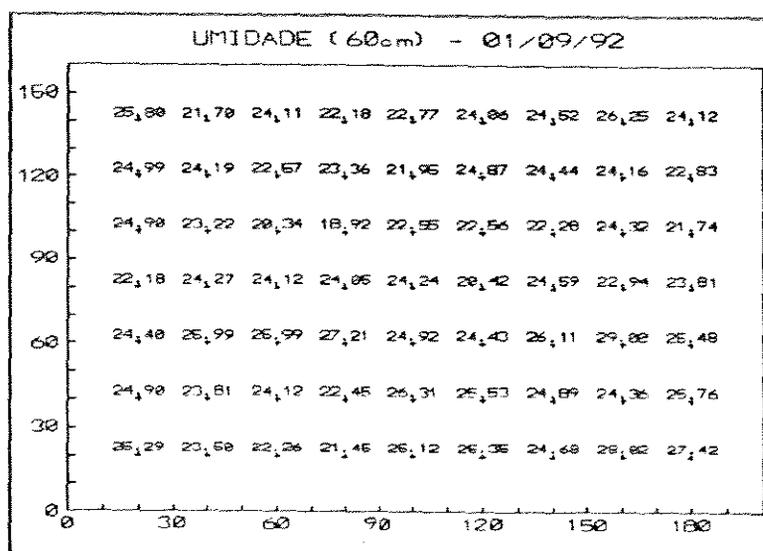


Figura 67- Umidade do solo a 60 cm de profundidade em 01/09/92.

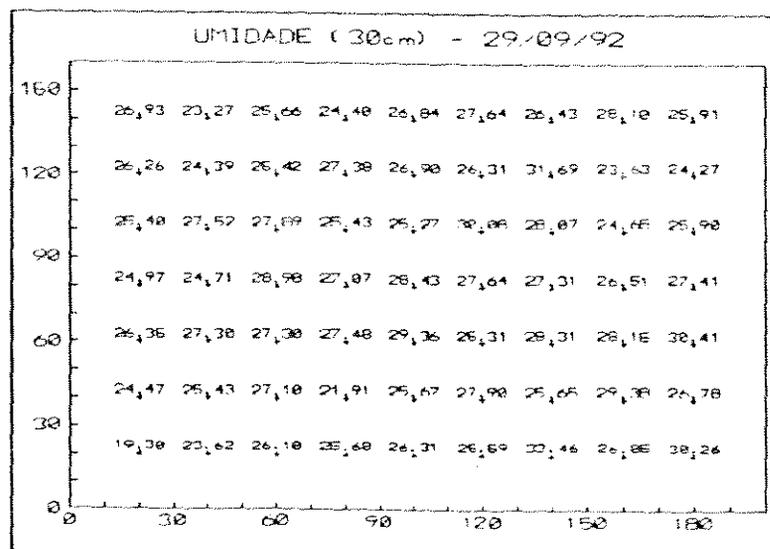


Figura 68- Umidade do solo a 30 cm de profundidade em 29/09/92.

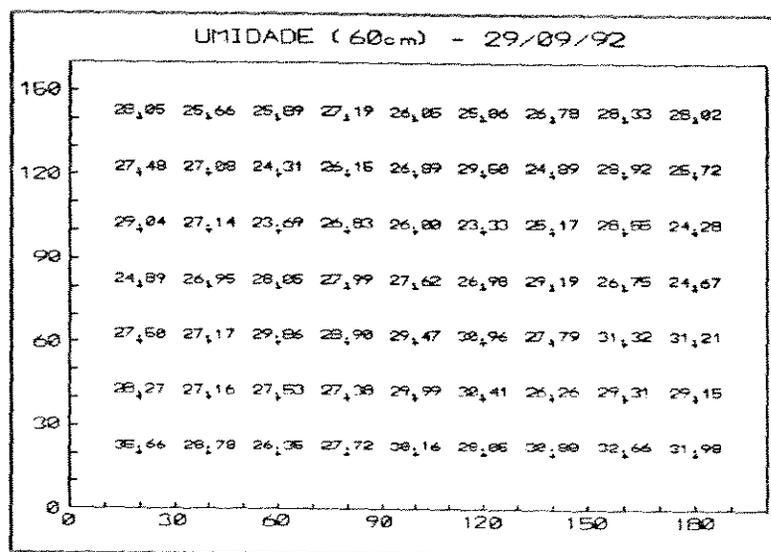


Figura 69- Umidade do solo a 60 cm de profundidade em 29/09/92.

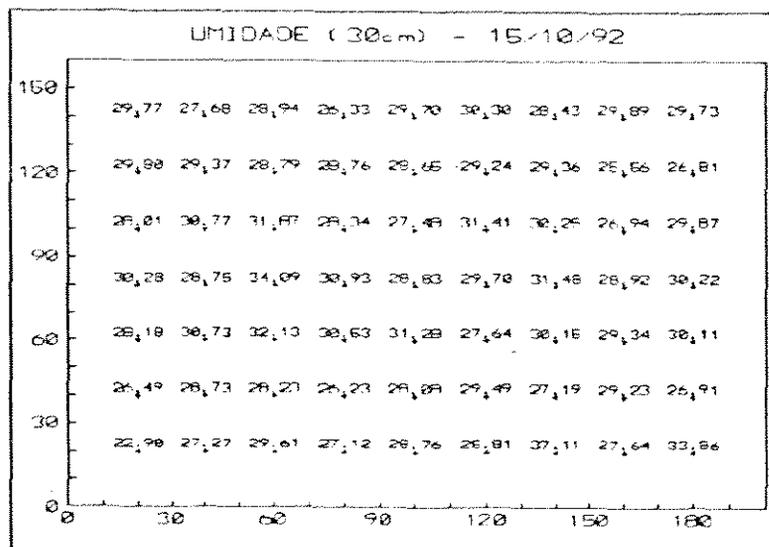


Figura 70- Umidade do solo a 30 cm de profundidade em 15/10/92.

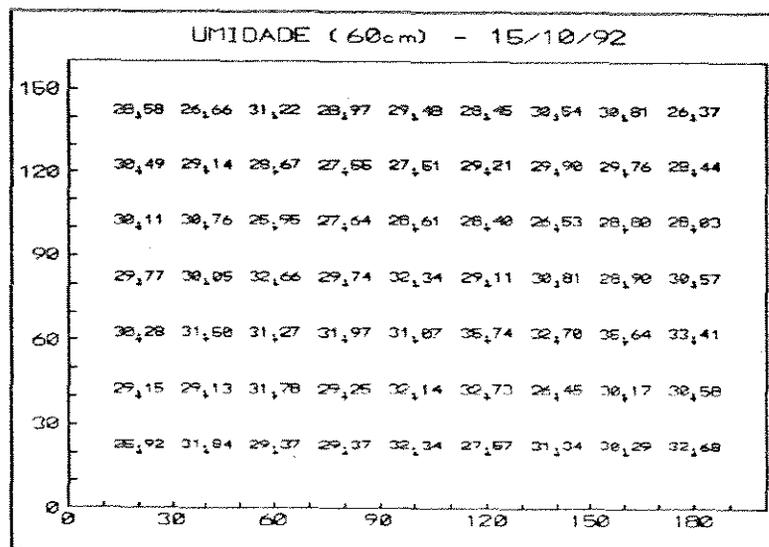


Figura 71- Umidade do solo a 60 cm de profundidade em 15/10/92.

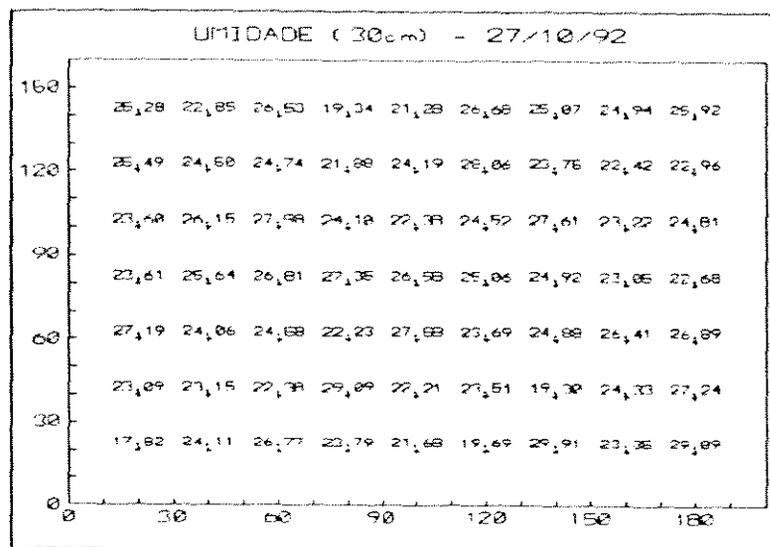


Figura 72- Umidade do solo a 30 cm de profundidade em 27/10/92.

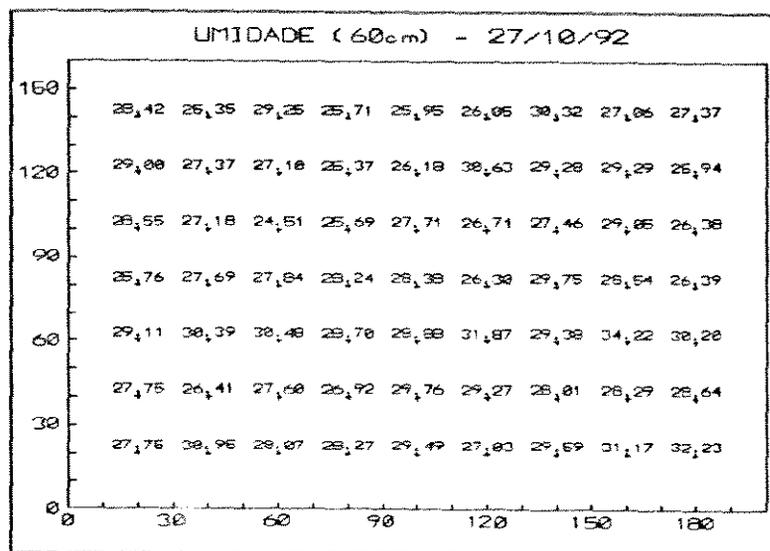


figura 73- Umidade do solo a 60 cm de profundidade em 27/10/92.

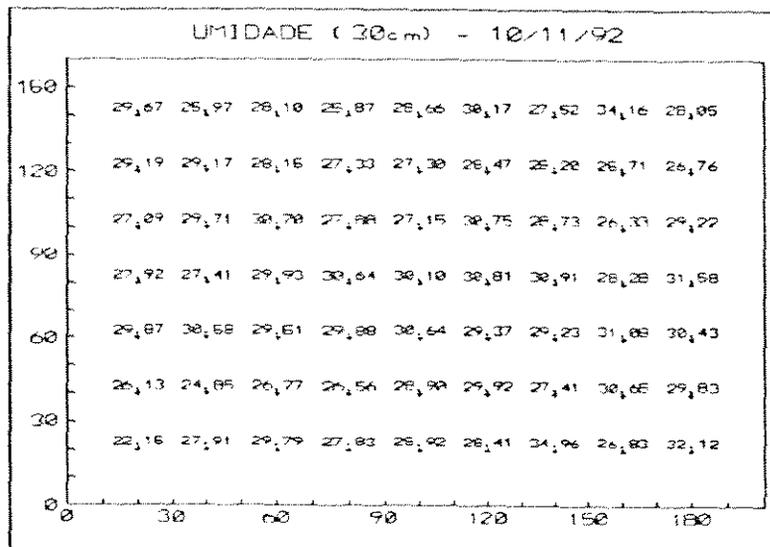


Figura 74- Umidade do solo a 30 cm de profundidade em 10/11/92.

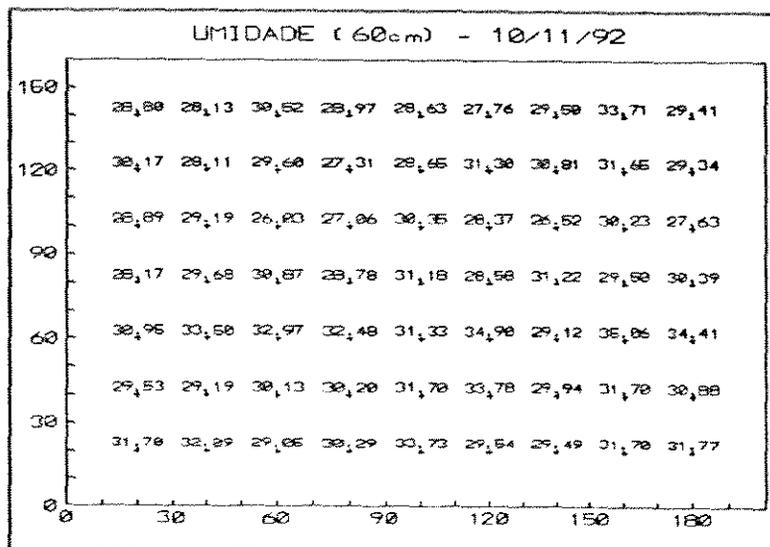


Figura 75- Umidade do solo a 60 cm de profundidade em 10/11/92.

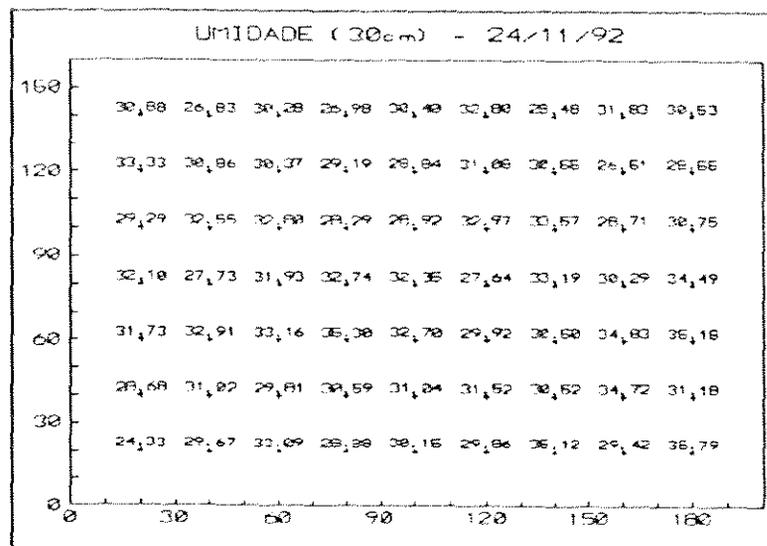


Figura 76- Umidade do solo a 30 cm de profundidade em 24/11/92.

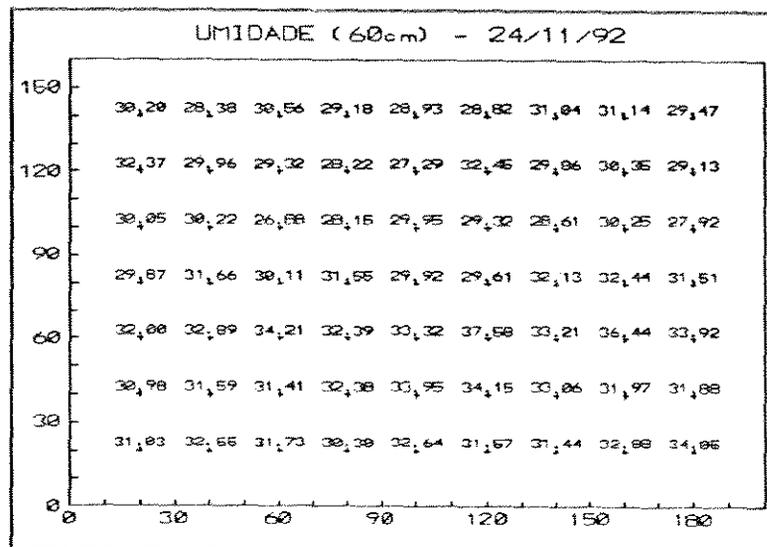


Figura 77- Umidade do solo a 60 cm de profundidade em 24/11/92.

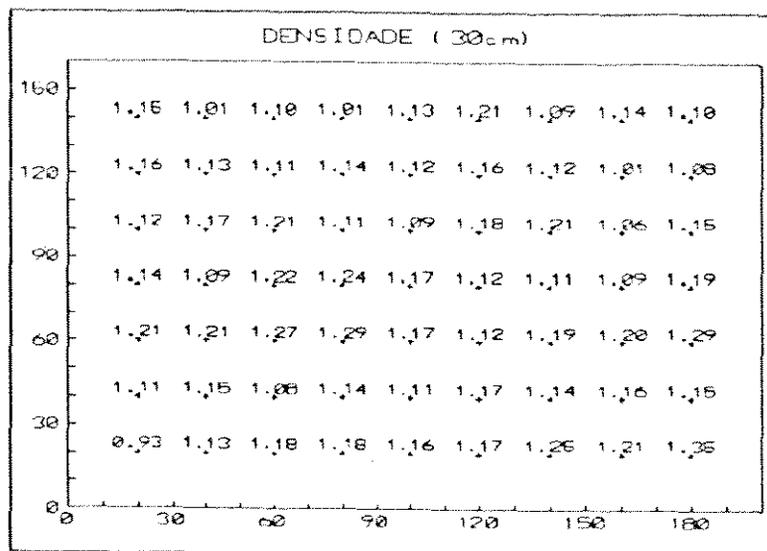


Figura 78- Densidade do solo a 30 cm de profundidade.

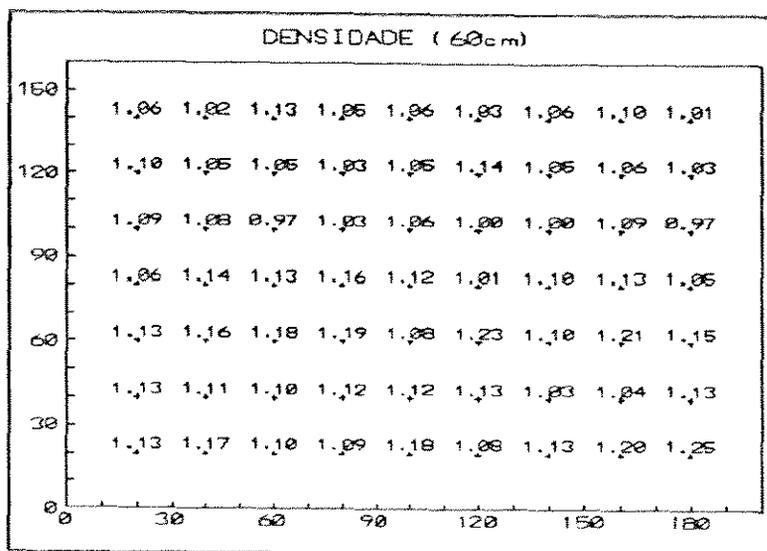


Figura 79- Densidade do solo a 60 cm de profundidade.

ANEXO - 3

Semivariâncias médias da umidade e da densidade  
do solo com os respectivos número de pares de cálculo.

Quadro 8 - Semivariâncias da umidade do solo com os respectivos número de pares de cálculo em 04/02/92.

Nº PARES	DISTANCIA (m)	SEMIVAR.-U30	SEMIVAR.-U60
110	20,00	4,129	2,853
96	28,28	4,619	3,769
94	40,00	5,527	4,538
164	44,72	5,135	4,674
70	56,57	5,822	5,395
78	60,00	6,365	5,050
136	63,24	5,629	5,316
116	72,11	6,364	6,745
62	80,00	6,957	6,339
108	82,46	6,599	6,259
48	84,85	6,335	7,879
92	89,44	7,386	7,703
202	100,78	7,488	6,850
68	107,70	6,400	7,397
30	113,71	9,008	10,670
56	116,61	7,423	8,245
82	121,05	8,618	5,780
88	127,28	9,092	8,873
36	134,16	9,456	9,212
40	141,42	11,76	7,634
48	144,79	11,11	9,548

Quadro 9 - Semivariâncias da umidade do solo com os respectivos número de pares de cálculo em 16/05/92.

Nº PARES	DISTANCIA (m)	SEMIVAR.-U30	SEMIVAR.-U60
104	20,00	5,018	4,276
92	28,28	4,237	4,864
89	40,00	5,985	5,395
156	44,72	5,333	6,130
66	56,57	6,607	5,499
74	60,00	6,444	5,529
130	63,24	6,033	6,203
110	72,11	5,805	7,165
58	80,00	5,325	6,900
102	82,46	6,410	7,693
46	84,85	6,398	6,369
86	89,44	5,671	9,386
192	100,78	5,333	6,854
64	107,70	6,273	7,671
28	113,71	5,528	11,490
54	116,61	6,257	8,032
76	121,05	7,101	6,239
82	127,28	6,174	10,350
34	134,16	5,945	9,892
36	141,42	7,965	5,525
42	144,79	8,239	9,359

**Quadro 10** - Semivariâncias da umidade do solo com os respectivos número de pares de cálculo em 02/06/92.

Nº PARES	DISTANCIA (m)	SEMIVAR.-U30	SEMIVAR.-U60
110	20,00	5,246	2,563
96	28,28	4,335	3,102
94	40,00	5,040	3,062
164	44,72	5,445	3,502
70	56,57	5,995	4,229
78	60,00	7,182	4,049
136	63,24	6,150	4,674
116	72,11	6,162	4,951
62	80,00	5,973	5,354
108	82,46	6,419	5,820
48	84,85	6,472	5,627
92	89,44	6,313	6,224
202	100,78	6,593	6,033
68	107,70	6,341	5,903
30	113,71	7,026	8,988
56	116,61	7,356	7,115
82	121,05	7,741	5,503
88	127,28	7,394	8,166
36	134,16	8,041	7,518
40	141,42	9,499	6,602
48	144,79	10,32	8,648

Quadro 11 - Sémivariâncias da umidade do solo com os respectivos número de pares de cálculo em 22/07/92.

Nº PARES	DISTANCIA (m)	SEMIVAR.-U30	SEMIVAR.-U60
110	20,00	3,463	2,328
96	28,28	3,532	2,878
94	40,00	3,174	3,111
164	44,72	3,702	3,598
70	56,57	3,677	3,858
78	60,00	4,223	3,395
136	63,24	3,653	3,643
116	72,11	3,667	4,162
62	80,00	4,452	3,870
108	82,46	3,257	3,845
48	84,85	3,353	4,051
92	89,44	4,268	5,120
202	100,78	4,021	4,016
68	107,70	3,992	3,856
30	113,71	4,822	6,362
56	116,61	3,598	3,931
82	121,05	4,032	3,293
88	127,28	4,476	4,842
36	134,16	4,714	4,967
40	141,42	4,943	3,421
48	144,79	4,765	4,994

**Quadro 12** - Semivariâncias da umidade do solo com os respectivos número de pares de cálculo em 01/09/92.

Nº PARES	DISTANCIA (m)	SEMIVAR.-U30	SEMIVAR.-U60
110	20,00	3,236	2,266
96	28,28	2,870	2,761
94	40,00	3,788	3,124
164	44,72	3,469	3,648
70	56,57	3,076	3,892
78	60,00	3,061	3,371
136	63,24	3,503	3,393
116	72,11	4,239	4,031
62	80,00	3,175	2,868
108	82,46	3,425	3,369
48	84,85	3,600	3,999
92	89,44	4,270	4,418
202	100,78	3,682	3,131
68	107,70	3,635	3,752
30	113,71	2,558	4,726
56	116,61	3,784	3,786
82	121,05	4,112	2,358
88	127,28	3,853	3,596
36	134,16	3,830	3,326
40	141,42	3,887	2,699
48	144,79	4,543	3,737

**Quadro 13** - Semivariâncias da umidade do solo com os respectivos número de pares de cálculo em 29/09/92.

Nº PARES	DISTANCIA (m)	SEMIVAR.-U30	SEMIVAR.-U60
110	20,00	4,022	3,122
96	28,28	3,144	3,592
94	40,00	4,027	4,199
164	44,72	4,270	3,650
70	56,57	3,229	3,942
78	60,00	3,897	4,451
136	63,24	4,350	4,299
116	72,11	4,189	6,651
62	80,00	5,196	4,295
108	82,46	4,272	4,946
48	84,85	4,216	5,000
92	89,44	5,010	6,078
202	100,78	5,335	5,471
68	107,70	4,799	5,730
30	113,71	4,167	7,486
56	116,61	5,596	5,738
82	121,05	5,854	5,656
88	127,28	6,517	7,297
36	134,16	6,162	7,125
40	141,42	6,684	5,524
48	144,79	6,993	7,363

Quadro 14 - Semivariâncias da umidade do solo com os respectivos número de pares de cálculo em 15/10/92.

Nº PARES	DISTANCIA (m)	SEMIVAR.-U30	SEMIVAR.-U60
110	20,00	4,113	3,606
96	28,28	3,419	3,751
94	40,00	3,926	4,014
164	44,72	4,814	4,895
70	56,57	4,882	5,604
78	60,00	4,131	3,472
136	63,24	4,254	4,162
116	72,11	4,901	5,192
62	80,00	3,645	4,388
108	82,46	3,997	4,637
48	84,85	4,577	5,510
92	89,44	4,474	5,405
202	100,78	4,609	4,175
68	107,70	5,161	4,576
30	113,71	3,044	5,925
56	116,61	5,319	4,127
82	121,05	6,352	3,493
88	127,28	5,812	4,674
36	134,16	6,223	4,388
40	141,42	4,424	3,280
48	144,79	4,892	5,108

**Quadro 15** - Semivariâncias da umidade do solo com os respectivos número de pares de cálculo em 27/10/92.

Nº PARES	DISTANCIA (m)	SEMIVAR.-U30	SEMIVAR.-U60
110	20,00	5,664	2,713
96	28,28	4,701	3,178
94	40,00	6,279	2,781
164	44,72	5,885	3,100
70	56,57	4,977	3,210
78	60,00	7,361	2,791
136	63,24	5,484	3,322
116	72,11	6,452	3,348
62	80,00	5,028	3,441
108	82,46	5,946	3,906
48	84,85	5,681	3,684
92	89,44	6,067	4,129
202	100,78	6,235	3,596
68	107,70	6,577	3,465
30	113,71	6,628	5,596
56	116,61	4,814	3,181
82	121,05	6,240	3,547
88	127,28	6,611	3,867
36	134,16	6,179	4,888
40	141,42	6,967	4,411
48	144,79	5,676	4,696

Quadro 16 - Semivariâncias da umidade do solo com os respectivos número de pares de cálculo em 10/11/92.

Nº PARES	DISTANCIA (m)	SEMIVAR.-U30	SEMIVAR.-U60
110	20,00	3,588	3,089
96	28,28	3,073	3,618
94	40,00	3,660	3,620
164	44,72	3,456	4,257
70	56,57	3,389	4,954
78	60,00	3,431	2,993
136	63,24	3,471	3,839
116	72,11	3,741	4,247
62	80,00	3,927	3,311
108	82,46	4,027	4,672
48	84,85	3,698	4,451
92	89,44	4,513	5,116
202	100,78	4,576	4,042
68	107,70	4,369	4,648
30	113,71	3,344	6,180
56	116,61	5,092	3,700
82	121,05	5,800	3,382
88	127,28	5,538	4,579
36	134,16	5,650	3,636
40	141,42	6,272	3,594
48	144,79	6,478	4,746

Quadro 17 - Semivariâncias da umidade do solo com os respectivos número de pares de cálculo em 24/11/92.

Nº PARES	DISTANCIA (m)	SEMIVAR.-U30	SEMIVAR.-U60
110	20,00	4,656	2,226
96	28,28	4,255	2,900
94	40,00	5,654	3,297
164	44,72	4,940	4,015
70	56,57	4,764	5,103
78	60,00	5,629	3,331
136	63,24	5,415	4,535
116	72,11	4,815	5,566
62	80,00	4,543	4,321
108	82,46	5,403	4,995
48	84,85	6,467	6,312
92	89,44	6,343	6,255
202	100,78	5,368	4,756
68	107,70	5,332	5,095
30	113,71	4,957	7,614
56	116,61	5,871	4,855
82	121,05	5,783	2,433
88	127,28	6,104	4,736
36	134,16	5,924	3,177
40	141,42	7,578	3,171
48	144,79	8,011	4,546

Quadro 18 - Semivariâncias da densidade do solo com os respectivos número de pares de cálculo.

Nº PARES	DISTANCIA (m)	SEMIVAR.-D30	SEMIVAR.-D60
110	20,00	0,0032	0,0026
96	28,28	0,0039	0,0033
94	40,00	0,0039	0,0032
164	44,72	0,0041	0,0034
70	56,57	0,0042	0,0036
78	60,00	0,0047	0,0029
136	63,24	0,0044	0,0036
116	72,11	0,0046	0,0041
62	80,00	0,0050	0,0035
108	82,46	0,0050	0,0040
48	84,85	0,0044	0,0044
92	89,44	0,0048	0,0048
122	100,00	0,0047	0,0041
80	101,98	0,0048	0,0034
68	107,70	0,0043	0,0039
30	113,14	0,0050	0,0058
56	116,62	0,0049	0,0037
30	120,00	0,0067	0,0034
52	121,65	0,0051	0,0036
44	126,49	0,0050	0,0037
44	128,06	0,0064	0,0053

ANEXO - 4

Dados pluviométricos do ano de 1992.

Quadro 19- Precipitação diária do ano de 1992 em Campinas-SP - Dados - CEPAGRI/UNICAMP - Posto Meteorológico da FEAGRI/UNICAMP

Precipitação (mm) - 1992												
Dia	jan	fev	mar	abr	maio	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
01	0,0	8,4	0,0	7,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,6
02	11,6	2,0	7,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	13,6	22,8	51,8
03	0,3	3,0	3,4	0,0	18,4	0,0	0,0	0,0	0,2	29,6	0,0	0,0
04	0,9	0,6	4,0	0,0	20,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	74,8	0,0
05	0,0	0,0	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,6	0,0	7,6	0,0
06	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,8	0,0	1,0	0,0
07	0,0	17,2	0,0	0,0	0,0	0,0	9,2	0,0	4,2	4,4	1,8	12,2
08	0,0	10,6	0,0	0,0	0,0	0,0	9,0	0,0	0,0	2,2	0,0	10,0
09	0,0	1,0	10,2	0,0	0,0	0,0	14,2	0,0	0,0	39,0	4,2	0,0
10	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	1,6
11	0,0	0,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	44,2
12	1,2	0,0	19,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	13,4	0,0	39,0
13	7,8	0,0	0,0	0,4	3,0	0,0	0,0	0,0	9,2	42,0	6,2	0,0
14	0,8	0,0	11,0	12,0	4,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0
15	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19,4	0,0	0,0	0,0
16	0,0	24,4	9,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	30,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	30,0	17,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,6	54,0	4,8
18	0,0	0,0	4,2	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	3,6	0,0	0,2	3,6
19	0,0	0,0	10,4	0,0	10,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,4	2,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
21	0,0	0,4	0,0	20,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22	7,4	0,0	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	11,2	0,0	0,0	35,2	0,0
23	3,2	0,0	0,0	0,0	22,5	0,0	0,0	1,8	0,0	0,0	15,8	0,0
24	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	1,4	0,0	0,0	6,4	0,0
25	2,6	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,4	0,0
26	0,0	15,4	7,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,4	0,0	12,8	0,0
27	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,2	0,0
28	0,0	1,0	7,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	39,0	0,0	0,0
29	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	0,0	4,8	0,0	61,4	0,0	0,0
30	0,0	-	52,0	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	34,8	0,0	0,0
31	3,0	-	7,2	-	0,0	-	0,0	0,0	-	0,0	-	0,0

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. A sonda de nêutrons e o seu uso na pesquisa agronômica. Boletim Didático. Universidade de São Paulo - Centro de Energia Nuclear na Agricultura. Piracicaba, n. 22, 84 p., 1990.
- BARRADA, Y. Applications of the neutrons moisture meter. Proc. Symp. isotopes and radiation in soil plant nutrition studies. Ankara, 1965.
- BELTRAME, L.; TAYLOR, J. C. Uso da sonda de nêutrons para determinação da umidade do solo no campo. R. bras. Ci. Solo. Campinas, V. 4, n. 1, p. 57-61, 1980.
- BLACKWELL, D. Estatística básica. São Paulo : EDUSP, 1975. 143p.
- BONI, N. R.; GUIMARÃES, E. C.; ESPINDOLA, C. R. A variabilidade espacial de horizontes do solo e a experimentação. Anais do XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Ilhéus, V. 5, p. 2848-57, 1993.
- BORGHI, E.; GUIMARÃES, E. C.; BONI, N. R. Análise geoestatística da estabilidade de agregados de um Latossolo Roxo que recebeu matéria orgânica. Anais do XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Ilhéus, V. 5, p. 2831-39.
- BRAGA, L. P. V. Geoestatística e aplicações. Minicurso do 9º Simpósio Brasileiro de Probabilidades e Estatística. IME. USP. São Paulo, 1991. 36 p.
- BUCKMAN, H. O.; BRADY, N. C. Natureza e propriedades dos solos. 4 ed. São paulo : Freitas Bastos, 1976. 594 p.
- BURGESS, T. M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties I. Journal Soil Science. Oxford, V. 31, p.315-31, 1980.
- BURROUGH, P. A. Principles of geographical information systems for land resouces assessment. Oxford University Press, 1985. 193 p. (Monographs on soil and resources survey, 12).

- BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. Estatística básica. 4ª ed. São Paulo : Atual, 1987. 321 p.
- CAMERON, D. R. Variability of soil water retention curves and predicted hydraulic conductivities on a small plot. Soil Science. Baltimore, V.126, n.6, p. 364-71, 1978.
- 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.
- 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.
- CLARK, I. Practical geostatistics. New York : Applied Science, 1979. 129p.
- COSTA NETO, P. L. de O. Estatística. São Paulo : ed. Blücher, 1987. 264 p.
- CRUCIANI, D. E. Aplicação do método da moderado de neutrons no estudo do balanço hídrico em solo cultivado com cana de açúcar. Piracicaba, SP, 1971. 85 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1971.
- CULLEY, J. L. B.; McGOVERN, M. A. Single and dual probe nuclear instruments for determining water contents and bulk densities of a clay loam. Soil & Tillage Research. V. 16, nº. 3, p.245-56, 1990.
- DAVID, M. Geostatistical on reserve estimation. Elsevier. New York, V. 8, 364 p., 1977.
- DELHOME, J. P. Application de la théorie des variables régionalisées dans les science de l'eau. Paris, 1976. 163 p
- 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.

- FERRAZ, E. S. B.; MANSELL, R. S. Determining water content and bulk density of soil by gamma ray attenuation methods. Bulletin (Technical). University of Florida, Gainesville, n. 807, 51p., 1979.
- GARDNER, W. R. Water content : an overview. In : International Conference on Measurement of Soil and Plant Water Status. Logan, 1987, V. 1, p. 7-9.
- GARDNER, W. R.; KIRKHAN, D. Determination of soil moisture by neutron scattering. Soil Science. Baltimore, V. 73, p. 391-401, 1952.
- GREACEN, E. L. Soil assessment by the neutron method. Adelaid : CSIRO, Division of soil, 1981. 140 p.
- 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.
- HAVERKAMP, R.; VAUCLIN, M.; VAUCHAUD, G. Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements : 1. Local standpoint. Soil Science. Baltimore, V. 137, p.78-90, 1984.
- HEATH, O. C. S. A estatística na pesquisa científica. São Paulo : EDUSP, 1981. 95 p.
- HILLEL, D. Introduction to soil physics. Orlando : Academic, 1982. 364 p.
- HODGSON, A. S.; CHAN, K. Y. Field calibration of a neutron moisture meter in a Cracking Grey Clay. Irrigation Science. V. 8, n. 4, p. 233-44, 1987.
- JONES, T. A. Sknewness and kurtosis as criteria of normality in observed frequency distributions. Journal Sedimentary Petrology. December, 1969, p. 1622-27.
- KACHANOSKI, R. G.; JONG, E de; ROLSTON, D. E. Spatial and spectral relationships of soil properties and microtopographi : II. Density and thickness of B horizon. Soil Science Society America Journal. Madison, V. 49, p. 812-16.
- KIEHL, E. J. Manual de edafologia : relações solo-planta. São Paulo : Ceres, 1979. 264 p.
- 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. R. bras. Ci. Solo, Campinas, V.10, n.2, p. 85-90, 1986.

- MATHERON, G. Principles of geostatistics. Economic Geology. El Paso, V. 58, p. 11246-66, 1963.
- MATHERON, G. The theory of regionalized variables and its application. Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique. Fas. 5. C. G. Fontainebleau, 1971.
- 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.
- McHENRY, J. R. Theory and application of neutron scattering in the measurement of soil moisture. Soil Science. Baltimore, V. 95, p. 294-307, 1963.
- MEAD, R.; CURNOW, R. W. Statistical methods in agriculture and experimental biology. New York: Chapman and Hall, 1983. 95p
- MENK, J. R. F.; NAGAI, V. Estratégia para caracterizar a variabilidade de dados de solos com distribuição não-normal. R. bras. Ci. Solo. Campinas, V. 7, p. 311-16, 1983.
- NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W.; ERH, H. T. Spatial variability of soil water properties. Hilgardia. Berkeley, V. 42 n. 7 p.215-59.
- OLIVEIRA, J. B. de. Variação de características morfológicas, físicas e mineralógicas em duas áreas de oxissolo. Piracicaba, SP, 1973. 199 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1973.
- OLIVEIRA, M. S. de. Planos amostrais para variáveis espaciais utilizando geoestatística. Campinas, SP, 1991. 100 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Matemática, Estatística e Ciência da Computação, Universidade Estadual de Campinas, 1991.
- PERFECT, E.; GROENEVELT, P. H.; KAY, B. D.; GRANT, C. D. Spatial variability of soil penetrometer measurements at the mesoscopic scale. Soil & Tillage Research. V. 16, n. 3, p. 257-71, 1990.
- PHILIPS, R. E.; JENSEN, C. R.; KIRKHAM, D. Use of radiation equipment for plow-layer density and moisture. Soil Science. Baltimore, V. 89, p. 2-7, 1960.
- PREVEDELLO, B. M. S. Variabilidade espacial de parâmetros de solo e planta. Piracicaba, SP, 1987. 166 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1987.

- RAIJ, B. VAN. Avaliação da fertilidade do solo. Piracicaba. POTAFOS, 1987. 142 p.
- 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.
- 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.; CAMARGO, O. A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois latossolos. R. bras. Ci. Solo. Campinas, V. 10, n. 2, p. 91-95, 1986.
- SILVA, A. P. da.; LIBARDI, P. L.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial da resistência a penetração de um latossolo vermelho-escuro ao longo de uma transeção. R. bras. Ci. Solo. Campinas, V.13, n. 1, p. 1-5, 1989.
- SOKAL, R. R., ROHLF, F. J. Biometry. San Francisco : Freeman, 1969.
- SOUZA, M. L. P., LIBARDI, P. L., REICHARDT, K. Propagação de erros na medida de fluxos de água no solo em condições de campo. R. bras. Ci. Solo. Campinas, V. 3, n. 3, p. 137-40, 1979.
- SPIEGEL, M. R. Estatística. São Paulo : Mcgraw-Hill do Brasil, 1977. 580 p. (Coleção Schaum).
- 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, 1983.
- TURATTI, A. L. Variabilidade espacial do armazenamento de água em Terra Roxa Estruturada. Piracicaba, SP, 1990. 88 p. Tese (Doutorado em Agronomia. Área de concentração : Solos e Nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1990.
- TURATTI, A. L.; VILLAGRA, M. M.; PONCE, J. E.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Variabilidade espacial do solo e sua implicação na calibração de sondas de nêutrons. R. bras. Ci. Solo. Campinas, V. 14, n. 3, p. 259-62, 1990.

- 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.
- VAUCLIN, M.; VIEIRA, S. R.; BERNARD, R.; HATFIELD, J. L. Spatial variability of surface temperature along transects of a bare soil. Water Resources Research. Washington. V. 18, p. 1677-86, 1982.
- 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 kriging estimation of field - measured properties. Soil Science Society America Journal. (no prelo).
- VILLAGRA, M. M. Variabilidade de medidas de tensiômetros em Terra Roxa Estruturada. Piracicaba, SP, 1988. 64 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia. Área de concentração: Energia Nuclear na Agricultura). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1988.
- VISWANBHARAN, K. Use of neutron scattering technique for estimating soil water content in the lateritic soil of Central Kerala. Current Science. V.55, n.22, nov., 1986
- 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.

## 9 - ABSTRACT

The objectives of this work are: a) the study of the variability of the soil moisture content and of the bulk density through classical statistics methods and geostatistics; b) emphasize the importance of representative sampling in soils and checking assumption concerning the independence of samples and homogeneity of soils; c) evaluation the water content distribution in the soil along the time and to verify the existency of a relation between soil moisture content and a relation between bulk density in two different depths (30 and 60 cm) using scaling semivariograms; d) verify the influence of the spatial variability in the soil moisture content and bulk density in the calibration of a neutron probe. The experiment was carried out in a "Latosolo Roxo", at the "Centro Experimental" of the Instituto Agronômico de Campinas (Fazenda Santa Eliza), in Campinas, São Paulo State, Brazil. During the tests it was implanted a culture of lab-lab on an experimental area of 120x160 m. The data acquisition of the variables in study was made through a sistematic sampling with 20 m lag between samples. Samples and determinations were obtained at 30 and 60 cm of depth. The soil moisture content was determinated

along the time by the gravimetric method; the bulk density was evaluated using the volumetric ring method. A neutron probe (model SOLO 25S equipped with an Americium-Berilium font of 1,48 GBq (40 mCi)) was used to evaluate the soil moisture content in three different dates. Using the experimental values of soil moisture content and bulk density the statistical moments were calculated. It was possible to recognize a normal distribution and low deviations for these variables. The experimental semivariograms showed proportionateness among the experimental periods for soil moisture content. The bulk density also showed proportionateness for the two depths. It was not possible to calibrate the neutron probe due to the small variation of soil moisture content during the experimental period.