

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE INDICADORES DA
COMPACTAÇÃO DE TERRA ROXA ESTRUTURADA, SOB DOIS
SISTEMAS DE PREPARO, CULTIVADA COM FEIJÃO
(*Phaseolus vulgaris* L.) IRRIGADO**

JOSÉ DE DEUS VIANA DA MATA
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Dr. SIDNEY ROSA VIEIRA

Tese apresentada à Escola Superior de
Agricultura “Luiz de Queiroz”,
Universidade de São Paulo, para obtenção
do título de Doutor em Agronomia, Área de
Concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Outubro - 1997

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - Campus "Luiz de Queiroz"/USP

Mata, José de Deus Viana da

Variabilidade espacial de indicadores da compactação de terra roxa estruturada sob dois sistemas de preparo, cultivada com feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigado / José de Deus Viana da Mata. - Piracicaba, 1997.

73 p. : il.

Tese (doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1997.

Bibliografia.

1. Compactação 2. Feijão irrigado 3. Física do solo 4. Geoestatística 5. Variabilidade espacial I. Título

CDD 631.43
635.652

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE INDICADORES DA
COMPACTAÇÃO DE TERRA ROXA ESTRUTURADA, SOB DOIS
SISTEMAS DE PREPARO, CULTIVADA COM FEIJÃO
(*Phaseolus vulgaris* L.) IRRIGADO**

JOSÉ DE DEUS VIANA DA MATA

Aprovada em: 24.11.1997

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Paulo Leonel Libardi
Prof. Dr. Álvaro Pires da Silva
Prof. Dr. José Frederico Centurion
PqC. Dra. Sonia Carmela Falci Dechen
PqC. Dr. Sidney Rosa Vieira

ESALQ/USP
ESALQ/USP
UNESP
IAC
IAC



Dr. SIDNEY ROSA VIEIRA
Orientador

Aos meus pais **Jesulino e Anastácia**,

DEDICO

À minha esposa **Ana Tereza**, meu filho **Felipe**

e

aos meus irmãos **Jesulino e João**,

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Ao Pesquisador Científico Dr. Sidney Rosa Vieira, pela segura orientação, pelos ensinamentos e pela oportunidade oferecida para o aprendizado de uma nova linha de pesquisa em solos.

Ao Professor Dr. Antônio Carlos Andrade Gonçalves, pela amizade, dedicação e efetiva contribuição na realização deste trabalho.

À Pesquisadora Científica Dr^a. Sonia Carmela Falci Dechen, pela valiosa contribuição prestada durante a defesa deste trabalho e nas correções pós-defesa.

Ao Professor Dr. Geraldo Victorino de França pela confiança depositada e pela receptividade quando do início do curso de pós-graduação.

Ao Professor Dr. Marcos Luiz de Paula Souza pelas sugestões apresentadas ao trabalho e por permitir a utilização do Laboratório de Física de Solos do Setor de Ciências Agrárias da UFPR.

Aos colegas professores Roberto Rezende, Cássio Antônio Tormena, Marcos Rafael Nanni, Gilberto Catunda Sales, Raimundo Pinheiro Neto, Jamil Constantin, José Carlos Pinto, Érico Sengik, Antônio Carlos Saraiva da Costa, Antônio Saraiva Muniz, Lineu Krul Guasque, Elias Nunes Martins e Geraldo Tadeu dos Santos pelo incentivo, colaboração e sugestões apresentadas.

À Professora Ana Tereza Tebet Viana da Mata pela colaboração na revisão de português.

Aos colegas de pós-graduação Adeodato Ari Cavalcante Salviano e Luiz Cláudio de Paula Souza, pelo convívio, sugestões e contribuição na realização deste trabalho.

Aos técnicos de laboratório Célia Dágina Paralego, Silvia Eliana Tanno Miranda, Gleise Karling, Marlene Gobbi, Lucílio Gobbi e Edilene Pereira da Rocha Gobbi pela colaboração na determinação de parte das análises físicas e químicas deste trabalho, no Laboratório de Solos da UEM.

Ao técnico agropecuário Osmar Passolongo pela efetiva colaboração nas determinações e amostragens de campo.

Ao operador de máquinas Laerço Parma pela colaboração nas operações de preparo de solo e semeadura.

Às técnicas de laboratório Valdina Celestino Rocha e Carla M. S. Camargo do Laboratório de Física de Solos do Departamento de Solos do Setor de Ciências Agrárias da UFPR, pela colaboração na determinação de parte das análises físicas deste trabalho.

À coordenação do Centro de Treinamento em Irrigação da UEM, por ceder a área para o experimento de campo e pelo apoio logístico.

Ao Departamento de Solos do Setor de Ciências Agrárias da UFPR, por ceder o Laboratório de Física de Solos para a realização de parte das análises deste trabalho.

À Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Agronomia, pela liberação para a realização deste curso de pós-graduação.

À Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da UEM pela confiança, estímulo e apoio na realização do curso e do trabalho.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Departamento de Ciência do Solo, pela oportunidade de realização deste curso.

À CAPES/PICD, pela concessão da bolsa de estudos.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	x
RESUMO	xv
SUMMARY	xvi
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Variabilidade espacial	3
2.2 Variabilidade espacial e produtividade das culturas	4
2.3 Compactação e produtividade	5
2.4 Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo e sistemas de preparo	7
2.5 Variabilidade do solo e planejamento experimental	9
2.6 Geoestatística na análise da variabilidade espacial do solo	12
2.6.1 Semivariograma	12
2.6.2 Semivariograma cruzado	13
2.6.3 Krigagem	14
2.6.4 Auto- validação	15
2.6.5 Escalonamento de semivariograma	16
3 MATERIAL E MÉTODOS	17
3.1 Caracterização do local	17
3.2 Disposição do experimento de campo	18
3.3 Fases de determinações e amostragens de campo antes do preparo de solo	18
3.4 Tratamentos	19
3.5 Implantação, condução e colheita da cultura	19

	Página
3.6 Determinações e amostragens de campo após a colheita da cultura	20
3.7 Resistência à penetração	20
3.8 Determinações em laboratório	21
3.8.1 Curvas de retenção da água	21
3.8.2 Macroporosidade	21
3.8.3 Capacidade de campo	22
3.8.4 Outras determinações	22
3.9 Análises estatísticas	22
3.9.1 Estatística	22
3.9.2 Geoestatística	23
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1 Macroporosidade	25
4.2 Curvas de retenção de água	34
4.3 Conteúdo de água na capacidade de campo	42
4.4 Índice de cone	45
4.5 Rendimento da cultura	56
5 CONCLUSÕES	64
ANEXOS	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

LISTA DE TABELAS

	Página
01 Momentos estatísticos para os valores de macroporosidade (m^3/m^3) nos tratamentos que receberam aração e escarificação, amostrados antes do preparo e após a colheita	25
02 Parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas, relação entre efeito pepita e patamar e variâncias amostrais para macroporosidade nas parcelas sob aração (ara) e sob escarificação (esc), antes do preparo (ap) e após a colheita (pc).....	32
03 Momentos estatísticos para os valores de umidade (m^3/m^3) na parcela sob aração antes do preparo e após a colheita, nas tensões adotadas.....	35
04 Momentos estatísticos para os valores de umidade (m^3/m^3) na parcela sob escarificação antes do preparo e após a colheita, nas tensões adotadas.....	37
05 Momentos estatísticos para a umidade (m^3/m^3) na capacidade de campo na aração e na escarificação antes do preparo e após a colheita.....	43
06 Momentos estatísticos para os valores de índice de cone no tratamento aração, amostrado antes do preparo e após a colheita e no tratamento escarificação, amostrado antes do preparo o após a colheita, nas camadas superficial (0 - 0,10 m), intermediária (0,10 - 0,20 m) e profunda (0,20 - 0,30 m).....	46

	Página
07 Parâmetros dos modelos escalonados ajustados aos semivariogramas experimentais nos tratamentos que receberam aração (ara) e escarificação (esc) amostrados antes do preparo (ap) e após a colheita (pc) para as camadas superficial (s), intermediária (i) e profunda (p).....	51
08 Momentos estatísticos para o rendimento (Mg/ha) de massa total e de grãos, nos tratamentos sob aração e sob escarificação.....	56
09 Parâmetros dos semivariogramas, modelo ajustado e relação entre efeito pepita e patamar para o rendimento de grãos nas parcelas referentes à aração (aragr) e à escarificação (escgr).....	59

LISTA DE FIGURAS

	Página
01 Valores médios de macroporosidade nos tratamentos com aração (ara), e escarificação (esc), amostrados antes do preparo (ap) e após a colheita (pc).....	26
02 Valores de macroporosidade (m^3/m^3) amostrada antes do preparo de solo nas parcelas sob aração (araap) e sob escarificação (escap).....	27
03 Macroporosidade (m^3/m^3) na parcela submetida à aração, amostrada antes do preparo (araap) e após a colheita (arapc).....	28
04 Macroporosidade (m^3/m^3) na parcela submetida à escarificação, amostrada antes do preparo (escap) e após a colheita (escpc).....	29
05 Semivariogramas para macroporosidade amostrada antes do preparo de solo nas parcelas sob aração (araap) e sob escarificação (escap).....	30
06 Semivariogramas para macroporosidade na aração (a) e na escarificação (b), amostrada antes do preparo e após a colheita.....	31
07 Superfícies de valores de macroporosidade na parcela sob aração, amostrada antes do preparo (a) e depois da colheita (b).....	32

	Página
08 Superfícies de valores de macroporosidade na parcela sob escarificação, amostrada antes do preparo (a) e depois da colheita (b).....	33
09 Gráficos box-plot para os dados de umidade (m^3/m^3) na aração antes do preparo (a) e após a colheita (b), para as 11 tensões adotadas.....	36
10 Gráficos box-plot para os dados de umidade (m^3/m^3) na escarificação antes do preparo (a) e após a colheita (b), para as 11 tensões adotadas...	38
11 Valores médios de umidade com base em volume nas tensões adotadas, para os dados obtidos na parcela que recebeu aração, amostrada antes do preparo (araap) e após a colheita (arapc).....	39
12 Valores médios de umidade com base em volume nas tensões adotadas, para os dados obtidos na parcela que recebeu escarificação, amostrada antes do preparo (escap) e após a colheita (escpc).....	40
13 Valores médios de umidade com base em massa, nas tensões adotadas, para os dados obtidos na parcela que recebeu aração, amostrada antes do preparo (araap) e após a colheita (arapc).....	41
14 Valores médios de umidade com base em massa, nas tensões adotadas, para os dados obtidos na parcela que recebeu escarificação, amostrada antes do preparo (escap) e após a colheita (escpc).....	41

	Página
15 Semivariogramas para umidade a 0,006 MPa, para aração (a), amostrada antes do preparo (araap) e após a colheita (arapc) e escarificação (b), amostrada antes do preparo (escap) e após a colheita (escpc).....	44
16 Valores médios de índice de cone no tratamento aração amostrado antes do preparo (araap) e após a colheita (arapc) e no tratamento escarificação, amostrado antes do preparo (escap) e após a colheita (escpc) nas camadas superficial, intermediária e profunda.....	45
17 Distribuição granulométrica (g/kg) nos tratamentos aração e escarificação nas situações antes do preparo e após a colheita, nas camadas superficial (s), intermediária (i) e profunda (p).....	47
18 Índice de cone na parcela sob aração, camada superficial, antes do preparo (araaps) e após a colheita (arapcs); camada intermediária, antes do preparo (araapi) e após a colheita (arapci) e camada profunda, antes do preparo (araapp) e após a colheita (arapcp)..	49
19 Índice de cone na parcela sob escarificação, camada superficial, antes do preparo (escaps) e após a colheita (escpcs); camada intermediária, antes do preparo (escapi) e após a colheita (escpci); e camada profunda, antes do preparo (escapp) e após a colheita (escpcp).....	49
20 Semivariogramas para índice de cone na parcela sob aração, amostrados antes do preparo (a) e após a colheita (b), para a camada superficial (araaps e arapcs), para a camada intermediária (araapi e arapci) e para a camada profunda (araapp e arapcp).....	50

	Página
21 Semivariogramas escalonados para os dados de índice de cone na parcela sob escarificação, para a camada superior (a), antes do preparo (escaps) e após a colheita (escpcs) e para a camada intermediária (b), antes do preparo (escapi) e após a colheita (escpci).....	52
22 Semivariogramas para índice de cone na parcela sob escarificação, para a camada profunda, amostrados antes do preparo (escapp) e após a colheita (escpcp).....	53
23 Superfícies de valores de índice de cone na parcela sob escarificação, amostrados antes do preparo (a) e após a colheita (b), na camada profunda (0,20 - 0,30 m).....	54
24 Superfícies de valores de índice de cone na parcela sob escarificação, amostrados antes do preparo (a) e após a colheita (b), na camada intermediária (0,10 - 0,20 m).....	55
25 Relação entre rendimento de grãos (Mg/ha) e de massa total de plantas (Mg/ha) para as parcelas sob aração (aragr) e sob escarificação (escgr).....	57
26 Semivariogramas para rendimento de grãos, na parcela sob aração (aragr) e na parcela sob escarificação (escgr).....	58
27 Regressões entre rendimento de grãos e índice de cone na camada intermediária, para as parcelas sob aração e sob escarificação.....	59

	Página
28 Superfície de valores de rendimento de grãos (Mg/ha) para as parcelas sob (a) aração e sob escarificação (b).....	61
29 Superfície de valores de índice de cone para a camada intermediária na aração (a) e na escarificação (b).....	62
30 Semivariograma cruzado para rendimento de grãos e índice de cone na parcela sob escarificação, camada intermediária, após a colheita (escpci).....	63

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE INDICADORES DA COMPACTAÇÃO DE
TERRA ROXA ESTRUTURADA, SOB DOIS SISTEMAS DE PREPARO,
CULTIVADA COM FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* L.) IRRIGADO**

Autor: JOSÉ DE DEUS VIANA DA MATA

Orientador: Dr. SIDNEY ROSA VIEIRA

RESUMO

No segundo semestre de 1995, no Centro Técnico de Irrigação da Universidade Estadual de Maringá (PR), foram estudadas as modificações ocorridas na macroporosidade, capacidade de água disponível e resistência à penetração numa terra roxa estruturada, submetida a dois sistemas de preparo de solo. As determinações e amostragens foram desenvolvidas antes do preparo de solo e após a colheita da cultura. Os tratamentos foram conduzidos em duas grades retangulares sob um pivô central, cada uma com 44 pontos espaçados na equidistância de 4 m. A produtividade da cultura de feijão foi avaliada e correlacionada com os valores das propriedades do solo. A falta de aleatoriedade tanto de parâmetros da planta como do solo impediram que os testes estatísticos tradicionais mostrassem as interações entre solo e planta, neste experimento. O semivariograma mostrou que os parâmetros de solo e planta analisados apresentaram estrutura espacial e, se por um lado, a análise de regressão foi inadequada para identificar a forte correlação espacial existente entre a produtividade e o índice de cone, o semivariograma cruzado mostrou, claramente, esta correlação.

**SPATIAL VARIABILITY OF THE COMPACTION INDICATORS OF A
PALEUDALF, UNDER TWO TILLAGE SYSTEMS, CULTIVATED WITH
IRRIGATED BEAN (*Phaseolus vulgaris* L.)**

Author: JOSÉ DE DEUS VIANA DA MATA

Adviser: Dr. SIDNEY ROSA VIEIRA

SUMMARY

In the second semester of 1995 at the Tecnical Center of Irrigation of University of Maringa (PR) - Brazil, the changes in macroporosity, available water capacity and soil penetration resistance were studied in a Paleudalf soil submitted to conventional tillage and chisell plow. The determinations and sampling took place in two time situations: before soil tillage and after harvest. The field plots constituted of two rectangular grids under a center pivot, each one with 44 points spaced by 4 meters from each other. Bean plant productivity was measured and correlated with soil properties. The lack of randomness in biomass and grain productivity and the soil properties did not allow the use of tradicional tests to show the interactions between soil and plant parameters. The semivariograms showed that the soil and plant parameters had spatial structure, and if in one hand, the regression analisys was inadequate to identify the strong spatial correlation between the yield and the cone index, the cross semivariogram showed, clearly, this correlation.

1 INTRODUÇÃO

Pesquisadores e produtores rurais, que desconhecem as ferramentas da geoestatística, intuitivamente, admitem e convivem com a variabilidade espacial de atributos do solo e da planta. A dificuldade de selecionar áreas homogêneas para a instalação de experimentos é prova notória desta constatação, pois a heterogeneidade de propriedades do solo se faz presente, mesmo quando tais trabalhos são desenvolvidos em laboratórios ou casas de vegetação. Visando aumentar o rendimento operacional dos conjuntos motomecanizados, antecipar o fechamento das linhas de plantio bem como obter produtividade mais regular na área total, os produtores usam estratégias próprias para suplantar a existência da variabilidade espacial nas áreas de produção. A variabilidade pode se manifestar por regiões de solos que perdem umidade mais rapidamente, locais onde o processo erosivo se manifesta com maior intensidade ou onde a população de plantas apresenta-se com altura irregular ou aquém do estande considerado ideal para a cultura em questão. Enfim, áreas que produzem menos e áreas que produzem mais, devido a causas invariavelmente diferentes.

A contribuição dos estudiosos da variabilidade espacial se fundamenta justamente em encontrar o porquê desses acontecimentos. Para tanto, é mister sua detecção, compreensão e quantificação, para daí sim, de posse de um conhecimento organizado, tirar proveito da variabilidade, maximizando a produção e reduzindo os custos. É interessante lembrar que, desde o início deste século, os pesquisadores já desenvolviam experimentos preocupados com a variabilidade das propriedades do solo, mesmo sem deterem o conhecimento das ferramentas que hoje permitem melhor estudar e compreender o fenômeno. Concluíram que, à medida que aumentava o tamanho da parcela experimental, diminuía a variância das propriedades, até um ponto no qual se estabilizava. É trabalho árduo investigar quais e a que ponto as variáveis do

solo contribuem para aumentar ou reduzir a produtividade das culturas. Sabe-se que, no solo, uma interação de fatores exerce influência direta sobre a produtividade, destacando-se, entre os fatores físicos, a temperatura, a umidade e a aeração.

A resistência à penetração é uma das maneiras alternativas para se avaliar a compactação dos solos agrícolas. Poderia ser considerado fator direto influenciando a produtividade, se o diagnóstico real da causa da redução ou a própria frustração de uma lavoura fosse tarefa fácil e assim atribuída à compactação. Muitas vezes, a compactação atua de forma indireta ou de maneira interativa com outras propriedades do solo, na produtividade das culturas. A cultura pode perecer por déficit hídrico, mas a causa principal e antecedente pode ter sido a impossibilidade do sistema radicular da cultura ocupar o volume de solo necessário, quer para sua sustentação quer para providenciar o aporte hidro-mineral para seu desenvolvimento. Inúmeras outras condições podem mascarar o fenômeno, principalmente levando-se em consideração a época do diagnóstico. Igualmente, pouco tem sido feito no sentido de se testar sistemas de preparo de solo, já devidamente consagrados para culturas de sequeiro, em áreas irrigadas. O manejo de tais áreas é melindroso e, pelas suas características, o risco de compactação mecânica é mais iminente.

A descompactação mecânica através de implementos com hastes é uma prática de conservação do solo e da água. Trabalhos que objetivem mapear a ocorrência da compactação no campo poderão constituir valiosa ferramenta para o planejamento das técnicas de descompactação mecânica e cultural, com eficiência e custo adequado, sem sub ou superdimensionar as operações de recuperação do solo.

Assim, a contribuição deste trabalho foi investigar o comportamento espacial de alguns atributos físicos do solo, especialmente aqueles responsáveis pela compactação, quando submetido a dois sistemas de preparo em área irrigada, e demonstrar a aplicabilidade prática da geoestatística em compreender as relações destas variáveis com a produtividade das culturas, às vezes, não identificadas por outras ferramentas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Variabilidade espacial

O estudo da variabilidade do solo tem por objetivo conhecer mais do meio em que as plantas crescem e, com isso, recomendar um manejo adequado de solos em grandes extensões agrícolas. A recente ênfase dada a estudos de variabilidade, além de ajudar na solução de problemas práticos, tem aberto novas perspectivas na ciência do solo. A mistura de modelos determinísticos com a variabilidade casual tem explicado aspectos até hoje não compreendidos. Conforme Reichardt (1985), a maioria dos lavradores orientam suas decisões em termos de probabilidade. Questões como as que se seguem são freqüentes na agricultura prática. Qual é a probabilidade de chover amanhã? Qual a proporção do campo que está suficientemente úmida para germinação das sementes? Se porções da área total têm baixa fertilidade, como se maneja o campo todo?

Uma das premissas básicas para que se possa utilizar as ferramentas da geoestatística nas análises de dados experimentais é que a diferença média das amostras em função da distância seja independente da posição espacial e que exista a variância de valores medidos em função da distância (Vieira et al., 1983). Depreende-se que quando existe tendência, ou seja, há crescimento do valor da propriedade em determinada direção ou região, não está ocorrendo estacionaridade. Nesse caso deve-se remover a tendência e as inferências estatísticas deverão ser feitas com os valores residuais.

Segundo Journel & Huijbregts (1978), nos casos em que existir dúvida sobre a existência de tendência nos dados, esta pode ser conceituada ou entendida como “quase estacionaridade”. É o caso quando a existência ou não de tendência depende da escala.

Por exemplo, a altitude média da cidade de Maringá, no Paraná, é 540 metros acima do nível do mar. Dentro dos limites do município é possível encontrar altitudes entre 480 e 620 metros. E ainda, em determinadas localidades poderá haver até crescimento da altitude em determinada direção. Nesta situação estaria caracterizada a existência de tendência. Por outro lado se a altitude fosse medida sobrevoando a cidade a uma altura de 10.000 m, a hipótese de tendência dos valores de altitude provavelmente passaria despercebida.

2.2 Variabilidade espacial e produtividade das culturas

Poucos trabalhos têm sido conduzidos sobre as relações entre a variabilidade espacial do solo e a variabilidade da produtividade das culturas no campo. Alguns resultados obtidos são até contraditórios, possivelmente porque os aspectos envolvidos em tal interação precisam ser mais bem conhecidos.

Vieira et al. (1987) e Bhatti et al. (1991) observaram variabilidade da produtividade da cultura acompanhando a do solo. Já Cassel et al. (1988) apresentaram dados mostrando a variabilidade na produtividade de milho em quatro sistemas de cultivo sem, contudo, apresentar dados de variabilidade do solo que servissem de suporte às observações feitas. É possível que a extensão do sistema radicular possa se constituir num fator de ajuste às variações do solo, pelo menos a curtas distâncias.

Informações associando a variabilidade espacial que se observa na produtividade das culturas, em relação à água de irrigação, foi apresentada por Gurovich (1982) e por Bresler et al. (1984). MacBratney & Webster (1981) apresentaram estudo considerando a variabilidade espacial obtida na produção de trigo. Vieira et al. (1983), utilizando dados de produção de trigo e de porcentagem de nitrogênio nos grãos, encontraram estrutura da variância, para o primeiro, com patamar encontrado aproximadamente a 1/5 da distância total, sendo que os valores da porcentagem de N nos grãos apresentaram semivariogramas com estrutura muito pouco definida.

MacBratney (1984) desenvolveu dois experimentos de campo, relacionados com a variação encontrada na distribuição da produtividade das culturas de laranja e de arroz.

Confrontando os resultados dos autocorrelogramas, ambos bi-dimensionais, foi observada a existência de maior anisotropia na distribuição espacial da produtividade de arroz, comparativamente à de laranja.

Uehara et al. (1984), trabalhando com arroz e propriedades físicas e químicas do solo em grandes áreas experimentais concluíram que o alcance da dependência espacial para os componentes da produtividade da cultura foi maior do que para as propriedades do solo. O coeficiente de correlação mais elevado foi obtido para o peso de grãos secos com cálcio trocável, com o valor de 0,55. Os autores acreditam que a variabilidade natural do solo poderá ser explorada para responder questões agronômicas. Prevedello (1987) encontrou maiores coeficientes de variação para atributos da planta comparativamente aos do solo.

Esta etapa do uso da geoestatística como ferramenta para interpretar as relações de dependência espacial entre os atributos do solo e a produtividade das culturas está em seu início e as perspectivas de desenvolvimento parecem de grande interesse em muitas disciplinas (Gurovich, 1982 ; Salviano, 1996).

2.3 Compactação e produtividade

Voorhes et al. (1986) sugeriram que, no subsolo, o fator predominantemente afetado pelas altas cargas por eixo, dos conjuntos motomecanizados é a distribuição de tamanho, continuidade e orientação do sistema poroso do solo. Os mesmos autores enfatizaram que, cargas por eixo de 9 e 18 toneladas, são típicas de equipamentos utilizados em colheita e transporte de produtos agrícolas.

Primavesi (1983) observou em latossolo roxo, aumento da produtividade na cultura do feijão com uma compactação em que os valores de macroporosidade atingiram cerca de 11% e reduções de produção com acréscimos posteriores de compactação.

Forsythe & Huertas (1979) sugeriram níveis de limitação do espaço de aeração para o desenvolvimento do feijoeiro: valores superiores a 24% como não limitante, entre 24 e 18% como levemente limitante e abaixo de 5,3% como severamente depressivo.

Rovira (1975), constatou que a macroporosidade igual ou inferior a 7,4% promovia um impedimento ao desenvolvimento mais profundo das raízes do feijoeiro e crescimento satisfatório para valores em torno de 14,4%.

Rovira (1975) estudando um Molissol sem impedimento ao crescimento radicular, encontrou correlação positiva entre a profundidade da camada superficial e a produção. Concluiu que aplicações de fertilizantes reduzem a diferença de produção entre os solos em ano com precipitações regulares, mas não em ano com baixa taxa de precipitação.

Lowry et al. (1970), trabalhando com camadas compactadas em diferentes profundidades, evidenciaram que o efeito destas no rendimento do algodoeiro é mais negativo a 0,10 m do que a 0,20 ou 0,30 m de profundidade, provavelmente em função de que a maior fração do sistema radicular efetivo na absorção de água e nutrientes localiza-se na camada mais superficial do perfil.

O trabalho de Bhatti et al. (1991) mostrou que a produtividade de grãos variou em função da posição amostrada na paisagem. Maiores produtividades ocorreram na posição onde havia alto conteúdo de matéria orgânica, comparativamente às posições onde o conteúdo de matéria orgânica era baixo. Observaram, também, que o alcance de dependência espacial para a produtividade de grãos foi quase igual ao alcance de dependência espacial da água disponível no perfil (68-70m), mostrando assim que a produtividade de trigo é fortemente afetada pela água disponível no perfil de atuação do sistema radicular.

Mais recentemente, Stone et al. (1994), estudando as características físico-hídricas e químicas de um Latossolo após adubação e cultivos sucessivos de arroz e feijão, sob irrigação por aspersão, concluíram que este sistema de produção causou compactação do solo, reduzindo a porosidade total, a condutividade hidráulica saturada e a água disponível entre -0,01 e -0,1MPa. Isto também foi verificado por Silva et al. (1989). Entretanto, ao contrário do verificado por aqueles autores, a água disponível entre -0,01 e -0,1MPa, amplitude de faixa de água disponível para a maioria das culturas nos Oxissolos (Sanchez, 1981), não aumentou com a compactação.

Stone et al. (1994) comentaram ainda que durante os cultivos de arroz, na estação chuvosa, o teor de K na camada superficial ficou sempre abaixo do inicial, independentemente da dose de adubo aplicada, possivelmente devido à lixiviação.

2.4 Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo e sistemas de preparo

Souza (1992) avaliou propriedades do solo como densidade, teor de argila, matéria orgânica e umidade em diferentes sistemas de preparo. Concluiu que no sistema onde a mobilização do solo ocorre em menor intensidade (plantio direto), a variabilidade espacial da densidade foi menor, comparativamente à escarificação e ao preparo convencional. Quanto à umidade e matéria orgânica, concluiu que os sistemas de plantio direto e escarificação são mais heterogêneos que o convencional.

Os sistemas de preparo e, em menor grau o tipo de solo, podem induzir diferentes magnitudes de variabilidade na resistência à penetração do solo (Selim et al., 1987). O tráfego sobre as áreas experimentais causa variabilidade significativa do índice de cone (IC), em função da profundidade e posição de amostragens (Bauder et al., 1981; Vasquez, 1989; Cassel, 1983), além das diferenças entre tratamentos de preparo. Porém, mesmo em condições de laboratório ocorre variabilidade da impedância mecânica (Stitt et al., 1982).

Impedância mecânica é a resistência física que o solo oferece a um penetrômetro ou à elongação das raízes. Assim, a impedância mecânica é frequentemente expressa pelo índice de cone (IC), que é a razão entre a força para penetrar um pistão através do solo e a área basal do cone. Enfatiza-se ainda que os valores medidos do IC variam com o tipo de penetrômetro utilizado. Bengough & Mullins (1990) mostraram que os valores medidos do IC geralmente decrescem quando a área basal do cone aumenta. Geralmente o IC aumenta quando o solo perde umidade ou então quando sua densidade cresce. Entretanto, o trabalho de Mulqueen et al. (1977) mostrou que, na condição do solo apresentar altos conteúdos de umidade, os valores de resistência à penetração passam a ser independentes da densidade do solo.

Posições de amostragem na linha e na entrelinha das culturas podem ser fontes altamente significativas na variação do IC (Cassel et al., 1978), provavelmente devido ao efeito dos diferentes sistemas de preparo na mobilização do solo (Shaffer & Johnson, 1982) e à ação das raízes no processo de agregação e dessecação do solo. Pidgeon & Soane (1979) observaram acréscimos nos valores de resistência à penetração em solos sob plantio direto na Escócia. A densidade do solo estabilizou-se após três anos, enquanto que a resistência à penetração continuou aumentando. A variabilidade dos resultados de resistência à penetração tem causado dificuldades na interpretação dos dados. Esta alta variabilidade é apontada como uma desvantagem do uso do penetrômetro (Glasbey & Ossullivan, 1988). Assim, apesar das medidas de IC serem mais facilmente realizadas do que as de densidade do solo, é mais difícil interpretá-las (Bradford, 1986). O conceito de penetrabilidade linear porcentual foi utilizado por Gronevelt et al. (1984) para reduzir os problemas que a variabilidade vertical causa na interpretação dos dados. Com igual objetivo, Cassel et al. (1978), além de amostragens intensivas, consideraram os efeitos de posição na entrelinha, com e sem tráfego, e na linha da cultura, facilitando a interpretação dos dados. Tormena (1991) concluiu que a resistência à penetração mostrou-se sensível às modificações impostas ao solo pelos processos de compactação e consolidação induzidos pelo tráfego e fatores climáticos em área não irrigada.

Moolman & Huyssteen (1989), estudando a resistência do solo à penetração, mostraram, pela análise do semivariograma, que a resistência do solo à penetração é espacialmente estruturada e não distribuída ao acaso no espaço. Ressaltaram que isto é especialmente verdadeiro para as camadas mais superficiais do perfil do solo. O alcance encontrado foi de 9 m e mostrou ser relativamente constante com o aumento da profundidade do solo. Tanto o patamar como a variância das amostras diminuíram com a profundidade, indicando que as propriedades do solo que afetam a resistência à penetração tornam-se progressivamente mais uniformes no subsolo. O fato de que a resistência do solo à penetração é dependente espacialmente, sugere que o intervalo de amostragem não deve exceder o alcance de aproximadamente 9,5 m. E, para acomodar a dependência espacial da resistência à penetração do solo integralmente, as dimensões

das parcelas para o estudo de sistema de cultivo deveriam ser múltiplas desse valor. Uma particularidade da metodologia proposta por Moolman & Huyssteen (1989) é a utilização de intervalos não uniformes entre as amostragens. Numa grade retangular foram amostrados 172 pontos, dos quais 78 foram espaçados em intervalos de 1 m e o restante em intervalos de 5 m ou múltiplos deste.

Bhatti et al. (1991), usando a geoestatística para correlacionar propriedades do solo e produtividade de trigo concluíram que, para as condições em que o experimento foi realizado, o padrão espacial da produtividade da cultura e do conteúdo de fósforo do solo foram grandemente correlacionados com a matéria orgânica do solo. Concluíram também que o método de co-irrigação em blocos é promissor para estabelecer o padrão espacial da produtividade da cultura com o teor de fósforo no solo, para grandes áreas e com reduzido número de amostragens.

2.5 Variabilidade do solo e planejamento experimental

Conforme Reichardt (1985) observações feitas em estudos agrônômicos do sistema solo-planta precisam incluir considerações sobre a variabilidade espacial e temporal de solos em condições de campo. O solo e a distribuição das diferentes partes das plantas, dentro e fora dele, são fundamentalmente heterogêneos. As variações no solo são devidas às diferentes taxas nas quais atuaram os processos de sua formação e devidas às diversas atuações do homem durante seu cultivo. A distribuição radicular e da parte aérea das plantas depende das propriedades do solo, das operações para o plantio, controle de pragas, doenças e ervas daninhas. Assim, medidas de parâmetros do solo e da planta, muitas vezes apresentam irregularidades que podem ou não estar distribuídas ao acaso em relação à sua distribuição espacial no campo. Assim, é importante estabelecer critérios para definir espaçamento entre medidas a serem feitas, a fim de definir a frequência de observações e para estabelecer o número necessário de amostragens para que o valor médio obtido caracterize o local considerado. Classicamente, os pesquisadores em agronomia têm procurado alcançar estes objetivos

por meio das diversas técnicas estatísticas, aplicadas sobre dados obtidos, sem levar em conta sua distribuição espacial no campo.

Comumente, áreas e/ou solos homogêneos são escolhidos muitas vezes sem um critério bem definido de homogeneidade, nas quais parcelas são distribuídas ao acaso para evitar o efeito de irregularidades porventura existentes. Experimentos em blocos ao acaso, fatoriais etc. , são assim planejados e na análise dos dados, se a variância mostrar uma componente residual relativamente pequena, conclusões podem ser tiradas sobre diferenças entre tratamentos, interações etc. Se a componente residual da variância for relativamente grande, o que é normalmente indicado por um alto valor do coeficiente de variação, o experimento fica prejudicado. A causa pode ser a variabilidade do solo, assumido como homogêneo no início, ao se estabelecer o experimento.

Se a distribuição espacial das medidas for observada e levada em consideração na análise, em muitos casos é possível até tirar vantagem da variabilidade espacial. Esta é outra forma de planejar experimentos, nova em agronomia, mas que utiliza técnicas já anteriormente preconizadas pela geoestatística. É oportuna a observação de Reichardt (1985) de que a técnica clássica ou “casual” e a técnica geoestatística ou “espacial” se completam. Uma não exclui a outra, e perguntas não respondidas por uma, muitas vezes podem ser respondidas pela outra.

Experimentos que envolvem cultivo requerem grandes parcelas para cada tratamento. Assim, os estudos com cultivo são geralmente pouco repetidos e desta maneira ficam mais sensíveis aos efeitos da heterogeneidade do solo (Es et al., 1989). Depreende-se que a insuficiência de repetições resulta em pobre estimativa do erro, conseqüentemente a capacidade para se detectar diferenças entre os tratamentos é baixa nestes tipos de experimentos. Este problema pode ser agravado pela super-estimativa do erro experimental devido à alta variabilidade do solo. Es et al. (1989) frisaram ainda que o grau de acuracidade requerido em alguns estudos não pode ser obtido com desenhos experimentais convencionais. Ainda segundo os autores, o controle dos efeitos “adversos” da heterogeneidade do solo pode ser visto através de vários caminhos. Um lógico, mas nem sempre o mais apropriado, é conduzir o estudo em área uniforme. Este método poderia produzir os resultados desejados, mas o local poderia ser não

representativo das regiões geográficas para as quais os resultados do estudo poderiam ser extrapolados. As localidades experimentais deveriam refletir as condições do solo e a variabilidade que existe na região. Estas colocações são idéias conceituais pois, raramente é possível selecionar uma grande área para pesquisa com propriedades do solo uniformes. Es et al. (1989) mostraram que os efeitos “adversos” da variabilidade do solo podem também ser controlados através do desenho experimental e aperfeiçoados pela análise estatística.

Pearce (1980) esclareceu que a disposição dos experimentos em blocos completos aumenta a precisão do trabalho apenas se forem apropriadamente instalados, processo que exige um conhecimento prévio das condições do solo e do local. Os desenhos experimentais com linhas e colunas são uma extensão do parcelamento em blocos em duas direções e podem aumentar o controle da variação local. Infelizmente, estes desenhos ditam uma disposição física das parcelas experimentais que raramente é praticada em estudos de cultivo.

Mendes (1970) apontou os métodos do vizinho mais próximo e a análise de tendências como alternativas satisfatórias para controlar a variabilidade do solo. O método do vizinho mais próximo usa o ajuste da covariância das parcelas dos vizinhos adjacentes para reduzir os efeitos de posição. Entre outras desvantagens, o método assume uma ou duas dimensões de 1ª ordem com estrutura autorregressiva e necessita de um desenho experimental bastante rigoroso. A análise de tendência remove os efeitos da variabilidade espacial pelo ajuste de um modelo de resposta superficial usando regressão polinomial sobre os resíduos. São desvantagens do método o problema do número de termos a serem incluídos na regressão e a validação prática das hipóteses das respostas de superfície. O autor conclui que os dois métodos têm desempenho relativo superior à disposição em blocos e ainda não requerem conhecimento prévio dos padrões de variabilidade do local.

2.6 Geoestatística na análise da variabilidade espacial do solo

A análise geoestatística de uma variável única é o método que descreve a variabilidade espacial e envolve principalmente: o semivariograma, que é a estimativa e modelagem da estrutura espacial da variância e a krigagem que é a predição de valores da variável regionalizada (Vieira et al., 1983) em pontos ou regiões não amostrados. A geoestatística baseia-se na teoria das variáveis regionalizadas, segundo a qual os valores de uma propriedade do solo estão de alguma forma relacionados à sua distribuição espacial; logo, as observações tomadas a curtas distâncias devem ser mais semelhantes do que aquelas tomadas a distâncias maiores.

Variável regionalizada é aquela que mostra características intermediárias entre as variáveis verdadeiramente casuais e as completamente determinísticas. Apresenta uma aparente continuidade no espaço, sendo representada por funções numéricas ordinárias que assumem um valor definido a cada ponto no espaço e matematicamente descreve um fenômeno natural (Landim, 1988). Em quase todas as áreas existem zonas que são mais ricas do que outras para uma determinada variável; logo, amostras tomadas numa zona mais rica seriam, em média, mais ricas do que aquelas tomadas numa zona mais pobre, isto é, o valor da variável regionalizada $f(\mathbf{x})$ depende da posição espacial \mathbf{x} .

A geoestatística dispõe de diversas ferramentas que permitem estudar o grau de dependência espacial de parâmetros do solo ou das plantas e a interação entre eles. Dentre elas destacam-se:

2.6.1 Semivariograma

A estimativa da dependência espacial ou temporal entre amostras vizinhas pode ser feita através da autocorrelação que é de grande utilidade quando se está fazendo amostragem em uma direção. Quando a amostragem envolve duas direções a ferramenta mais apropriada na estimativa da dependência entre amostras é o semivariograma (Silva, 1988). O semivariograma define também os parâmetros necessários para a

estimativa de valores para locais ou regiões não amostrados, através da técnica de krigagem. O semivariograma é estimado por:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (01)$$

onde $N(\mathbf{h})$ é o número de pares experimentais de dados separados pelo vetor \mathbf{h} e z representa os valores medidos para propriedades do solo ou parâmetros da cultura. O semivariograma normalmente é representado pelo gráfico de $\gamma^*(\mathbf{h})$ versus \mathbf{h} . A partir do ajuste de um modelo matemático aos dados experimentais são definidos os parâmetros do semivariograma, a saber: a) efeito pepita, C_0 , que é o valor de γ quando $\mathbf{h} = \mathbf{0}$; b) quando \mathbf{h} aumenta, $\gamma(\mathbf{h})$ freqüentemente aumenta até uma distância \mathbf{a} , chamada de **alcance** da dependência espacial, a partir da qual $\gamma(\mathbf{h})$ permanece aproximadamente constante; c) o valor de $\gamma(\mathbf{h})$ neste ponto é chamado de **patamar**, C_2 , e aproxima-se da variância dos dados, se ela existe, e d) C_1 é calculado pela diferença entre C_2 e o C_0 . Assim, amostras separadas por distâncias menores do que o alcance são correlacionadas espacialmente, enquanto que aquelas separadas por distâncias maiores não o são, uma vez que o semivariograma sendo igual à variância dos dados implica em variação aleatória. O alcance também define o raio máximo para interpolação por krigagem, onde os pesos utilizados na ponderação podem afetar os valores estimados (Souza, 1992).

2.6.2 Semivariograma cruzado

O semivariograma cruzado é uma ferramenta em geoestatística que permite verificar o relacionamento entre as variabilidades de duas séries de valores espacialmente medidos, por exemplo propriedades do solo e atributos da planta, tornando possível avaliar se a variabilidade de uma série é acompanhada pela variabilidade da outra, tanto em termos positivos como negativos (Souza, 1992). Para

duas funções aleatórias z_1 e z_2 , amostradas a uma distância h , o semivariograma cruzado é igual a:

$$\gamma_{12}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z_1(x_i) - z_1(x_i + h)] [z_2(x_i) - z_2(x_i + h)] \quad (02)$$

onde $N(h)$ é o número de valores separados pelo vetor h e z_1 representa a propriedade 1 e z_2 a propriedade 2. O semivariograma cruzado é calculado apenas para os locais onde as duas variáveis foram medidas (Bhatti et al., 1991).

Ao contrário do semivariograma que é sempre positivo, o semivariograma cruzado pode assumir valores tanto positivos, indicando que o aumento em uma das variáveis é acompanhado pelo aumento da outra, como negativos; neste caso indicando que a um aumento em uma das variáveis corresponde um decréscimo na outra.

2.6.3 Krigeagem

Existindo correlação espacial definida pelo semivariograma, a krigeagem permite realizar estimativa de valores para locais ou regiões não amostrados através de uma média ponderada dos valores observados na sua vizinhança. O valor interpolado da variável regionalizada z no local x_0 é:

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) \quad (03)$$

onde N é o número de valores vizinhos medidos $z(x_i)$ usados na estimação e λ_i são os ponderadores aplicados a cada $z(x_i)$, os quais são selecionados de forma que a estimativa obtida seja não tendenciosa. Para isso, as condições de não tendenciosidade e de variância são mínimas, ou seja:

$$E [Z^*(x_0) - Z(x_0)] = 0 \quad (04)$$

$$\sigma_0^2(x_0) = E[Z^*(x_0) - Z(x_0)] \quad (05)$$

2.6.4 Auto validação

A técnica conhecida como auto-validação (“jack-knifing”) é um teste de validação cruzada que permite calcular os erros de estimativa e avaliar a qualidade do método de estimativa. Basicamente a técnica consiste em, de posse de um conjunto de n valores medidos numa determinada área e do modelo do semivariograma experimental ajustado a tais dados, calcular o conjunto de n valores estimados para os mesmos locais daqueles medidos. Assim, para cada posição \mathbf{x}_i , onde existe um valor medido $z(\mathbf{x}_i)$, é obtido um valor estimado $z^*(\mathbf{x}_i)$ e a variância de estimação $\sigma^2_{z(\mathbf{x}_i)}$, com base em n vizinhos mais próximos de \mathbf{x}_i , com exceção do próprio \mathbf{x}_i . O resultado será um conjunto de n valores medidos $z(\mathbf{x}_i)$, n valores estimados $z^*(\mathbf{x}_i)$ e n variâncias de estimação $\sigma^2_{z(\mathbf{x}_i)}$, permitindo calcular os erros reduzidos $\mathbf{R}(\mathbf{x}_i)$. Quanto mais a média dos erros reduzidos (m_E) aproximar-se de 0 (**zero**) e a variância de tais erros (σ^2_r) aproximar-se de 1 (**um**), melhor será a qualidade das estimativas obtidas (Souza, 1992).

Assim, a técnica de auto-validação pode ser utilizada para avaliar a qualidade do método de estimativa, bem como para definir o melhor número de vizinhos mais próximos a um determinado ponto para a estimativa do valor nesse ponto. Também pode ser utilizada para avaliar se o modelo do semivariograma experimental utilizado no processo de estimativa é o que melhor se ajusta aos dados, buscando-se sempre atingir $m_R = 0$ e $\sigma^2_R = 1$.

2.6.5 Escalonamento de semivariograma

Em estudos de variabilidade do solo normalmente defronta-se com um grande número de semivariogramas experimentais para serem interpretados, na maioria das vezes envolvendo diferentes propriedades do solo, quase sempre avaliadas em diferentes profundidades, unidades de medida e com diferentes magnitudes de variação. Em função disso, torna-se difícil, e ao mesmo tempo necessário, agrupar os dados de maneira a permitir e facilitar conclusões gerais sobre os mesmos (Souza, 1992). Basicamente, a técnica consiste em reunir vários semivariogramas em uma função única, com base na seguinte equação (Vieira et al. 1991):

$$\gamma^{sc} = \frac{\gamma_i^*(h)}{\alpha_i} \quad (06)$$

onde i vai de 1 até o número de variáveis medidas, e α é o fator de escalonamento, que pode ser adotado como o valor da respectiva variância, do patamar, do maior $\gamma^*(h)$ ou um valor próximo a estes, desde que contribuam para que os semivariogramas experimentais aglutinem-se em uma única função. Assim, os valores de $\gamma^{sc}(h)$ calculados para vários semivariogramas devem se ajustar a uma única função, desde que eles sejam escalonados entre si, ou seja, os processos influenciadores dos vários semivariogramas escalonados devem ser semelhantes ou estar de alguma forma associados. Além de facilitar a interpretação de vários semivariogramas ao reuni-los em um só, a técnica de escalonamento tem sido recomendada também pelo fato de que os valores interpolados por krigeagem com base nos modelos de semivariogramas escalonados são idênticos àqueles interpolados com base nos modelos individuais, pois os ponderadores usados na interpolação não mudam em ambos os casos (Souza, 1992).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização do local

O experimento de campo foi conduzido no Centro Técnico de Irrigação da Universidade Estadual de Maringá, no município de Maringá, região noroeste do Estado do Paraná - Brasil, com localização entre 23° 25' de latitude sul e 51° 57' de longitude a oeste de Greenwich, com altitude média de 540 metros acima do nível do mar.

O clima predominante, segundo a classificação de Koeppen, é do tipo Cfa, mesotérmico úmido com chuvas abundantes no verão e inverno seco, com precipitação média anual de 1500 mm, sendo que nos meses de dezembro e janeiro concentram-se os maiores índices de precipitação e nos meses de julho e agosto os menores. A temperatura média anual é de 16,7° C, sendo que a média das mínimas alcança 10,3° C e a média das máximas atinge 33,6° C. O valor médio da umidade relativa do ar é igual a 66%.

Rochas eruptivas básicas (meláfiro) do derrame basáltico, do grupo São Bento, da formação Serra Geral, do período Jurássico-Cretáceo, constituem a geologia local.

O solo da área experimental foi classificado como terra roxa estruturada eutrófica com A moderado, textura argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo suave ondulado (Embrapa, 1984). O relevo da área experimental é suave ondulado com declividade média de 8 %.

A área experimental encontra-se sob um pivô central e vem sendo cultivada desde 1987 com milho, soja, aveia e feijão. Até 1989 o sistema de preparo de solo era executado com uma gradagem pesada e duas gradagens niveladoras. A partir de 1989

vem sendo mantida uma alternância de sistemas de preparo: escarificação antes da cultura de verão e gradagem pesada antes da cultura de inverno.

3.2 Disposição do experimento no campo

A escolha e o estaqueamento da área experimental foram realizados na segunda quinzena de julho de 1995. Foram dispostas, contiguamente, duas parcelas medindo 40 m por 12 m, as quais constituíram dois retângulos com 4 linhas dispostas paralelamente ao sistema de terraceamento existente e 11 colunas dispostas no sentido da declividade do terreno, perfazendo 44 pontos por parcela para as amostragens e determinações, utilizando ainda um espaçamento sistemático de 4 m entre pontos.

3.3 Fases de determinações e amostragens de campo antes do preparo de solo

As determinações e amostragens foram realizadas em duas épocas distintas, consideradas como fases do experimento. Uma, antecedendo as operações de preparo de solo e a outra, imediatamente após a colheita da cultura. Na discussão dos resultados estas épocas de amostragem e determinações receberão as conotações antes do preparo e após a colheita.

Na primeira quinzena de agosto de 1995 iniciou-se a primeira fase de determinações e amostragens do experimento (antes do preparo) que consistiram na determinação da resistência à penetração nas profundidades de 0 a 0,10 m (camada superficial); 0,10 a 0,20 m (camada intermediária) e 0,20 a 0,30 m (camada profunda). Também nessas profundidades foram coletadas amostras de solo para determinação dos parâmetros de fertilidade do solo e granulometria.

Na profundidade de 0,20 m coletaram-se amostras de solo em anéis de 90 cm³ de volume para determinação das curvas de retenção de água, macroporosidade, capacidade de campo, densidade do solo e densidade de partículas.

3.4 Tratamentos

Logo após a primeira fase de determinações e amostragens no campo procedeu-se à operação de preparo de solo nas duas parcelas experimentais. Uma recebeu, como preparo primário, uma aração com arado fixo de 3 discos de 26” e, como preparo secundário, duas gradagens niveladoras e destorroadoras com grade de 18 discos de 20”.

A outra parcela recebeu, como preparo primário, uma escarificação com escarificador de sete hastes distanciadas 0,25 m entre si. O preparo secundário também consistiu de duas gradagens niveladoras e destorroadoras com grade de 18 discos de 20”. Os dois implementos de preparo primário receberam regulagem adequada, almejando efetuar a mobilização do solo até 0,30 m. Imediatamente após o preparo primário, em trincheiras abertas na bordadura das parcelas experimentais, verificou-se que o escarificador mobilizou o solo até 0,30 m e o arado não mais que 0,25 m.

3.5 Implantação, condução e colheita da cultura

Em 24 de agosto de 1995 foi implantada a cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade Aporé, nas duas parcelas experimentais. Uma semeadora convencional foi regulada para depositar 14 sementes por metro linear com espaçamento entrelinhas de 0,40 m, para uma população de 300.000 plantas por hectare.

A adubação de plantio utilizou 0,250 Mg/ha da formulação 4-14-8 e a de cobertura consistiu na aplicação de 0,060 Mg/ha de uréia (45%) divididas em cinco aplicações, juntamente com a água de irrigação.

Os tratamentos fitossanitários foram efetuados a partir das bordaduras das parcelas experimentais, sem aplicação de tráfego no interior das mesmas. Foram executadas duas capinas manuais nas parcelas experimentais.

Exceto nos períodos em que houve precipitação pluviométrica, manteve-se um intervalo de 72 horas entre as irrigações, aplicando uma lâmina média de 15 mm de água.

A cultura sofreu o impacto das baixas temperaturas verificadas no mês de setembro que comprometeu parte da florada do feijoeiro. Porém, o perjúrio se verificou igualmente nas duas parcelas experimentais.

Nos dias 29 e 30 de novembro de 1995, após o reestabelecimento dos 44 pontos de cada parcela experimental, efetuou-se a colheita da cultura cortando-a manualmente, rente ao solo, em subparcelas de 4 m^2 . Com uma armação guia, fez-se coincidir o centro das mesmas com os pontos pré estabelecidos antes da implantação da cultura. Foram tomados os devidos cuidados para manter 110 (cento e dez) plantas dentro da armação de amostragem. Foram determinadas produtividade de massa total e produtividade de grãos (Mg/ha), após correção da umidade para 12%.

3.6 Determinações e amostragens de campo após a colheita da cultura

Imediatamente após a colheita foi realizada a segunda fase de determinações e amostragens de campo, quando foram executados os mesmos procedimentos realizados antes do preparo de solo.

3.7 Resistência à penetração

Após a calibração do anel dinamométrico em célula de carga, realizada pelo fabricante, a Solotest, determinou-se a resistência à penetração nas parcelas que receberam aração e escarificação. O procedimento foi efetuado nos 44 pontos antes do preparo de solo e após a colheita, na camada de 0 a 0,30 m, porém os valores de deformação do anel foram registrados de 0,05 em 0,05 m.

Foi utilizado um penetrômetro com área da base do cone de $6,33 \text{ cm}^2$ e ângulo de penetração do cone de 30° . Antes das determinações a área foi irrigada com a aplicação de 15 mm de lâmina de água. Levando em consideração a umidade antecedente, as parcelas ficaram com conteúdo de água próximos à capacidade de campo desse solo, situação na qual Mata (1988), recomendou fazer os testes de penetrometria. Mesmo assim, os testes de penetração foram realizados concomitantemente à umidade

gravimétrica do solo, que não apresentou diferença significativa, nem ao nível de 5%, nas respectivas camadas, entre tratamentos.

Os resultados de penetrometria serão as médias obtidas para as camadas superficial (0-0,10 m), intermediária (0,10-0,20 m) e profunda (0,20-0,30 m). Os resultados serão expressos na forma dos índices de cone medidos, conforme a equação de calibração do anel dinamométrico : $IC = 0,999757 * 32,3143 * Ld / 6,33 \text{ cm}^2$, onde Ld é a deformação do anel em mm.

3.8 Determinações em laboratório

3.8.1 Curvas de retenção de água

Os pontos submetidos às tensões de 0,003 e 0,006 MPa foram determinados em mesa de tensão, e os resultados representam a média de três repetições. Os pontos submetidos às tensões de 0,01; 0,03; 0,05; 0,07; 0,1; 0,3; 0,8 e 1,5 MPa foram determinados em câmara de Richards utilizando 176 amostras indeformadas, coletadas em anéis de 90 cm³ de volume para todas as tensões (Embrapa, 1979). Esta etapa do trabalho foi realizada no laboratório de Solos da Universidade Estadual de Maringá e no de Física de Solo do Departamento de Solos do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. Foram usados tempos pré-determinados de 192 horas para cada uma das tensões. Os resultados foram expressos em umidade na base de volume (m³/m³), nas diferentes tensões.

3.8.2 Macroporosidade

A macroporosidade foi considerada como sendo a diferença do conteúdo de água na saturação e a retida a 0,006 MPa (Embrapa, 1979).

3.8.3 Capacidade de campo

A capacidade de campo foi considerada como sendo o conteúdo de água retido a 0,006 MPa (Souza & Reichardt, 1996).

3.8.4 Outras determinações

Densidade do solo (método do anel volumétrico), densidade de partículas (método do balão volumétrico), granulometria (método da pipeta) e análise de fertilidade, conforme Embrapa (1979).

3.9 Análises estatísticas

Os atributos de solo e planta foram analisados com as ferramentas da estatística clássica e da geoestatística.

3.9.1 Estatística

Os dados dos atributos de solo e planta foram analisados pelos momentos estatísticos : média, mediana, variância, desvio padrão, assimetria, curtose e coeficiente de variação.

A definição sobre a normalidade das distribuições foi baseada no “d” crítico tabelado igual a 0,200, com $\alpha = 5\%$ e $n = 44$ (Campos, 1983). A comparação dos valores medidos com valores tabelados permite classificar as distribuições, sendo que o valor do “d” crítico é mais restritivo à medida que diminui o número de amostragens e determinações.

Para identificar possíveis dados com valores discrepantes utilizou-se a metodologia proposta por Cahn et al. (1994) onde valores fora do intervalo média mais ou menos 4 (quatro) desvios padrão seriam descartados. Entretanto, nenhum valor determinado ou medido foi considerado “discrepante”, após a utilização de tal procedimento. Assim, nenhum valor foi descartado.

As correlações entre os atributos do solo e da planta em cada sistema de preparo foram analisadas através de regressão linear múltipla. As variáveis dependentes foram a produtividade de massa total e de grãos e as variáveis independentes os diversos atributos do solo.

3.9.2 Geoestatística

Semivariogramas e krigeagem foram utilizados para testar a dependência espacial dos atributos do solo e da cultura do feijão bem como para interpolar dados, possibilitando construir superfícies de valores e comparar o efeito dos tratamentos sobre os atributos do solo e planta.

A dependência espacial dos atributos de solo e planta foi avaliada pelo ajuste de modelos matemáticos (linear, esférico, exponencial e gaussiano) a semivariogramas escalonados pela sua variância. Neste trabalho todos os semivariogramas foram ajustados pelo modelo esférico, conforme a equação (07):

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] && \text{para } 0 < h < a \\ \gamma(h) &= C_0 + C_1 && \text{para } h > a \end{aligned} \quad (07)$$

O modelo esférico é obtido selecionando-se os valores do efeito pepita, C_0 , e do patamar, $C_0 + C_1$, depois passando-se uma reta que intercepte o eixo y em C_0 e seja tangente aos primeiros pontos próximos de $h = 0$. Essa reta cruzará o patamar à distância $a' = \frac{2}{3} a$. Assim, o alcance será $a = 3 a'/2$. O modelo esférico é linear até aproximadamente $1/3$ do alcance.

Com o objetivo de facilitar a interpretação dos semivariogramas, estes foram escalonados pela suas variâncias. Isto tornou mais evidente as diferenças impostas aos atributos do solo e planta, pelos tratamentos. Com relação aos modelos matemáticos, em primeira instância, o ajuste foi visual. Quando pairavam dúvidas entre quais modelos melhor ajustavam o semivariograma ou então se os semivariogramas poderiam

ser ajustados por um único modelo matemático, lançou-se mão da técnica de validação cruzada ou seja, a auto-validação. Padronizou-se como critério decisório o modelo que apresentou variância reduzida mais próxima de zero.

Após conclusão da existência de dependência espacial dos atributos do solo e planta e a definição dos parâmetros do modelo ajustado ao semivariograma (C_0 = efeito pepita; C_1 = sill; a = alcance e C_2 = patamar), procedeu-se à interpolação dos valores das propriedades para distâncias não amostradas (1m x 0,5m) pela técnica da krigeagem (Vieira et al., 1983), o que possibilitou a construção de superfícies de valores dos atributos do solo e planta.

Para correlacionar espacialmente a produtividade da cultura com o índice de cone foi construído o semivariograma cruzado destas propriedades conforme descrito por Vauclin et al. (1983).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Macroporosidade

Os momentos estatísticos para os dados obtidos nas parcelas submetidas à aração e à escarificação, antes do preparo e após a colheita, estão apresentados na Tabela 1. A comparação visual do efeito entre tratamentos também pode ser observada na Figura 1.

Tabela 1. Momentos estatísticos para os valores de macroporosidade (m^3/m^3) no tratamentos que receberam aração e escarificação, amostrados antes do preparo e após a colheita.

Momentos estatísticos	Aração		Escarificação	
	Antes do preparo	Após a colheita	Antes do preparo	Após a colheita
N	44	44	44	44
Média	0,050A	0,042B	0,037a	0,068b
Mediana	0,050	0,035	0,036	0,059
Variância	0,001A	0,001A	0,001a	0,002b
Assimetria	0,006	0,015	0,013	0,010
Curtose	0,003	0,025	0,033	0,004
cv, %	38,9	42,9	39,4	57,6
d	0,089	0,169	0,097	0,14

d crítico a 5% = 0,200 (Campos, 1983).

* médias seguidas por letras maiúsculas diferentes (na aração) diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste t;

* médias seguidas por letras minúsculas diferentes (na escarificação) diferem entre si ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t;

* variâncias seguidas pela mesma letra maiúscula (na aração) e minúsculas (na escarificação) não diferem entre si ao nível de 1% de probabilidade pelo teste F;

Para se testar a normalidade das distribuições, foi usado o teste não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov que, para o nível de significância de 5%, permitiu considerar todas as distribuições como normais. No entanto, para os dados após a colheita, constataram-se valores elevados de “d” os quais, apesar de não serem significativos, atestam o desvio da normalidade destas distribuições, o que pode ser comprovado pelo

afastamento relativo entre médias e medianas destas distribuições, bem como pelos elevados coeficientes de assimetria e de curtose.

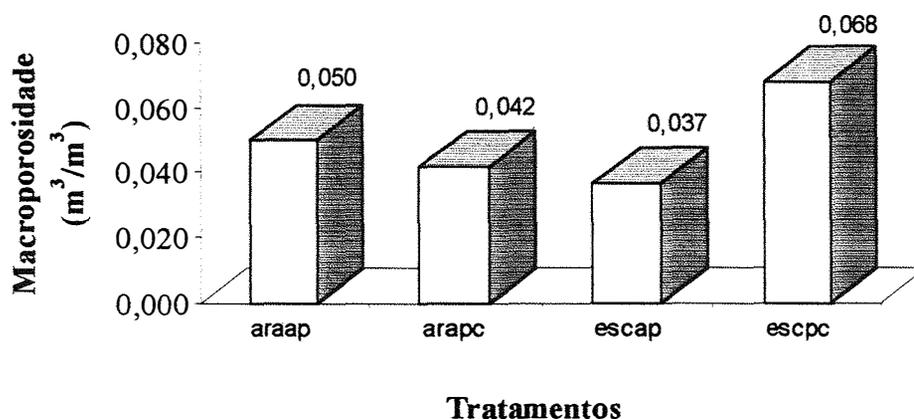


Figura 1- Valores médios de macroporosidade nos tratamentos com aração (ara) e escarificação (esc), amostrados antes do preparo (ap) e após a colheita (pc).

Para os tratamentos que receberam aração e escarificação e foram amostrados antes do preparo, a distribuição dos valores de macroporosidade ajustou-se bem à normalidade, segundo o teste de Kolmogorov-Smirnov, como pode ser constatado na Tabela 1. Os valores que expressam a posição central de cada uma destas distribuições, ou seja média e mediana, estão muito próximos entre si. A dispersão dos dados em torno da média foi semelhante para ambas e consideravelmente alta, o que é expresso por coeficientes de variação muito próximos entre si, da ordem de 39%. Para a parcela sob aração, as médias dos valores de antes do preparo e de após a colheita diferem entre si ao nível de 5%, mas não ao nível de 1%. As variâncias não diferem entre si ao nível de 1%, apesar de haver uma redução do valor médio. A mediana, entretanto, mostrou um decréscimo pronunciado.

Na Figura 2 estão mostrados os valores de macroporosidade para os 44 pontos das parcelas submetidas à aração e à escarificação, obtidos antes do preparo. Representam os valores da macroporosidade nas parcelas experimentais respeitando o número de ordem de cada amostra no espaço sem, entretanto, georreferenciá-los.

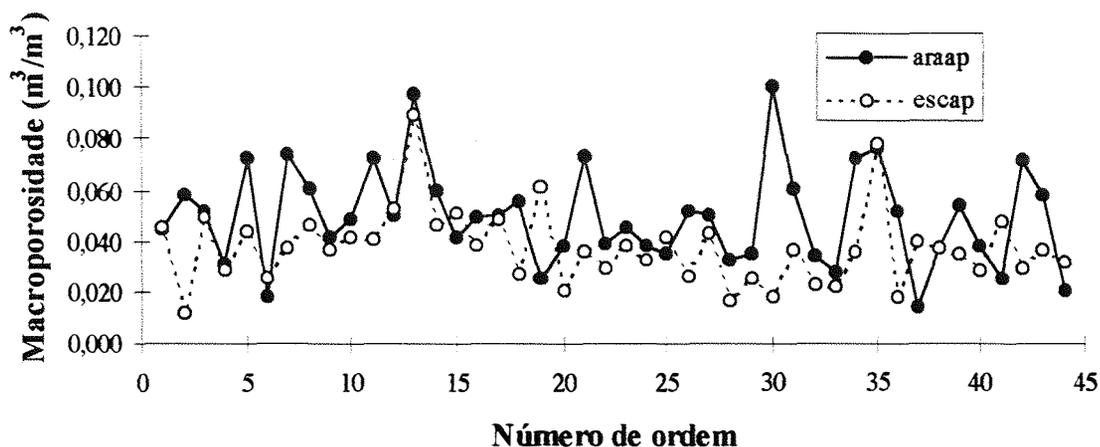


Figura 2 - Valores de macroporosidade (m^3/m^3) amostrada antes do preparo de solo nas parcelas sob aração (araap) e sob escarificação (escap).

Quando o solo foi submetido à aração, embora os discos não tenham atingido a profundidade de 0,30 m, o efeito de pulverização, característico de implementos com discos, fez com que os valores de macroporosidade sofressem algumas alterações entre as duas amostragens, realizadas antes do preparo e depois da colheita. A média dos valores obtidos na primeira amostragem é maior e estatisticamente diferente da média dos valores obtidos na segunda, ao nível de 5%. Esta diferença no entanto não foi significativa a nível de 1%, pelo teste t. As variâncias antes e depois da cultura foram estatisticamente iguais ao nível de 1% e o coeficiente de variação pouco se alterou. Os valores de média e mediana se distanciaram, indicando o afastamento da distribuição dos dados em relação à distribuição normal, o que é confirmado pelo crescimento da estatística “d” do teste de Kolmogorov-Smirnov e pelos coeficientes de assimetria e curtose, que cresceram consideravelmente. Este resultado mostra que a utilização de um único parâmetro da estatística descritiva não é suficiente para caracterizar a dispersão dos dados (Libardi et al., 1996).

A distribuição dos logaritmos naturais destes valores apresentou $d = 0,128$, o que permite caracterizar esta distribuição como normal a 5%, embora a assimetria ainda seja alta. A comparação visual entre os valores antes e depois da cultura na parcela referente à aração pode ser feita por meio da Figura 3.

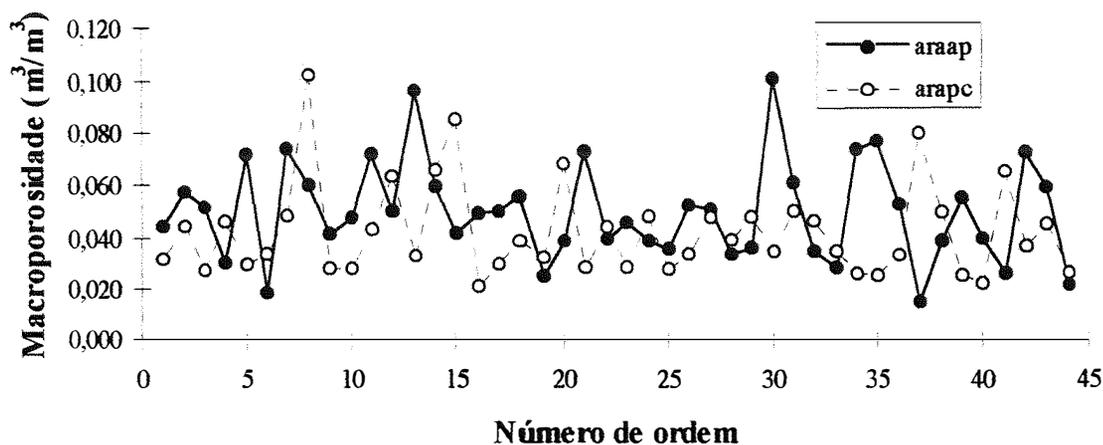


Figura 3 - Macroporosidade (m^3/m^3) na parcela submetida à aração, amostrada antes do preparo (araap) e após a colheita (arapc).

Na parcela submetida à escarificação, mudanças substanciais ocorreram. As médias diferem entre si ao nível de 1% de significância, pelo teste t, revelando a ação benéfica do uso deste sistema de preparo no aumento da macroporosidade do solo. Isto deve ter sido consequência do preparo conservacionista caracteristicamente desenvolvido por implementos com hastes. Por outro lado, pode-se observar que a variabilidade desta propriedade cresceu consideravelmente entre as duas condições analisadas, o que é expresso por uma diferença entre variâncias, significativa ao nível de 1% pelo teste F, e pode ser constatado visualmente na Figura 4. Antes do preparo, média e mediana foram semelhantes e a distribuição foi normal pelo teste de Kolmogorov-Smirnov a 5%. Após a cultura, a distribuição afastou-se da normalidade, assumindo uma distribuição log-normal, uma vez que o teste de Kolmogorov-Smirnov para a distribuição dos logaritmos dos dados gerou $d = 0,067$, o que permite caracterizá-la como normal ao nível de 5%, com ajuste bem melhor que o verificado para os dados originais. Este procedimento atende a recomendação de Gomes (1984) que sugere transformar os valores com tendência à não normalidade, em seus logaritmos, antes de efetuar a análise de variância. Resultado mostrando que a escarificação confere maior

variabilidade ao solo também foi encontrado por Souza (1992), no entanto, para propriedades químicas.

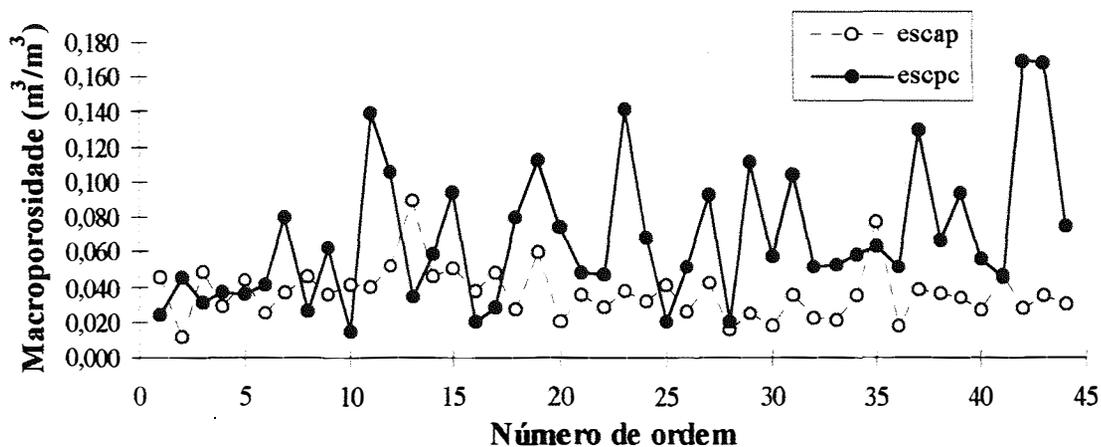


Figura 4 - Macroporosidade (m^3/m^3) na parcela submetida à escarificação, amostrada antes do preparo (escap) e após a colheita (escpc).

Enquanto a aração promoveu alterações pouco expressivas nos valores de macroporosidade, exceto pelo afastamento da normalidade, a mudança promovida pela escarificação foi grande. Isto não informa, entretanto, sobre a ação do sistema de preparo na correlação espacial desta propriedade no campo. A avaliação da dependência espacial desta propriedade, bem como da ação do sistema de preparo sobre ela, foi analisada pelos semivariogramas experimentais construídos com os dados para todas as condições estudadas. Na Figura 5 são mostrados os semivariogramas escalonados pelas variâncias amostrais, para as duas parcelas, antes do preparo. Como os dois mostraram comportamento muito semelhante dos pontos dentro de um alcance que pode ser admitido como único, igual a 10 m, optou-se por ajustar um único modelo a ambos. Este modelo está mostrado na Figura 5, e seus parâmetros, bem como a variância amostral e o percentual do patamar referente ao efeito pepita, estão mostrados na Tabela 2. Este resultado mostra sem dúvida que, espacialmente, as duas parcelas tinham variabilidades semelhantes, para esta propriedade, antes do preparo de solo, apesar de apresentarem médias diferentes.

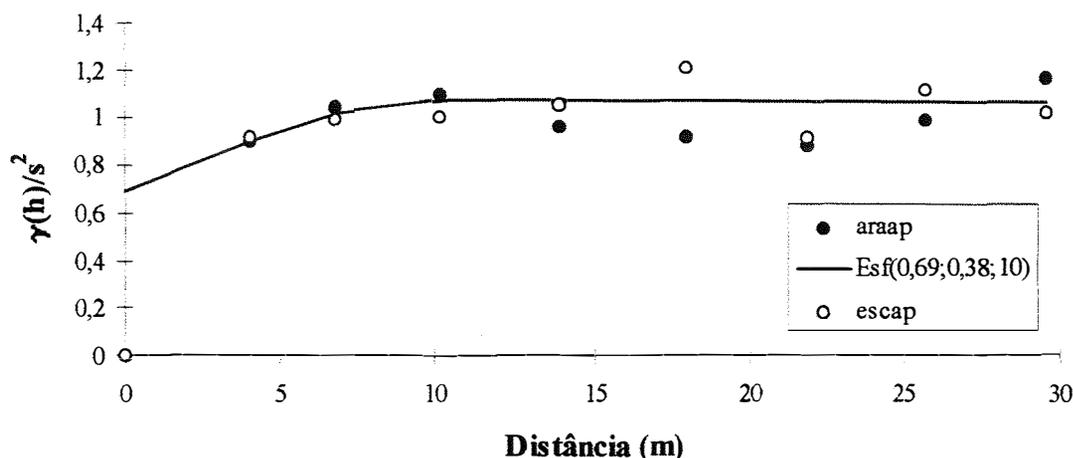


Figura 5 - Semivariogramas para macroporosidade amostrada antes do preparo de solo nas parcelas sob aração (araap) e sob escarificação (escap).

Na Figura 6 estão mostrados os semivariogramas para antes do preparo e para depois da colheita obtidos para a parcela sob aração (Figura 6a), bem como para a parcela sob escarificação (Figura 6b), com o propósito de comparar as duas condições, em cada parcela.

Na parcela submetida à aração, o semivariograma escalonado sofreu alteração apenas na sua posição, ou seja, o alcance permaneceu o mesmo enquanto o efeito pepita e o patamar reduziram-se proporcionalmente. Os agentes que promoveram a alteração da forma da distribuição de frequência da macroporosidade nesta parcela, durante o ciclo da cultura, não afetaram de forma expressiva a estrutura espacial desta propriedade. Esta estrutura antes do preparo foi caracterizada por um efeito pepita correspondente a 64% do patamar, ou seja, apenas 36% da variabilidade foi explicada pela correlação espacial. Após a colheita, o efeito pepita correspondeu a 55% do patamar.

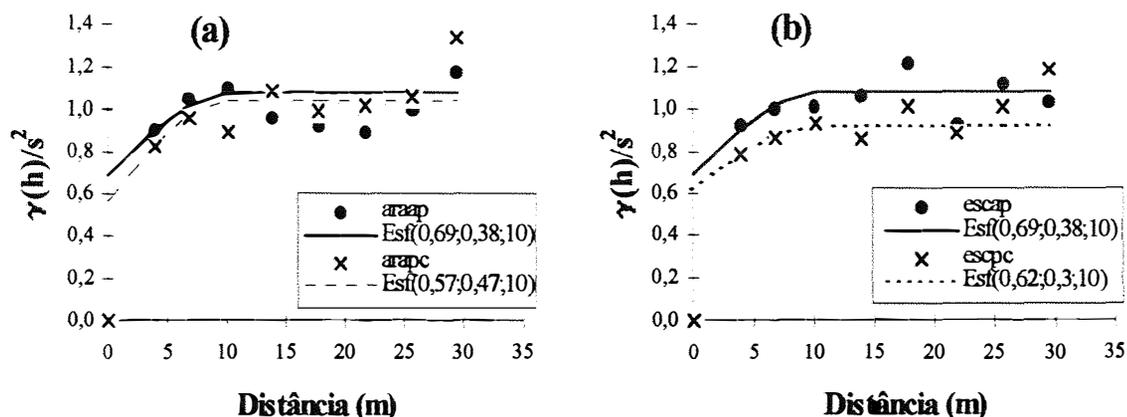


Figura 6 - Semivariogramas para a macroporosidade na aração (a) e na escarificação (b), amostrada antes do preparo e após a colheita.

Na parcela referente à escarificação, o crescimento da variância amostral foi acompanhado por um crescimento dos valores do semivariograma. O semivariograma escalonado pela variância amostral, no entanto, exibiu um comportamento semelhante àquele descrito para a aração, ou seja, partindo-se da condição inicial, o semivariograma sofreu um deslocamento para baixo, variando o efeito pepita e o patamar, mantendo constante o alcance, igual a 10 m. Verifica-se que, nesta parcela, o efeito pepita cresceu mais acentuadamente em relação ao patamar que na aração. A escarificação, agindo efetivamente na profundidade amostrada, com espaçamento entre hastes de 0,25 m, contribuiu para aumentar a variação na curta escala, ou seja, em distâncias inferiores à de amostragem, 4 m.

Tabela 2. Parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas, relação entre efeito pepita e patamar e variâncias amostrais para macroporosidade nas parcelas sob aração (ara) e sob escarificação (esc), antes do preparo (ap) e após da colheita (pc).

Tratamentos	Modelo	C_0	C_1	C_2	(a) alcance, m	s^2	$C_0/C_2 - \%$
araap	esférico	0,69	0,38	1,07	10	3,725	64
arapc	esférico	0,57	0,47	1,04	10	3,187	55
escap	esférico	0,69	0,38	1,07	10	2,176	64
escpc	esférico	0,62	0,30	0,92	10	15,518	67

De posse dos valores originais de macroporosidade nas parcelas sob as condições estudadas, pode-se obter superfícies de valores interpolando-se os valores medidos, por meio de krigeagem, fazendo uso dos modelos de semivariogramas ajustados. Estes mapas fornecem perspectiva tridimensional da propriedade na área, complementando a descrição estatística efetuada e permitindo associar os valores às respectivas posições no espaço. Nas Figuras 7 e 8 são mostradas as superfícies de valores para antes do preparo e depois da colheita, para as parcelas referentes à aração e à escarificação respectivamente.

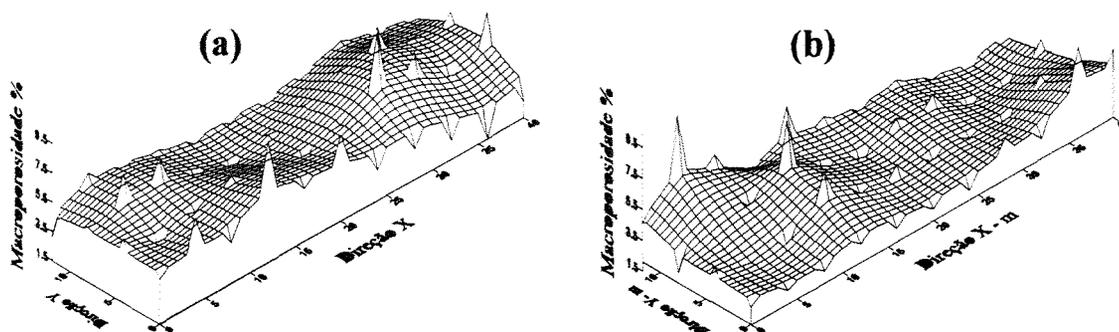


Figura 7 - Superfícies de valores de macroporosidade na parcela sob aração, amostrada antes do preparo (a) e depois da colheita (b).

A Figura 3 mostra diferenças entre as duas distribuições baseadas em médias aritméticas. A Figura 7 no entanto, ao mostrar cada valor associado à sua posição no espaço, permite constatar uma forte tendência de redução dos valores em geral, bem como a presença de valores extremos. A mediana, por ser uma medida de posição menos

sensível à presença destes valores extremos, registra melhor esta tendência de decréscimo dos valores (Tabela 1).

Na aração os discos não atingiram a profundidade amostrada. Assim, a mudança da forma da distribuição de frequência da macroporosidade não se deve unicamente à ação direta do implemento de preparo mas sim à transferência de carga do conjunto motomecanizado e outros fatores não identificados. Estes agentes fizeram com que, de modo geral, os valores fossem reduzidos, sendo esta redução quantificada pela relação entre as medianas de antes do preparo e de depois da colheita. No entanto, alguns poucos valores permaneceram altos, influenciando de forma tendenciosa a média e promovendo uma distribuição assimétrica dos dados. A descrição espacial da propriedade na parcela contribui marcadamente para a compreensão deste comportamento, ressaltando a sua importância na análise de propriedades do solo.

Analisando as Figuras 4 e 8 verifica-se que, após a escarificação, a variabilidade da macroporosidade cresceu consideravelmente, dando origem a uma amplitude maior de valores.

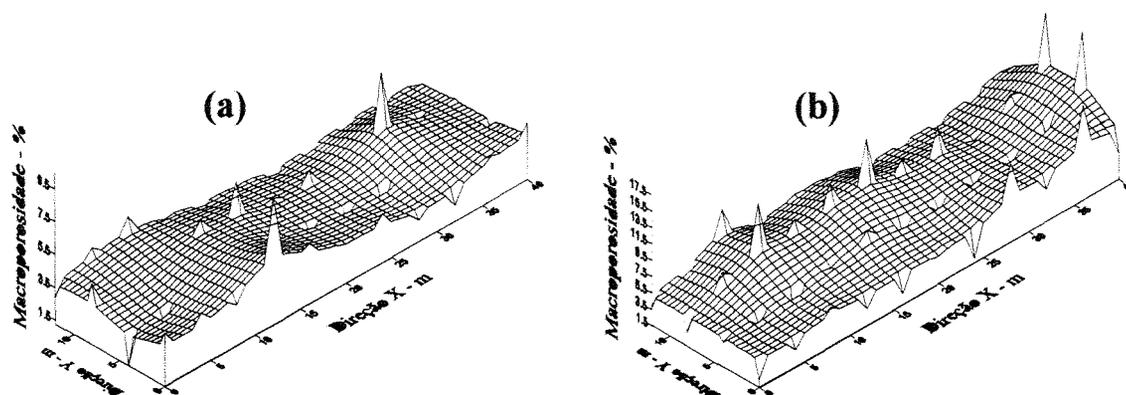


Figura 8 - Superfícies de valores de macroporosidade na parcela sob escarificação, amostrada antes do preparo (a) e depois da colheita (b).

A Figura 8 permite identificar a posição no espaço onde estes valores ocorrem. Verifica-se que os picos de máximo e mínimo não ocorrem aleatoriamente na área mas sim segundo linhas bem definidas, que coincidem com a direção de deslocamento do implemento de preparo. Apesar de a carga aplicada ao solo ter sido idêntica ao

tratamento que recebeu aração, na parcela sob escarificação, a ação do sistema de preparo modificou de forma significativa os valores da macroporosidade. As hastes, agindo efetivamente na camada amostrada, atenuam o efeito das pressões aplicadas pelo conjunto motomecanizado quando do preparo primário e também favorecem a continuidade do sistema poroso o que, segundo Culley et al. (1987), é de fundamental importância para o rápido fluxo de água no perfil do solo. Thomasson (1978), também frisa que quando a macroporosidade do solo está entre 5 e 10%, a continuidade do sistema poroso é tão ou mais importante que o seu volume.

4.2. Curvas de retenção da água

Os momentos estatísticos para as quatro condições estudadas estão apresentados nas Tabelas 3 e 4.

Os baixos coeficientes de variação obtidos mostram a baixa variação dos dados em torno da média para todas as tensões estudadas, com uma tendência de crescimento à medida que o solo seca, como relatado por Folegatti (1996). Os valores dos coeficientes de assimetria e curtose permitem considerar que as distribuições dos dados em todas as tensões apresentam forma que pode ser aproximada pela distribuição normal.

Conforme a Tabela 3, após a colheita na parcela referente à aração, os coeficientes de variação foram ligeiramente inferiores, manifestando ainda a tendência de crescimento à medida que o solo seca. A assimetria das distribuições foi negativa, exceto para a saturação. No entanto, segundo critério citado por Beiguelman (1994), apenas a distribuição para os dados de 0,006 MPa, diferem da normalidade para o nível de 5% de significância.

Pode-se observar na Figura 9 que a assimetria tende a crescer à medida em que a tensão aumenta, assim como a amplitude total dos dados, sendo a maior variação quantificada pelo coeficiente de variação crescente nessa direção.

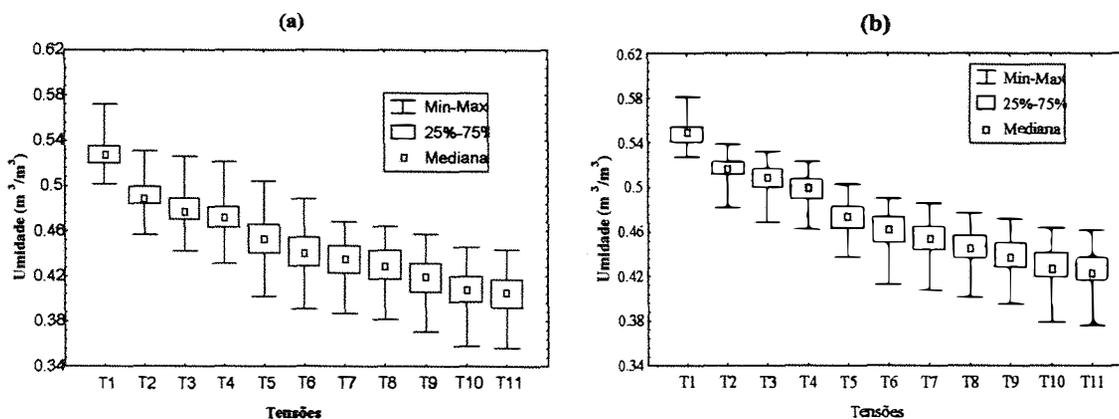


Figura 9 - Gráficos box-plot para os dados de umidade (m^3/m^3) na aração antes do preparo (a) e após a colheita (b), para as 11 tensões adotadas.

Na Tabela 4 estão apresentados os momentos estatísticos para os dados de umidade com base em volume para a parcela referente à escarificação, antes do preparo. Nessa parcela, as distribuições mostraram-se mais assimétricas que para a parcela sob aração antes do preparo, mas suas formas ainda podem ser aproximadas pela distribuição normal. A variação em torno da média foi baixa em todas as tensões, o que é expresso por baixos coeficientes de variação. A tendência de crescimento do coeficiente de variação à medida que o solo seca foi menos definida nesta parcela.

Tabela 4. Momentos estatísticos para os valores de umidade (m^3/m^3) na parcela sob escarificação antes do preparo e após a colheita, nas tensões adotadas.

Momentos	Tensões, MPa												
	0,003	0,006	0,01	0,03	0,05	0,07	0,1	0,3	0,8	1,5			
Estatísticos	Saturação	0,003	0,006	0,01	0,03	0,05	0,07	0,1	0,3	0,8	1,5		
Número	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	
Média	0,521	0,490	0,484	0,478	0,466	0,456	0,446	0,440	0,431	0,419	0,415	0,415	
Mediana	0,522	0,491	0,486	0,481	0,468	0,458	0,448	0,442	0,433	0,419	0,414	0,414	
Variância	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0003	0,0002	0,0002	
Assimetria	0,251	-0,096	-0,733	-0,880	-0,759	-0,671	-0,835	-0,885	-0,736	-0,325	-0,319	-0,319	
Curtose	-0,261	0,515	1,115	1,624	0,349	0,352	0,720	0,732	0,500	-0,337	-0,453	-0,453	
cv, %	3,332	2,550	2,630	3,060	2,999	3,157	2,904	2,849	3,570	3,850	3,738	3,738	
					escarificação, antes do preparo								
Número	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	
Média	0,567	0,516	0,499	0,486	0,461	0,450	0,442	0,435	0,428	0,418	0,413	0,413	
Mediana	0,564	0,519	0,503	0,489	0,465	0,454	0,446	0,440	0,434	0,424	0,417	0,417	
Variância	0,0006	0,0003	0,0005	0,0005	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	
Assimetria	0,412	-0,778	-0,974	-0,801	-0,687	-0,604	-0,728	-0,770	-0,789	-0,711	-0,589	-0,589	
Curtose	-0,882	0,907	0,750	0,877	0,310	0,075	0,325	0,368	0,310	-0,003	-0,207	-0,207	
cv, %	4,154	3,220	4,255	4,792	5,666	5,881	5,968	6,152	6,102	6,388	6,558	6,558	
					escarificação, após a colheita								

Na Tabela 4 pode ser observado que as distribuições dos dados em cada tensão na parcela sob escarificação, após a colheita, apresentam maiores valores de coeficiente de variação do que antes do preparo, com uma tendência de crescimento à medida que o solo seca. Com base nos coeficientes de assimetria e curtose, pode-se admitir que a forma das distribuições se aproxima da normalidade, embora seja constatada a assimetria negativa das mesmas. Isto também pode ser observado na Figura 10b.

A comparação das distribuições entre as parcelas sob aração e sob escarificação, após a colheita, revela a maior assimetria das distribuições nesta segunda. Antes do preparo, no entanto, esta tendência se verificava, como pode ser constatado comparando-se as Figuras 9a e 10a, bem como as Tabelas 3 e 5.

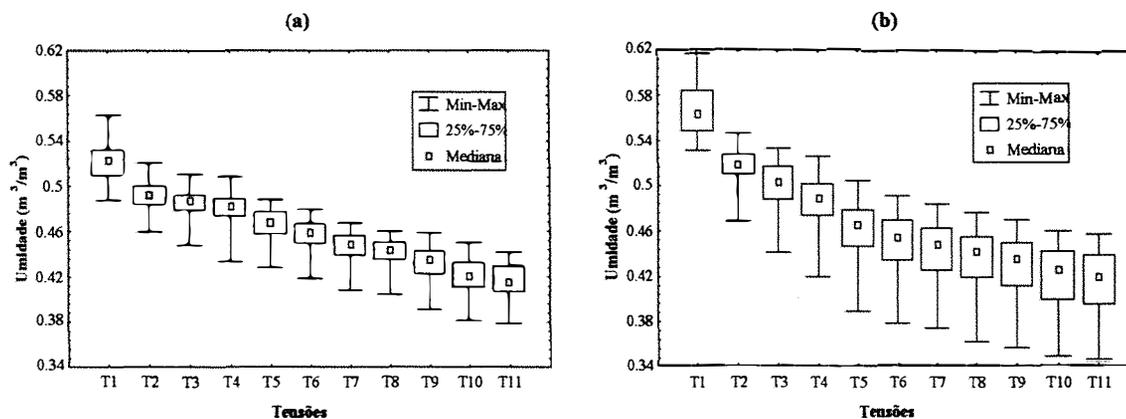


Figura 10 - Gráficos box-plot para os dados de umidade (m^3/m^3) na escarificação antes do preparo (a) e após a colheita (b), para as 11 tensões adotadas.

A ação das hastas, na escarificação, ao contrário dos discos na aração, deve contribuir para uma variação maior dos dados de retenção de umidade, sobretudo nas baixas tensões. A comparação dos coeficientes de variação entre as Tabelas 5 e 6 revela o crescimento desta entre as duas situações.

Apesar da assimetria negativa verificada nas diversas distribuições, sobretudo para a situação após a colheita e, mais ainda, na parcela sob escarificação, as medidas de posição, média e mediana, pouco diferiram entre si. Dessa forma, para fins de comparação entre antes do preparo e depois da colheita em cada parcela, foi usada a

curva constituída pelos valores médios de umidade em cada tensão. Para a aração, estas curvas são mostradas na Figura 11.

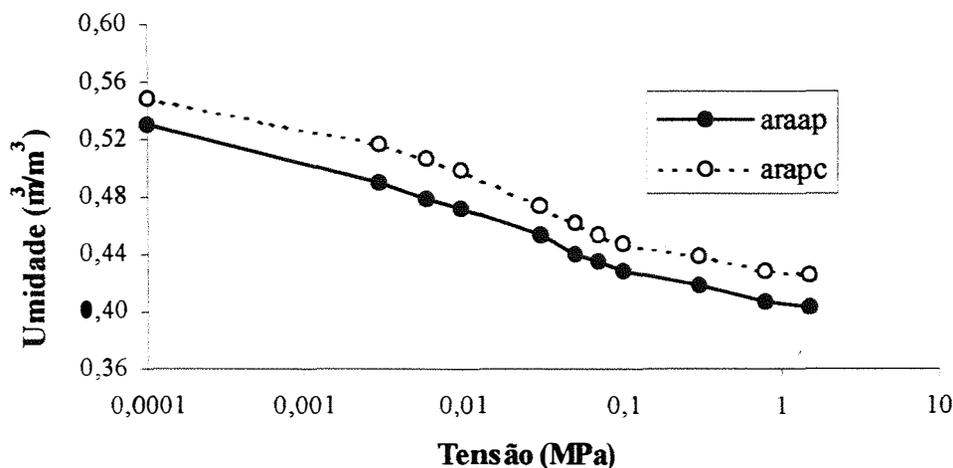


Figura 11 - Valores médios de umidade com base em volume nas tensões adotadas, para os dados obtidos na parcela que recebeu aração, amostrada antes do preparo (araap) e após a colheita (arapc).

Verifica-se na Figura 12 que a escarificação promoveu um aumento significativo da umidade média retida nas amostras para as tensões entre a saturação e 0,01 MPa. A partir deste ponto, as curvas médias se superpõem, mostrando que o sistema de preparo não modificou as características do solo no que diz respeito à retenção de água nestas tensões. Conforme discutido anteriormente, esta ação da escarificação está associada a presença de um maior volume de poros de grande diâmetro (macroporosidade), que foi favorecida pela ação deste sistema de preparo de solo e, levando em consideração as épocas de amostragem, antes do preparo de solo e após colheita, infere-se que a condição estrutural do solo se manteve até a retirada da cultura.

Na parcela referente à aração, como os discos não atingiram a profundidade de 0,30 m, as curvas médias de umidade nas tensões adotadas não foram alteradas pelo sistema de preparo (Figura 11). De fato, a forma das duas curvas permaneceu muito semelhante entre os dois momentos de amostragem do solo. A curva média para os dados obtidos após a colheita permaneceu sempre acima da curva média para os dados

de antes do preparo, revelando uma tendência imposta aos dados por fatores não identificados mas que não estão associados à ação do equipamento de preparo.

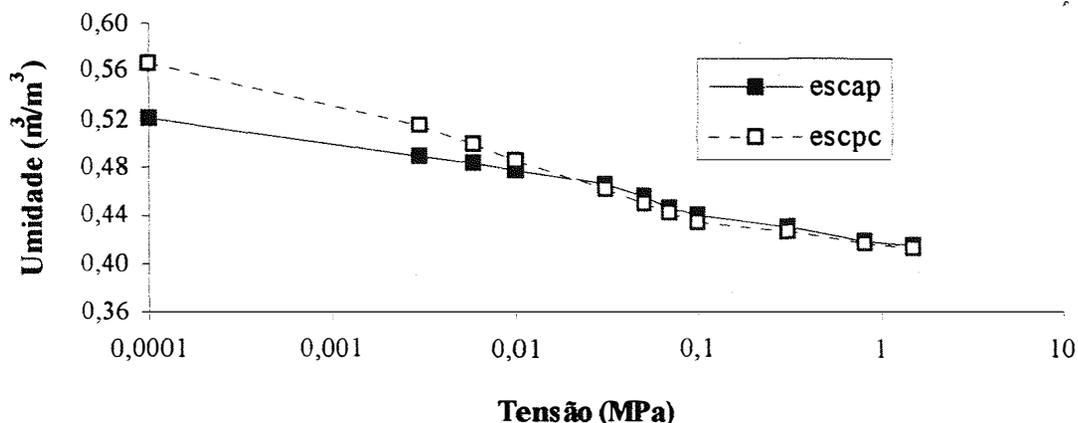


Figura 12 - Valores médios de umidade com base em volume nas tensões adotadas, para os dados obtidos na parcela que recebeu escarificação, amostrada antes do preparo (escap) e após a colheita (escpc).

Uma vez que a densidade do solo (Anexo a) apresentou comportamento diferenciado nas duas parcelas, entre as amostragens, optou-se por comparar as curvas médias de umidade com base em massa, conforme as Figuras 13 e 14. Cada ponto da curva nestas figuras corresponde à média aritmética dos 44 valores obtidos experimentalmente para a tensão correspondente, nas condições estudadas. Estas curvas permitem observar que houve aumento dos valores médios de umidade entre as situações antes do preparo e após a colheita, em todas as tensões, para os dois tratamentos. Não há diferença entre tratamentos neste aspecto. Mais importante ainda é o fato que no tratamento escarificação houve um expressivo aumento da retenção de água nas tensões até 0,03 MPa.

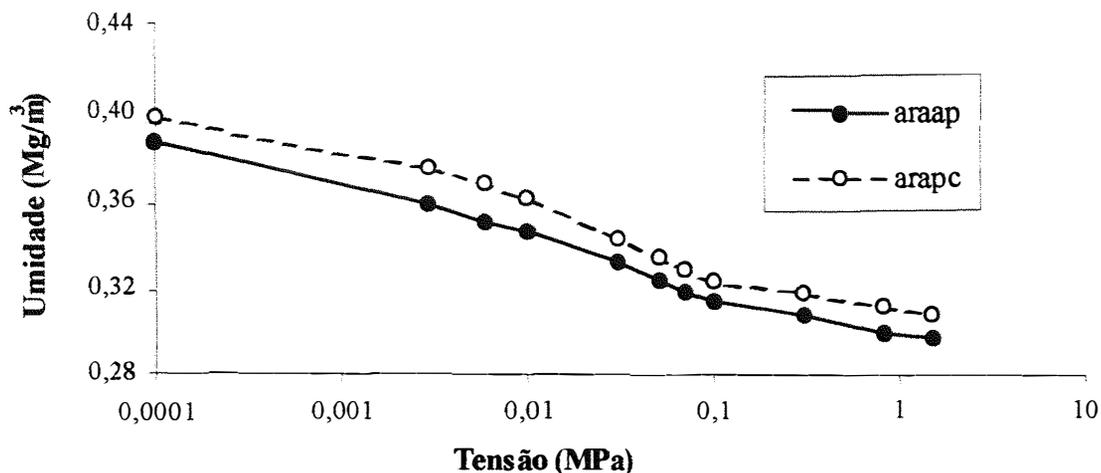


Figura 13 - Valores médios de umidade com base em massa nas tensões adotadas, para os dados obtidos na parcela que recebeu aração, amostrada antes do preparo (araap) e após a colheita (arapc).

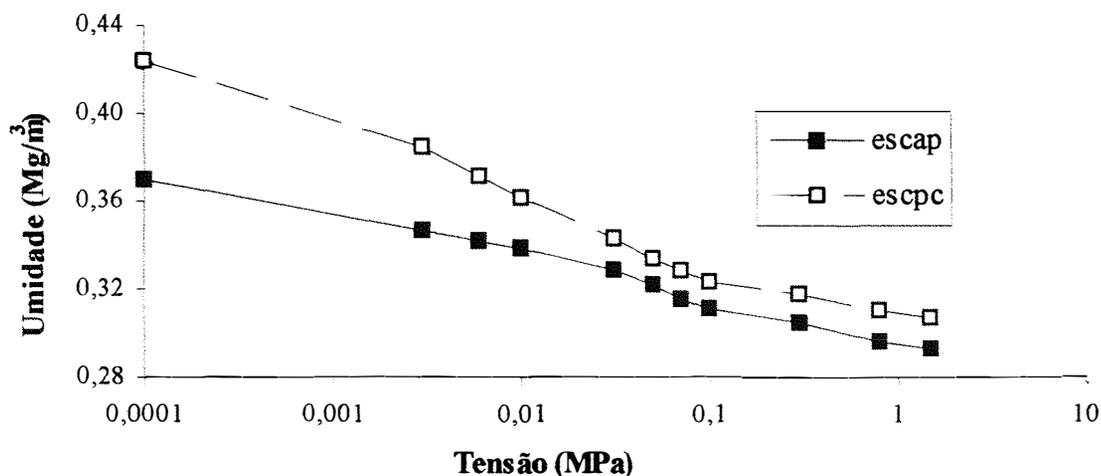


Figura 14 - Valores médios de umidade com base em massa nas tensões adotadas, para os dados obtidos na parcela que recebeu escarificação, amostrada antes do preparo (escap) e após a colheita (escpc).

Nas tensões superiores, as curvas dos dois tratamentos permaneceram paralelas. Na aração, as curvas permaneceram paralelas em toda a sua extensão. Esta diferença entre o comportamento das curvas nos dois sistemas expressa a ação benéfica da escarificação em um solo onde a macroporosidade assume valores muito baixos, da

ordem de $0,050 \text{ (m}^3/\text{m}^3)$ onde, segundo Thomasson (1978), a continuidade do sistema poroso é tão ou mais importante que o seu volume. Nesse sentido, o preparo vertical do solo sobrepujou a aração que age no sentido inverso, ou seja, de forma a interromper a continuidade do sistema poroso.

O efeito benéfico da escarificação deve ter se mantido por todo o ciclo da cultura pois ela respondeu a este fato. Na discussão do rendimento da cultura os resultados mostrarão um incremento de 27% e 25% a mais de massa total e grãos, respectivamente, na parcela que recebeu escarificação.

4.3 Conteúdo de água na capacidade de campo

Na Tabela 5 são mostrados os momentos estatísticos para a umidade retida a 0,006 MPa antes e depois do preparo, para os sistemas aração e escarificação. A proximidade entre os valores de média e mediana, apontam para a normalidade destas distribuições, o que é confirmado pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, o qual permite caracterizar todas elas como normal, a 5% de significância, apesar dos parâmetros que descrevem a forma da distribuição terem gerado valores relativamente elevados. Estes valores expressam a existência de alguns valores relativamente afastados da posição central da dispersão, alongando suas caudas, embora não possam ser considerados valores discrepantes, pelo critério apresentado por Cahn et al. (1994).

Tabela 5. Momentos estatísticos para a umidade (m^3/m^3) na capacidade de campo, na aração e na escarificação antes do preparo e após a colheita.

Momentos	Tratamentos			
	Aração		Escarificação	
	Antes do preparo	Após a colheita	Antes do preparo	Após a colheita
N	44	44	44	44
Média	0,478A	0,507B	0,484a	0,499b
Mediana	0,477	0,510	0,486	0,503
Variância	0,0008A	0,0006A	0,0006a	0,0009b
Assimetria	0,001	-0,008	-0,007	-0,010
Curtose	0,011	0,006	0,011	0,008
cv, %	3,4	2,8	2,6	4,3
d	0,112	0,103	0,1	0,129

* médias seguidas pela mesma letra (maiúsculas na aração e minúsculas na escarificação) não diferem entre si ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t;

* variâncias seguidas pela mesma letra (maiúsculas na aração e minúsculas na escarificação) não diferem entre si ao nível de 1% de probabilidade pelo teste F;

Verifica-se que, para a aração, as médias antes e depois da cultura foram diferentes ao nível de 1% de probabilidade, pelo teste t. A variância desta propriedade praticamente não se alterou. A avaliação local da ação de preparo revelou que os discos não atingiram a profundidade de 0,30 m, na aração. Assim, a diferença entre médias provavelmente se deve à ação do sistema radicular, o qual atingiu profundidade da ordem de 0,30 m, concentrando grande volume radicular na região amostrada (0,20 m). A ação das raízes tende a contribuir para um maior volume de poros de diâmetros na faixa de retenção de água a tensões próximas de 0,006 MPa. Este resultado pode ser comparado com o que foi identificado por Rasiah & Kohl (1989), onde a taxa de retirada de água do solo pela planta permaneceu constante, mesmo com o decréscimo do potencial da água. O incremento da densidade de raízes na região amostrada foi responsável pela constatação.

Na escarificação, as hastes atingem profundidades maiores, da ordem de 0,30 m. A sua ação no entanto, não se faz de forma contínua no campo, mas sim em regiões com uma certa dimensão perpendicular à linha correspondente à passagem da haste. Assim, entre as hastes, as quais estão espaçadas de 0,25 m, o efeito de mobilização é máximo na linha, reduzindo-se na direção da entrelinha. Desta forma, a escarificação tende a

aumentar a porosidade na vizinhança imediata à linha, enquanto a porção intermediária da entrelinha, tende a ser menos alterada, o que deve proporcionar uma variabilidade maior desta propriedade no espaço. De fato, o teste F revela diferença significativa ao nível de 1%, entre variâncias de antes e depois da escarificação.

Na parcela referente à escarificação, as médias dos valores de umidade na capacidade de campo foram diferentes ao nível de 1%, pelo teste t, revelando o aumento do volume de poros correspondentes a tensões próximas a 0,006 MPa, pela ação do preparo, além da possível ação do sistema radicular, como discutido.

Buscando avaliar a ação dos métodos de preparo do solo sobre a estrutura espacial da umidade retida a 0,006 MPa, foram construídos os semivariogramas experimentais para as quatro condições estudadas. A estes foram ajustados modelos teóricos, como pode ser visto na Figura 15.

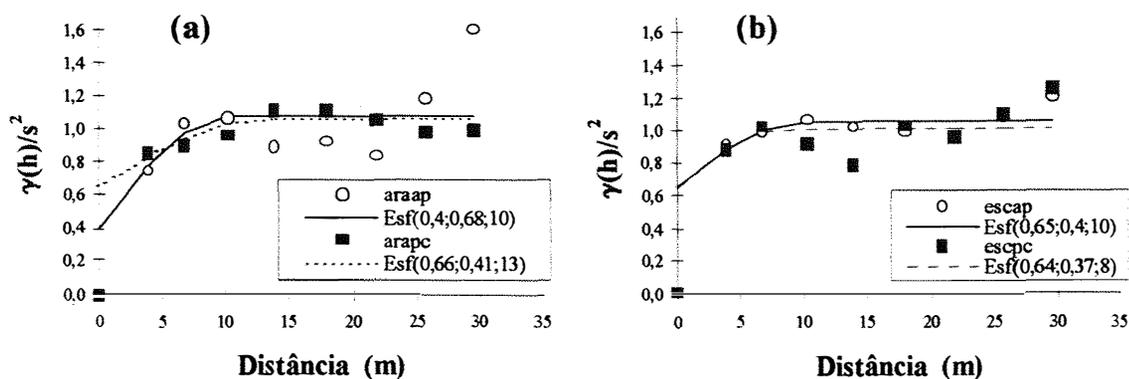


Figura 15 - Semivariogramas para umidade a 0,006 MPa, para aração (a), amostrada antes do preparo (araap) e após a colheita (arapc) e escarificação (b), amostrada antes do preparo (escap) e após a colheita (escpc).

Na parcela referente à aração, o semivariograma dos dados obtidos após a cultura mostrou ligeiro aumento do alcance e aumento do efeito pepita. Na parcela referente à escarificação, o aumento da variabilidade dos dados após o preparo acarretou uma correlação espacial a distâncias menores que antes do preparo, expressa por um menor alcance do semivariograma. Além disso, esta propriedade apresentou periodicidade tanto na situação antes do preparo de solo como após a colheita. Como o fenômeno verificou-

se nas duas situações amostradas, a periodicidade deve ser consequência do histórico dos sistemas de preparo de solo alternados, realizados na área, que seguiam o mesmo traçado, a fim de reduzir ao mínimo a quantidade de manobras do conjunto motomecanizado, em área terraceada.

4.4 Índice de cone

O índice de cone para as parcelas sob aração e sob escarificação foi medido antes do preparo e após a colheita em três camadas, as quais foram denominadas de superficial (0 - 0,10 m), intermediária (0,10 - 0,20 m) e profunda (0,20 - 0,30 m). Uma comparação visual entre os tratamentos pode ser feita com auxílio da Figura 16. Os momentos estatísticos para esta propriedade são apresentados na Tabela 8.

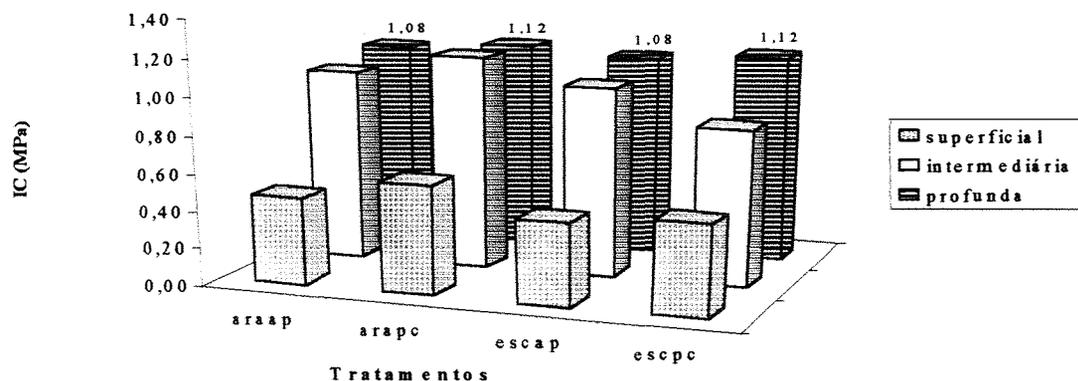


Figura 16 - Valores médios de índice de cone no tratamento aração, amostrado antes do preparo (araap) e após a colheita (arapc) e no tratamento escarificação, amostrado antes do preparo (escap) e após a colheita (escpc) nas camadas superficial, intermediária e profunda.

Tabela 6. Momentos estatísticos para os valores de índice de cone no tratamento aração, amostrado antes do preparo e após a colheita e no tratamento escarificação, amostrado antes do preparo e após a colheita, nas camadas superficial (0 - 0,10m), intermediária (0,10 - 0,20 m) e profunda (0,20 - 0,30 m).

Momentos	Aração						Escarificação					
	Antes do Preparo			Após colheita			Antes do preparo			Após colheita		
	0- 0,10m	0,10- 0,20m	0,20- 0,30m	0- 0,10m	0,10- 0,20m	0,20- 0,30m	0- 0,10m	0,10- 0,20m	0,20- 0,30m	0- 0,10m	0,10- 0,20m	0,20- 0,30m
Média	0,47	1,03	1,08	0,59	1,15	1,12	0,44	1,02	1,08	0,49	0,84	1,12
Mediana	0,46	1,00	1,03	0,58	1,16	1,14	0,42	1,02	1,06	0,48	0,82	1,13
Variância	0,02	0,06	0,02	0,02	0,05	0,04	0,01	0,04	0,03	0,01	0,07	0,13
d.p.	0,13	0,24	0,16	0,16	0,22	0,20	0,11	0,19	0,17	0,10	0,26	0,35
Assimetria	0,33	0,54	0,67	0,24	-0,35	-0,59	0,85	0,12	0,02	0,26	0,38	0,69
Curtose	-0,68	0,55	-0,34	-0,66	-0,30	0,96	0,49	0,11	-0,90	0,00	-0,97	0,12
cv %	27,7	23,3	14,8	27,1	19,1	17,9	25,0	18,6	15,7	20,4	31,0	31,3
d	0,09	0,14	0,17	0,11	0,06	0,07	0,19	0,07	0,10	0,07	0,12	0,15

d crítico a 5% = 0,200 (Campos, 1983).

Na Tabela 6 pode-se verificar que todas as distribuições podem ser consideradas como normais, pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, ao nível de 5%. Na parcela sob aração, antes do preparo, os valores de “d”, assim como os valores do coeficiente de assimetria aumentaram com a profundidade, antes do preparo. Na parcela sob escarificação, no entanto, a camada intermediária apresentou menores coeficientes, antes do preparo, demonstrando a heterogeneidade desta propriedade, antes do preparo.

Os coeficientes de variação na parcela sob aração, antes do preparo, revelam uma redução da variabilidade desta propriedade com a profundidade, o que também foi observado por Souza (1992). Esta tendência também se observa na parcela sob escarificação amostrada antes do preparo. Na parcela sob aração, esta tendência se mantém após a colheita, revelando a pouca influência deste sistema de preparo em profundidade. Por outro lado, constata-se que a escarificação exerceu influência marcante em profundidade, invertendo esta tendência, ou seja, na parcela sob escarificação, após a colheita, os coeficientes de variação cresceram com a profundidade.

As médias, assim como as medianas, apresentam tendência de crescimento com a profundidade, em todas as condições estudadas. Tal fenômeno pode estar associado ao

crescimento do conteúdo de argila com a profundidade (Figura 17). A camada superior apresenta valores consideravelmente inferiores aos das camadas intermediária e profunda, as quais tendem a apresentar valores semelhantes, principalmente antes do preparo.

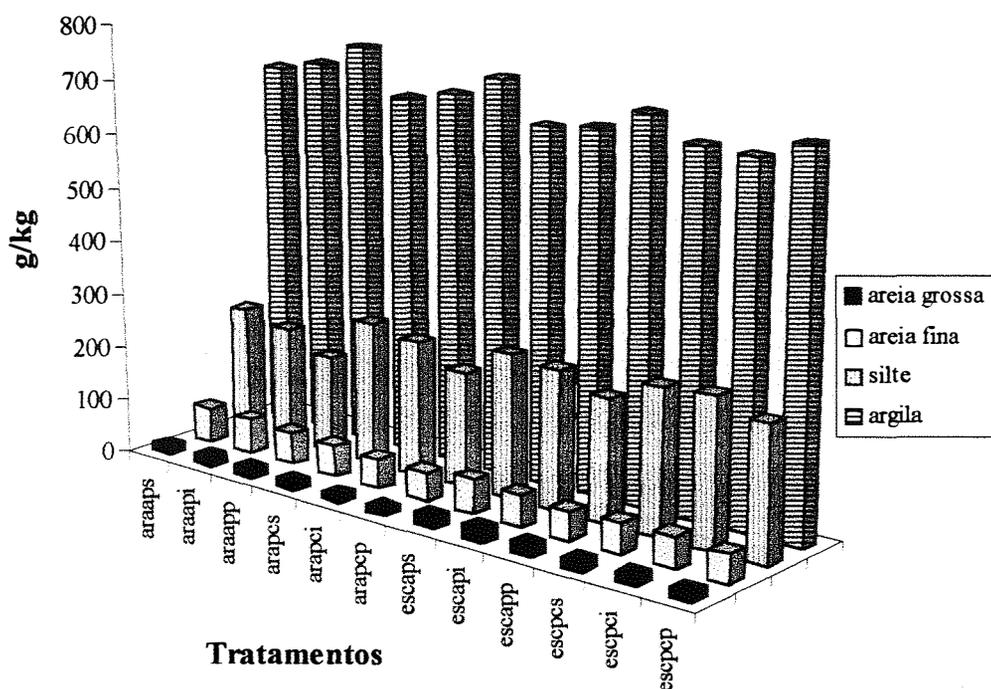


Figura 17 – Distribuição granulométrica (g/kg) nos tratamentos aração e escarificação nas situações antes do preparo e após a colheita, nas camadas superficial (s), intermediária (i) e profunda (p).

A camada superficial apresenta um conteúdo maior de matéria orgânica, decorrente da incorporação de resíduos de culturas antecedentes, além de ser a camada intensamente mobilizada tanto pelo preparo primário quanto pelo secundário. Na parcela sob aração, após a colheita, o valor médio do índice de cone da camada intermediária foi superior ao obtido na camada profunda. Na escarificação, isto não se verifica, ou seja, há nesta parcela uma tendência linear de crescimento do índice de cone com a profundidade, revelando a ação diferenciada dos elementos ativos dos sistemas de preparo nestas camadas.

Na parcela sob aração, os valores médios de índice de cone antes do preparo e após a colheita, na camada superficial, diferem entre si ao nível de 1%. Na camada intermediária, diferem ao nível de 5% e na camada profunda não diferem estatisticamente.

Na parcela sob escarificação, as médias de antes do preparo e de após a colheita, não diferem estatisticamente na camada superficial. Na camada intermediária as médias diferem ao nível de 1%, porém com uma redução do valor entre as duas amostragens, o que revela a ação favorável deste sistema de preparo, em relação à aração. Na camada profunda, as médias não diferem estatisticamente e, além disto, são exatamente iguais. Coincidentemente ou não, pode-se afirmar que as parcelas submetidas à aração e escarificação, na camada profunda, eram e permaneceram homogêneas, após o preparo de solo, quanto a esta propriedade. Estes resultados permitem inferir que a parcela intermediária é que comandou os processos físicos-hídricos, pelo menos para a cultura em questão.

A aração pouco alterou a variabilidade dos dados em cada camada, entre as duas amostragens (Tabela 6). Na parcela sob escarificação, a camada superficial apresentou um certo decréscimo do coeficiente de variação, entre as duas amostragens, decorrente provavelmente, da acomodação natural do solo. A camada intermediária além de apresentar médias diferentes ao nível de 1%, apresenta um valor de coeficiente de variação bem maior após a colheita que antes do preparo, mostrando a ação intensa deste sistema, nessa camada. Na camada profunda, embora as médias não sejam diferentes entre si, pode ter havido uma interação do sistema de preparo com a ação das raízes, promovendo maior variabilidade da propriedade, expressa por um maior coeficiente de variação. Estas relações entre médias e variabilidade em torno das mesmas, podem ser visualizadas nas Figuras 18 e 19.

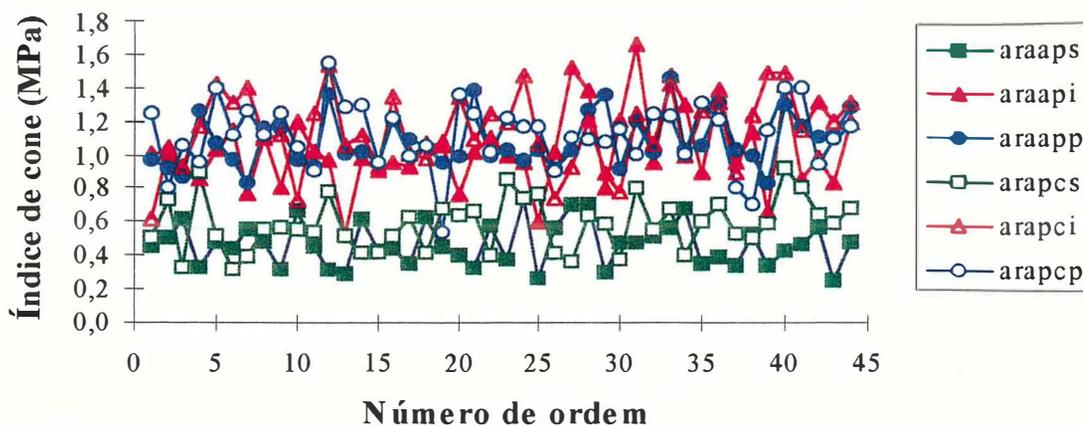


Figura 18 - Índice de cone na parcela sob aração, camada superficial, antes do preparo (araaps) e após a colheita (arapcs); camada intermediária, antes do preparo (araapi) e após a colheita (arapci) e camada profunda, antes do preparo (araapp) e após a colheita (arapcp).

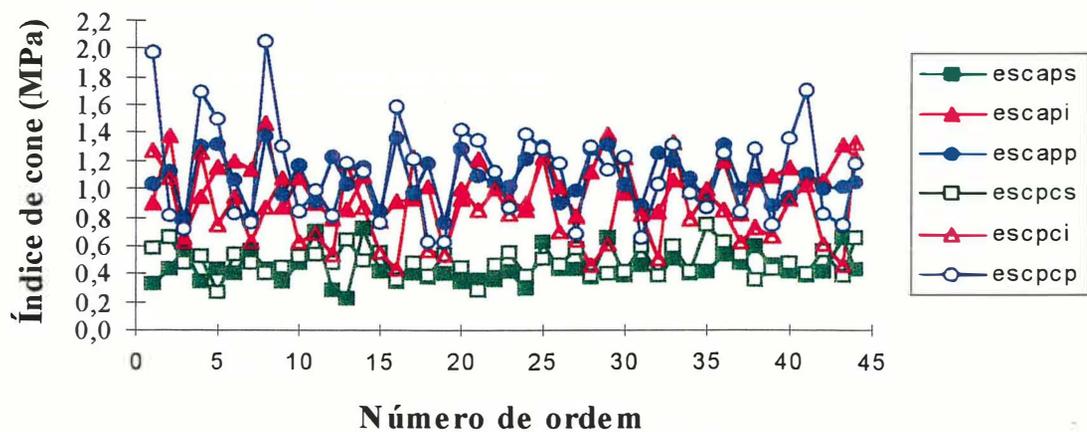


Figura 19 - Índice de cone na parcela sob escarificação, camada superficial, antes do preparo (escaps) e após a colheita (escpcs); camada intermediária, antes do preparo (escapi) e após a colheita (escpci); e camada profunda, antes do preparo (escapp) e após a colheita (escpcp).

Buscando identificar uma possível estrutura espacial desta propriedade nas parcelas estudadas, foram construídos os semivariogramas com os dados nas condições antes do preparo e após a colheita, para as três camadas consideradas. Na Figura 20 são mostrados os semivariogramas escalonados pela variância amostral para a aração antes do preparo, nas três camadas.

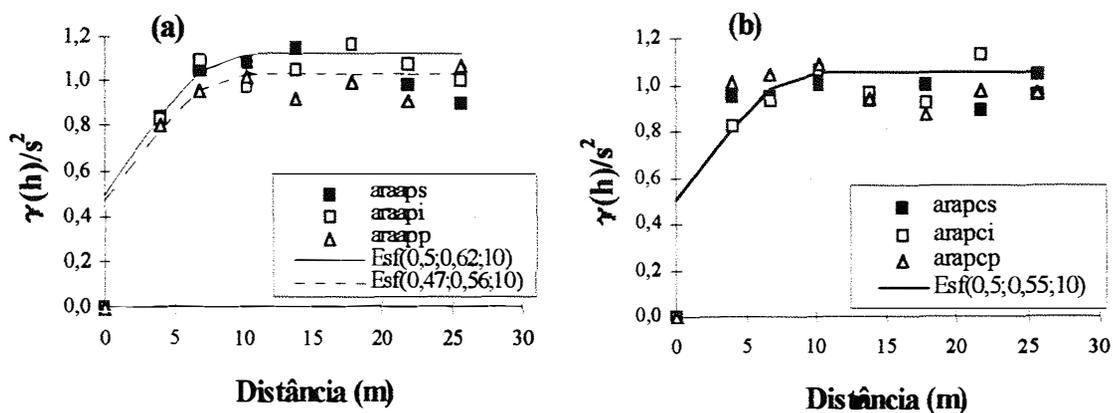


Figura 20 - Semivariogramas escalonados para os dados de índice de cone na parcela sob aração, amostrados antes do preparo (a) e após a colheita (b), para a camada superficial (araaps e arapcs), para a camada intermediária (araapi e arapci) e para a camada profunda (araapp e arapcp).

Na Figura 20a são mostrados os semivariogramas escalonados para a parcela sob aração, nas três camadas consideradas. A validação cruzada mostrou que o modelo esférico apresentou melhor ajuste ao semivariograma da camada superficial (araaps). A camada profunda (araapp) apresenta semivariograma com patamar um pouco menor mas também pode ser ajustada pelo modelo esférico. Os parâmetros dos modelos escalonados são mostrados na Tabela 7, onde pode-se verificar que a variância amostral na camada profunda é um pouco superior à da camada superficial. Como pode ser observado na Tabela 6, a variância dos dados na camada intermediária é maior que nas outras duas e, associado a isto, os pontos do semivariograma escalonado são mais dispersos em torno do modelo esférico ajustado, tomado como adequado para descrevê-lo.

Tabela 7 - Parâmetros dos modelos escalonados ajustados aos semivariogramas experimentais nos tratamentos que receberam aração (ara) e escarificação (esc) amostrados antes do preparo (ap) e após a colheita (pc) para as camadas superficial (s), intermediária (i) e profunda (p).

Tratamentos	Modelos	C_0	C_1	(a) alcance	C_2	C_0/C_2 - %
araaps, araapi	esférico	0,5	0,62	10	1,12	44,6
araapp	esférico	0,47	0,56	10	1,03	45,6
arapcs, arapci, arapcp	esférico	0,5	0,55	10	1,05	47,6
escaps, escpcs,	esférico	0,72	0,33	13	1,08	66,7
escapi, escpci,	esférico	0,57	0,42	10	0,99	57,6
escapp, escpcp	esférico	0,62	0,4	10	1,02	60,8

Após a colheita, a dispersão dos dados de índice de cone em torno da média é semelhante nas camadas profunda e intermediária e maior que na camada superficial. A camada intermediária no entanto, mostrou semivariograma com melhor estrutura, como pode ser visto na Figura 20b. A este foi ajustado o modelo esférico, cujos parâmetros estão apresentados na Tabela 7. As duas outras camadas apresentaram, praticamente, nenhuma estrutura e não se ajustou modelos a estes semivariogramas.

Na parcela sob escarificação, a camada superior apresentou variância praticamente inalterada entre as duas amostragens, como pode ser observado na Tabela 6. Os semivariogramas escalonados pelas variâncias amostrais para antes do preparo (escaps) e para após a colheita (escpcs), são mostrados na Figura 21a. Após o teste de validação cruzada, optou-se ajustar um único modelo aos dois semivariogramas. Seus parâmetros constam da Tabela 7.

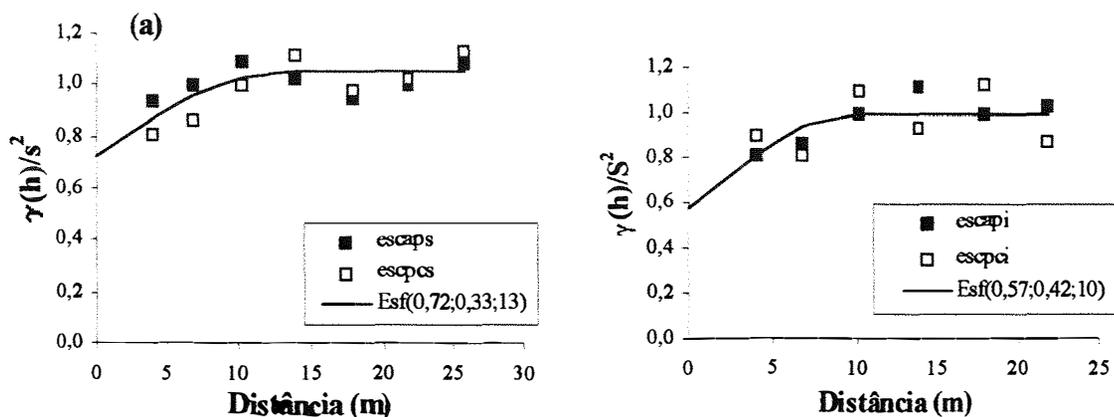


Figura 21 - Semivariogramas escalonados para os dados de índice de cone na parcela sob escarificação, para a camada superior **(a)**, antes do preparo (escaps) e após a colheita (escpcs) e para a camada intermediária **(b)**, antes do preparo (escapi) e após a colheita (escpci).

Na camada intermediária, a variância após a colheita foi maior que antes do preparo. Como mostrado na Figura 21b, a dispersão dos pontos do semivariograma experimental escalonado pela variância amostral foi maior para os dados de após a colheita (escpci) que o verificado para antes do preparo (escapi). Apesar desta maior dispersão, o teste de validação cruzada permitiu ajustar um único modelo para esta camada, como pode ser visto na Figura 21b.

Efeito semelhante ao descrito para a camada intermediária foi verificado para a camada profunda, na parcela sob escarificação, antes do preparo e depois da colheita. A variância dos dados cresceu expressivamente e a dispersão dos pontos dos semivariogramas experimentais escalonados pela variância amostral também cresceu. No entanto, a forma permaneceu semelhante o bastante para mais uma vez se optar por ajustar um único modelo, conforme mostrado na Figura 22.

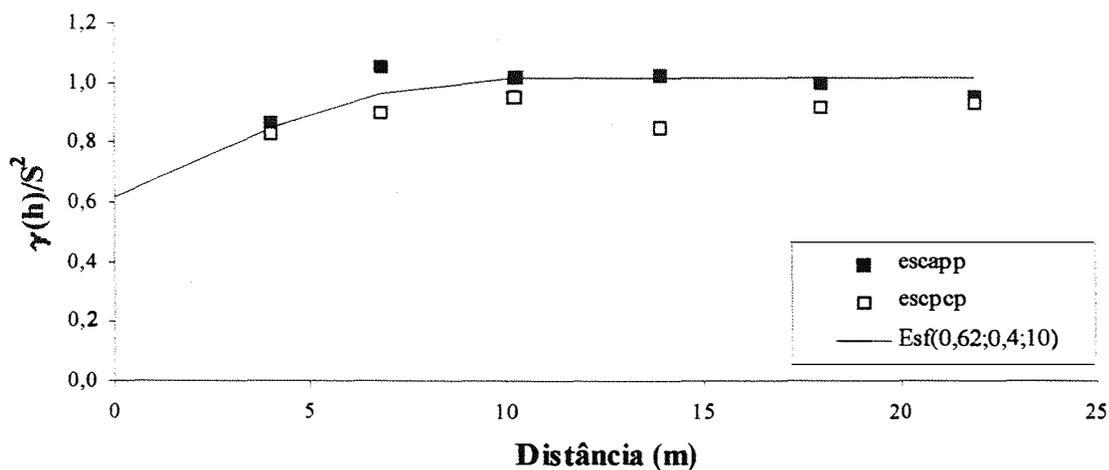


Figura 22 - Semivariogramas escalonados para os dados de índice de cone na parcela sob escarificação, para a camada profunda, amostrados antes do preparo (escapp) e após a colheita (escpcp).

A camada profunda na parcela sob escarificação apresentou grande variação da dispersão dos dados entre as duas amostragens, ou seja, antes do preparo e após a colheita. Apesar disto, o teste de validação cruzada permitiu ajustar modelo único, pelo menos até a área de domínio da propriedade. Assim, o modelo ajustado pode ser usado para se interpolar por krigeagem entre os pontos amostrais, nas duas situações, o que possibilita a construção de uma superfície tridimensional de valores da propriedade, permitindo a melhor compreensão do que ocorre entre estas duas situações.

A observação da Figura 23 permite verificar que a ação da escarificação na camada profunda apenas alterou a variabilidade dos dados, não modificando de forma sensível a sua distribuição no espaço, o que proporcionou os semivariogramas semelhantes mostrados na Figura 22.

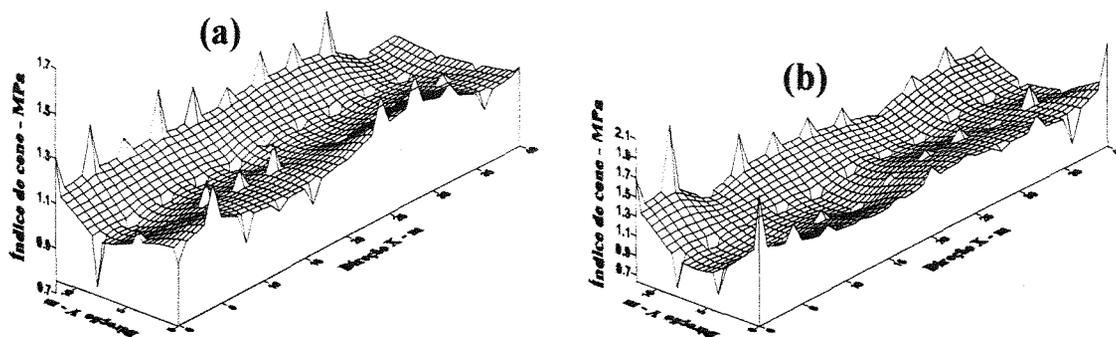


Figura 23 - Superfícies de valores de índice de cone na parcela sob escarificação, amostrados antes do preparo (a) e após a colheita (b), na camada profunda (0,20 - 0,30 m).

A Figura 24 permite constatar que o índice de cone sofreu maiores alterações na camada intermediária, submetida à escarificação, que a camada profunda, mostrada na Figura 23. Isto revela a maior ação deste sistema de preparo nesta camada, o que é conveniente para a cultura de feijão, cujo sistema radicular se concentra nesta faixa de profundidade. As alterações verificadas na camada superficial provavelmente se devem mais à ação do preparo secundário e posterior acomodação do solo que propriamente da ação da escarificação, nesta parcela.

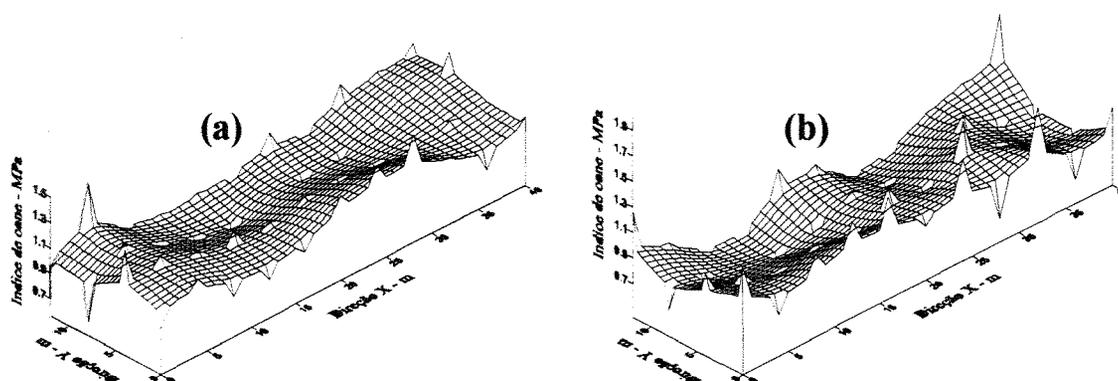


Figura 24 - Superfícies de valores de índice de cone na parcela sob escarificação, amostrados antes do preparo (a) e após a colheita (b), na camada intermediária (0,10 - 0,20 m).

Na parcela sob aração, a camada superior é a mais atingida pelo sistema de preparo que, ao inverter a leiva, introduz grande perturbação, que pode ser responsável pela forte alteração da forma do semivariograma, antes e depois do preparo, como mostrado na Figura 20, para a camada superficial. Além disso, os discos atingem parte da camada intermediária, por um lado removendo a parte superior desta camada e por outro tendendo a deixar a parte imediatamente inferior mais compactada.

Assim, a escarificação apresenta como principal característica favorável o fato de impor à camada intermediária um menor valor médio de índice de cone, ao qual está associado uma variabilidade maior dos valores. Este fato pode ser justificado por uma ação benéfica da escarificação sobre a estrutura do solo, condicionado-a a apresentar maior quantidade de água retida a menores tensões e conseqüentemente menor resistência à penetração. A aração, ao contrário, promove nesta camada o maior valor médio identificado em todas as avaliações. Além disso, enquanto a aração não age diretamente na camada profunda, a escarificação, apesar de não mudar o padrão espacial da propriedade nesta camada, atua no sentido de revolver o solo, gerando uma variabilidade maior dos valores.

4.5 Rendimento da cultura

Na Tabela 8 estão mostrados os momentos estatísticos para os dados de rendimento de massa total e de grãos, para as parcelas sob aração e sob escarificação. Pode-se constatar que as médias na escarificação foram superiores às médias na aração, sendo as diferenças significativas ao nível de 1%. Os valores de média e mediana ficaram muito próximos entre si, indicando a simetria das distribuições. A variabilidade dos dados foi caracterizada por coeficientes de variação relativamente altos, maiores para a aração. A escarificação apesar de dar origem a maior variabilidade de algumas propriedades do solo, como o índice de cone, o que também foi verificado por Souza (1992), deu origem aos menores coeficientes de variação do rendimento da cultura.

Os coeficientes de assimetria e curtose indicam distribuição dos dados próxima da normalidade, o que é comprovado pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ao nível de

5%. O critério adotado para a caracterização de valores discrepantes não permitiu a identificação de nenhum desses valores.

Tabela 8. Momentos estatísticos para o rendimento (Mg/ha) de massa total e de grãos nos tratamentos sob aração e sob escarificação.

Momentos	Rendimento, Mg/ha			
	Aração		Escarificação	
	Massa Total	Grãos	Massa Total	Grãos
Estadísticos				
N	44	44	44	44
Média	4,13b	1,98d	5,66a	2,65c
Mediana	4,10	1,99	5,44	2,64
Variância	0,59	0,22	0,86	0,19
Assimetria	-0,03	0,09	0,06	0,18
Curtose	-0,54	-0,53	-0,24	0,55
cv, %	18,5	23,9	16,4	16,4
d	0,09	0,07	0,113	0,09

d crítico a 5%: 0.200 (Campos, 1983).

*médias com letras iguais na escarificação e na aração não diferem entre si ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t.

Na Figura 25 são mostradas as relações entre rendimento de grãos e de massa total para as parcelas sob aração e sob escarificação, e as respectivas retas de regressão linear ajustadas às mesmas. Pode-se visualizar as altas correlações obtidas para estas variáveis, expressas por coeficientes de determinação (r^2) de 0,88 para aração e de 0,74 para escarificação. É possível constatar, então, que nos dois sistemas de preparo não houve exagerada produção de massa verde em detrimento da produção de grãos. Assim, as demais análises envolvendo atributos de planta foram feitas com o rendimento de grãos.

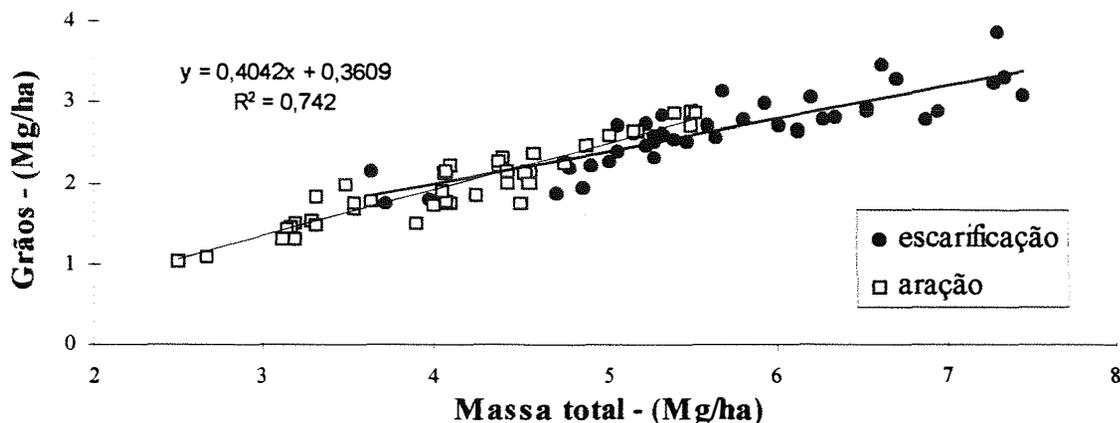


Figura 25 - Relação entre rendimento de grãos (Mg/ha) e de massa total de plantas (Mg/ha) para as parcelas sob aração e sob escarificação.

Pode-se verificar, ainda, na Figura 25, os maiores valores de rendimento obtidos na parcela sob escarificação, em relação à aração. As médias para rendimento de grãos, mostradas na Tabela 10, diferiram entre si ao nível de 1% pelo teste t.

A distribuição espacial dos valores de rendimento de grãos pode ser avaliada por meio das ferramentas da geoestatística. Para tanto, é necessária a construção dos semivariogramas, conforme apresentados na Figura 26, que mostra os semivariogramas experimentais para esta variável nas parcelas sob aração e sob escarificação, bem como o modelo ajustado aos mesmos. Na Tabela 9 são mostrados os parâmetros do modelo ajustado.

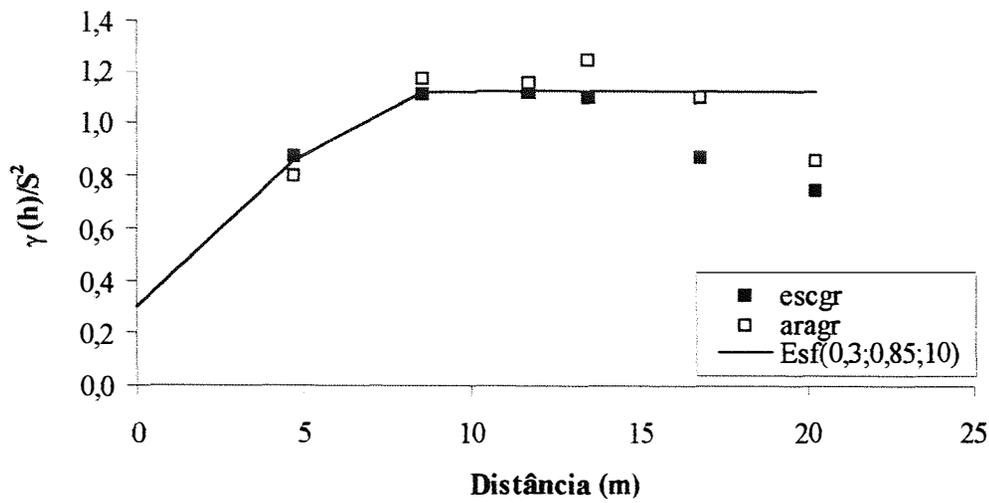


Figura 26 - Semivariogramas para rendimento de grãos, na parcela sob aração (aragr) e na parcela sob escarificação (escgr).

Verifica-se que os semivariogramas para rendimento de grãos apresentam estrutura de dependência da variabilidade espacial bem definida para os dois sistemas de preparo. O teste de validação cruzada permitiu ajustar um modelo matemático único para as duas situações. O decréscimo dos valores dos semivariogramas após os 15 m indica a ocorrência de periodicidade da propriedade no campo. Se a função semivariograma mede a dessemelhança ou a dispersão dos valores de uma propriedade em relação a média, infere-se que este afastamento dos valores da propriedade produtividade nos dois tratamentos não ocorre indefinidamente. A partir dos 15 m os valores da propriedade passam a ser mais parecidos entre si evidenciando uma periodicidade que ocorreu nos dois tratamentos, demonstrando ainda ser resultado de outras interveniências mecânicas ou de processos de formação do solo e não fruto dos preparos ora analisados.

Tabela 9. Parâmetros dos semivariogramas, modelo ajustado e relação entre efeito pepita e patamar para o rendimento de grãos nas parcelas referentes à aração (aragr) e à escarificação (escgr).

Tratamentos	modelo	C ₀	C ₁	C ₂	Alcance (m)	C ₀ /C ₂ - %
aragr/escgr	esférico	0,3	0,85	1,15	10	26,0

O efeito pepita foi o mesmo nos dois modelos indicando que a variação total do rendimento devida ao acaso (causas não identificadas e/ou não controladas) e a variação espacial em distâncias menores do que a amostrada foi da ordem de 26%. Ou seja, 74% da variação total do rendimento da cultura foi atribuída à dependência espacial. Isto significa que, se a amostragem sistemática fosse realizada a intervalos menores que 4 metros, provavelmente, o componente estrutural da dependência espacial seria maior.

A correlação linear entre dois atributos expressa a relação entre eles. A análise de regressão pode identificar o quanto da variação de uma variável pode ser explicada por uma outra. Assim, foram feitos os ajustes por meio da regressão linear entre rendimento de grãos e índice de cone na camada intermediária para as duas parcelas estudadas, conforme mostrado na Figura 27.

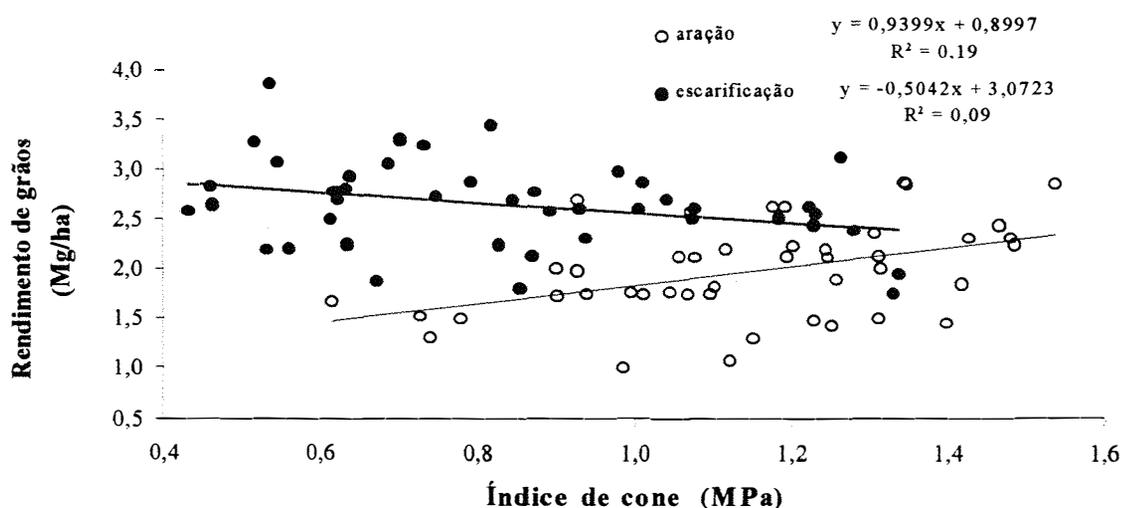


Figura 27 - Regressões entre rendimento de grãos e índice de cone na camada intermediária, para as parcelas sob aração e sob escarificação.

Na parcela sob aração, a análise de regressão revela um comportamento diferente do esperado, ou seja, o rendimento de grãos apresenta uma correlação positiva com os valores de índice de cone na camada intermediária, expressa por um modelo de regressão linear significativo ao nível de 1%, com um coeficiente de determinação de 0,19. Este comportamento contraditório deve-se provavelmente ao fato de que a cultura respondeu principalmente a outras propriedades do solo que não o índice de cone da camada intermediária, o que é consistente com o fato de que este sistema de preparo pouco interferiu nesta camada.

Na parcela sob escarificação, a análise de regressão revela uma tendência de decréscimo do rendimento de grãos com o aumento do índice de cone, na camada intermediária.

Este fato é compatível com a afirmativa de que este sistema de preparo atuou de forma benéfica e mais intensa nesta camada. No entanto, esta tendência não é significativa ao nível de 1% e, além disso, o coeficiente de determinação do modelo de regressão ajustado é de apenas 0,09, evidenciando apenas uma tendência pouco expressiva entre essas variáveis.

De posse dos modelos de semivariogramas apresentados na Tabela 9 foi construída a superfície de valores de rendimento de grãos na parcelas sob aração e sob escarificação, mostradas na Figura 28, por meio de krigagem.

As superfícies de valores de rendimento de grãos mostradas na Figura 28 mostram a distribuição espacial desta variável nas duas parcelas. Observa-se também o fenômeno da periodicidade transversal à linha de maior comprimento no sistema aração e periodicidade longitudinal no sistema escarificação. Tais comportamentos podem estar relacionados à forma diferenciada de mobilização do solo, desenvolvidas pelos dois sistemas de preparo.

Buscando identificar a correlação entre os valores de rendimento e algumas propriedades de solo avaliadas nas três camadas identificadas para o presente trabalho, selecionou-se a propriedade índice de cone na camada intermediária, uma vez que, conforme já discutido, os dois sistemas de preparo promoveram alterações mais significativas nesta camada, comparativamente às outras.

A análise de regressão permite expressar de forma quantitativa o grau de relacionamento entre duas variáveis, não levando em conta no entanto, a posição espacial das mesmas. A distribuição espacial dos valores de uma ou mais variáveis pode ser comparada visualmente por meio das superfícies obtidas a partir da krigeagem, gerando uma malha mais fina que a de amostragem, o que permite uma visualização melhor do padrão espacial e ainda, fornece valores seguros e sem tendenciosidade possibilitando interpolar valores da propriedade, em locais onde não foram amostrados.

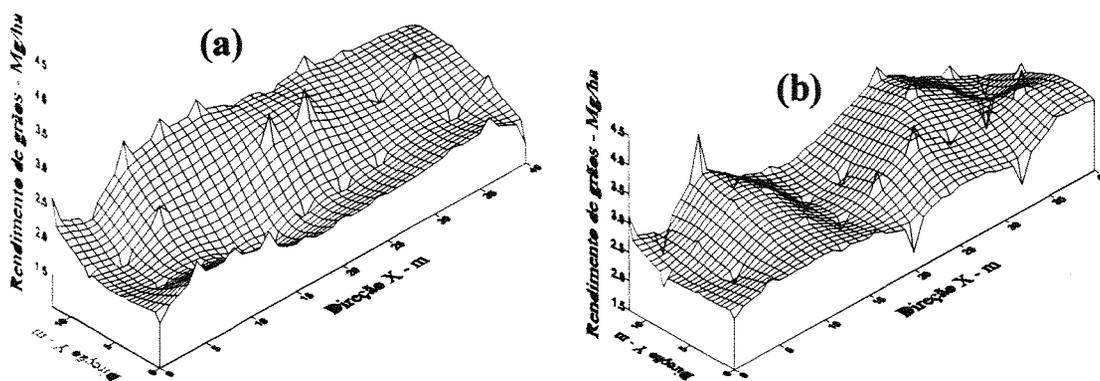


Figura 28 - Superfícies de valores de rendimento de grãos (Mg/ha) para as parcelas sob aração (a) e sob escarificação (b).

Na Figura 29 são mostradas as superfícies de valores de índice de cone para as duas parcelas estudadas, mostradas novamente aqui para fins de comparação com os valores de rendimento de grãos.

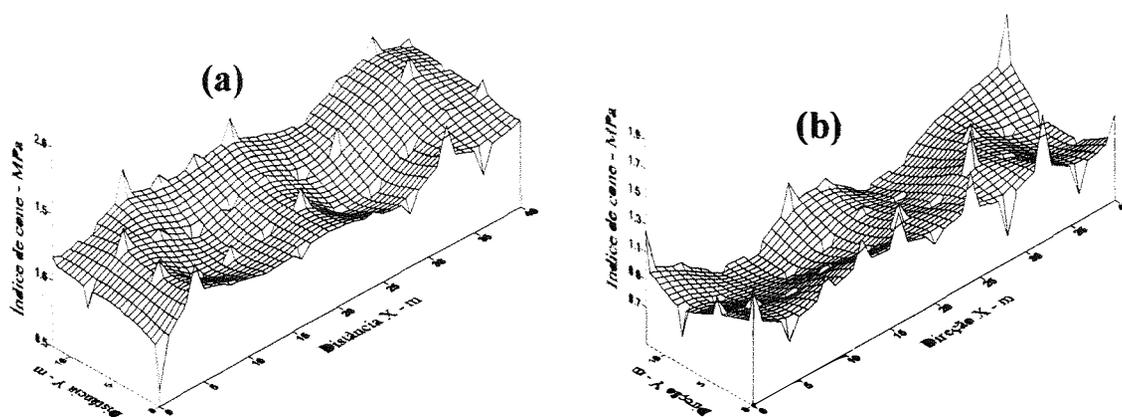


Figura 29 - Superfície de valores de índice de cone para a camada intermediária na aração (a) e na escarificação (b).

Na parcela sob aração, o rendimento de grãos apresenta um padrão espacial que, se comparado visualmente com o padrão do índice de cone na camada intermediária, não revela qualquer relação entre estas variáveis. Na parcela sob escarificação, no entanto, a situação é completamente diferente. A observação cuidadosa das Figuras 28 e 29, para a parcela sob escarificação, revela que os padrões espaciais do rendimento de grãos e de índice de cone nesta parcela estão muito correlacionados espacialmente, ou seja, o aumento e a redução dos valores de índice de cone são acompanhados de perto pelos valores de rendimento. Isto evidencia que a análise de regressão, não considerando a posição espacial dos valores, falha na identificação de correlações que podem ser expressivas.

Buscando correlacionar espacialmente as variáveis rendimento de grãos e índice de cone na camada intermediária, foi construído então o semivariograma cruzado destas propriedades, conforme feito por Vauclin et al. (1982), mostrado na Figura 30.

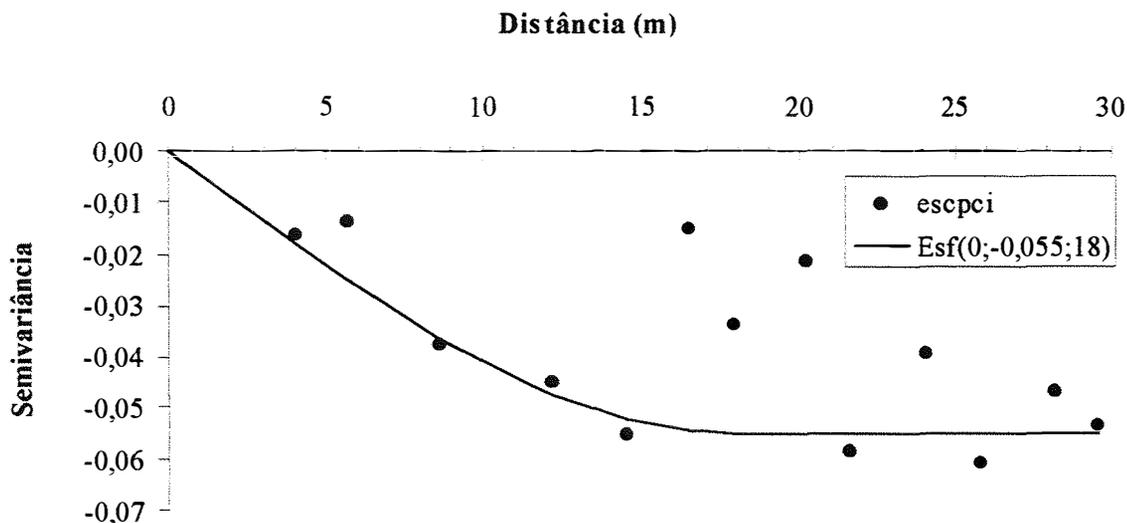


Figura 30 - Semivariograma cruzado para rendimento de grãos e índice de cone na parcela sob escarificação, camada intermediária, após a colheita (escpci).

O semivariograma cruzado da Figura 30 expressa quantitativamente a correlação espacial inversa entre estas variáveis. O modelo ajustado foi o esférico, com efeito pepita nulo, patamar de -0,055 e alcance de 18 m.

Assim, pode-se concluir que o sistema de preparo escarificação, ao contrário da aração, agiu de forma conveniente na camada intermediária e esta ação permitiu à cultura responder com maior rendimento, acompanhando o padrão do índice de cone medido nesta camada. As ferramentas usuais da estatística, no entanto, não permitiram constatar esta estreita relação. A geoestatística, por outro lado, considerando a posição espacial dos valores, permitiu chegar a conclusões que passariam despercebidas utilizando somente as ferramentas tradicionais da estatística. Boyer et al. (1996) encontraram resultados semelhantes nas correlações entre produção de biomassa de pastagens com propriedades químicas do solo. Destacam que as análises de correlações mostraram-se inadequadas para identificar as relações altamente significativas, claramente mostradas pelo semivariograma cruzado.

5 CONCLUSÕES

Macroporosidade, índice de cone e rendimento de biomassa e de grãos do feijoeiro apresentaram estrutura de dependência espacial, porém com altos valores para efeito pepita.

A aração não promoveu redução do índice de cone na camada intermediária e a produtividade da cultura foi menor do que sob escarificação, não apresentando correlação espacial entre valores.

A escarificação distribuiu melhor os tamanhos de poros responsáveis pela qualidade estrutural do solo.

A escarificação mostrou melhor desempenho no manejo de solo e água em área irrigada.

O semivariograma mostrou que, para a macroporosidade, as parcelas tinham variabilidades semelhantes antes do preparo de solo.

A análise de regressão foi inadequada para identificar a correlação espacial entre o rendimento de grãos e o índice de cone, na parcela escarificação. O semivariograma cruzado mostrou esta correlação.

ANEXOS

ANEXO A. Valores médios de densidades (Mg/m^3) nas parcelas sob aração e sob escarificação antes do preparo do solo e após a colheita, na camada intermediária (0,20 m).

Parâmetros do solo	Tratamentos			
	Aração		Escarificação	
	Antes do preparo	Após a colheita	Antes do preparo	Após a colheita
Densidade do solo	1,368	1,383	1,418	1,345
Densidade de partículas	2,994	2,990	2,944	2,944

ANEXO B. Valores médios da distribuição granulométrica do solo (g/kg) nas parcelas sob aração e sob escarificação antes do preparo de solo e após a colheita, nas três profundidades.

Frações	Tratamentos			
	Aração		Escarificação	
	Antes do preparo	Após a colheita	Antes do preparo	Após a colheita
	profundidade de 0 a 0,10 m			
Areia grossa	17,0	15,0	21,0	18,0
Areia fina	64,0	57,0	63,0	57,0
Silte	235,0	265,0	265,0	265,0
Argila	684,0	663,0	651,0	660,0
	profundidade de 0,10 a 0,20 m			
Areia grossa	18,0	15,00	25,0	19,00
Areia fina	64,0	54,0	58,0	57,0
Silte	215,0	248,0	256,0	272,0
Argila	703,0	683,0	661,0	652,0
	profundidade de 0,20 a 0,30 m			
Areia grossa	15,0	13,0	22,0	16,0
Areia fina	58,0	52,0	53,0	52,0
Silte	181,0	211,0	225,0	245,0
Argila	746,0	724,0	700,0	687,0

ANEXO C. Valores médios de atributos da fertilidade do solo nas parcelas sob aração e sob escarificação, antes do preparo de solo e após a colheita, nas três profundidades.

Atributos da da fertilidade do solo	Tratamentos			
	Aração		Escarificação	
	Antes do preparo	Após a colheita	Antes do preparo	Após a colheita
	profundidade de 0 a 0,10 m			
pH em CaCl ₂	5,432	5,470	5,564	5,420
pH em H ₂ O	5,986	6,050	6,082	5,980
H ⁺ +Al ⁺⁺⁺ (cmol _c /dm ³)	3,130	3,362	2,639	3,382
Ca ⁺⁺ +Mg ⁺⁺ (cmol _c /dm ³)	8,315	8,834	6,877	8,433
Ca ⁺⁺ (cmol _c /dm ³)	6,460	6,659	5,508	6,551
K ⁺ (cmol _c /dm ³)	0,588	0,363	0,513	0,324
P (mg/dm ³)	6,386	8,386	6,818	13,909
C (g/dm ³)	14,53	14,84	15,17	14,86
	profundidade de 0,10 a 0,20m			
pH em CaCl ₂	5,330	5,373	5,523	5,459
pH em H ₂ O	5,909	5,952	6,043	6,011
H ⁺ +Al ⁺⁺⁺ (cmol _c /dm ³)	3,239	3,463	2,655	3,437
Ca ⁺⁺ +Mg ⁺⁺ (cmol _c /dm ³)	7,750	8,455	6,733	8,570
Ca ⁺⁺ (cmol _c /dm ³)	6,040	6,414	5,433	6,519
K ⁺ (cmol _c /dm ³)	0,441	0,288	0,410	0,289
P (mg/dm ³)	4,500	5,465	6,318	8,273
C (g/dm ³)	13,81	13,88	14,52	13,03
	profundidade de 0,20 a 0,30m			
pH em CaCl ₂	5,177	5,280	5,493	5,377
pH em H ₂ O	5,755	5,875	5,995	5,916
H ⁺ +Al ⁺⁺⁺ (cmol _c /dm ³)	3,178	3,567	2,623	3,426
Ca ⁺⁺ +Mg ⁺⁺ (cmol _c /dm ³)	6,907	7,657	6,070	7,597
Ca ⁺⁺ (cmol _c /dm ³)	5,404	5,663	4,767	5,799
K ⁺ (cmol _c /dm ³)	0,290	0,219	0,289	0,179
P (mg/dm ³)	2,386	3,636	3,651	3,182
C (g/dm ³)	10,90	11,50	12,50	11,01

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAUDER, J.W.; RANDALL, G.W.; SWAN, J.B. Effect of four continuous tillage systems on mechanical impedance of a clay loam soil. **Soil Science Society of America Journal**, v.45, p.802-806, 1981.
- BEIGUELMAN, B. **Curso prático de bioestatística**. 3ª ed. Ribeirão Preto, Sociedade Brasileira de Genética, 1994. 244p.
- BENGOUGH, A.G. ; MULLINS, C.E. Mechanical impedance to growth root: a review of experimental techniques and root growth responses **Journal of Soil Science**, v.41, p.341, 1990.
- BHATTI, A.U.; MULLA, D. J.; KOEHLER, F.E.; GURMANI, A.H. Identifying and removing spatial correlation from yield experiments. **Soil Science Society of America Journal**, v.55, n.6, p.1523-1528, 1991.
- BOYER, D.G.; WRIGHT, R.J.; FELDHAKE, C.M.; BLIGH, D.P. **Soil Science**, v.161, n.5, p.278-287, 1996.
- BRADFORD, J.M. Penetrability. In: A. Klute (ed). **Methods of soil analysis, physical, chemical and mineralogical methods**. American Society of Agronomy, 1986.
- BRESLER, E. ; DASBERG, S.; RUSSO, D.; DAGAN, G. Spatial variability of crop yield as a stochastic soil process. **Soil Science Society of America Journal**, v.45 p.600-605, 1984.

- CAHN, M.D.; HUMMEL, J.W.; BROUER, B.H. Spatial analysis of fertility for site-specific crop management. **Soil Science Society of America Journal**, v.58 p.1240-1248, 1994.
- CAMPOS, H. de. **Estatística experimental não paramétrica**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1983 . 349 p.
- CASSEL, D.K. Spatial and temporal variability of soil physical properties following tillage of norfolk loamy sand. **Soil Science Society of America Journal**, v.47, p.196 - 205, 1983.
- CASSEL, D.K. ; BOWEN, H.D.; NELSON, L.A. An evaluation of mechanical impedance for three tillage treatments on norfolk sandy loam. **Soil Science Society of America Journal**, v.42, p.116-120, 1978.
- CASSEL, D.K.; UPCHURCH, D.R. & ANDERSON, S.H. Using regionalized variables to estimate field variability of corn yield for four tillage regimes. **Soil Science Society of America Journal**, v.52,n.1, p.222 - 228, 1988.
- CULLEY, J. L. B.; LARSON, W. E.; RANDALL, G. W. Physical properties of a Typic Haplaquol under tillage and no tillage. **Soil Science Society of America Journal**, v. 51, p. 1587-1593, 1987.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Rio de Janeiro: Embrapa, 1979, lv.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Boletim Técnico nº 57**. Curitiba, Embrapa, 1984, 791p.
- ES, H.M. van; ES, C.L. van; CASSEL, D.K. Application of regionalized variable theory to large-plot field experiments. **Soil Science Society of America Journal**, v.53, p.1178-1183, 1989.
- FOLEGATTI, M. V. Estabilidade temporal e variabilidade espacial da umidade e armazenamento de água em solo siltoso. Piracicaba, 1996. 84p. Tese (Livro

- Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- FORSYTHE, W.M. ; HUERTAS, A. Effect of soil penetration resistance on the growth and yields of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) 27-R variety. **Turrialba**, v.29, n.4, p.293-298, 1979.
- GLASBEY, C.A. ; OSSULIVAN, M.F. Analysis of cone resistance data with missing observations below stones. **Journal of Soil Science**, v.39, p.587-592, 1988.
- GOMES, F. P. **A estatística moderna na pesquisa agropecuária**. Piracicaba: Potafos, 1984. 160 p.
- GROENEVELT, P. H.; KAY, B.D.; GRANT, C.D. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. **Geoderma**, v.34, p.101-114, 1984.
- GUROVICH, L.A. Estrutura de la variabilidade espacial de las propiedades hidrodinâmicas de los suelos. **Ciência e Investigacion Agrária**, v.9, p.243-254, 1982.
- JOURNEL, A.G. ; HUIJBREGTS, Ch. J. **Mining Geostatistics**. London: Academic Press, 1978, 600p.
- LANDIM, P.M.B. **Introdução à geoestatística**. Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas/UNESP, 1988, 69p.
- LIBARDI, P.L.; MANFRON, P.A.; MORAES, S.O; TUON, R.L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, n.1, p. 1-12, 1996.
- LOWRY, F.E.; TAYLOR, H.M. ; HUCK, M.G. Growth rate and yield of cotton as influenced by depth and bulk density of soil pans. **Soil Society of America Proceeding**, v.34, n.2, p.306-309, 1970

- MATA, J.D.V. Relações entre as características físicas e os níveis de compactação de alguns latossolos paranaenses. Curitiba, 1988. 105p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Paraná.
- McBRATNEY, A.B. The role of geostatistics in the design and analysis of field experiments with reference to the effect of soil properties on crop yield. **Proceedings of a workshop of the ISSS and SSSA**, Las Vegas, 1984.
- McBRATNEY, A.B. ; WEBSTER, R. Detection of ridge and furrow pattern by spectral analysis of crop yield. **Int. Statistical Review**, v.49, p.45-52, 1981.
- MENDES, I. Study of uniformity trials and six proposals to alternatives to blocking for the design and analysis of field experiments. Raleigh: North Carolina State Univ., 1970. (Inst. of Statistics Mimeo Series 696).
- MOOLLMAN, J. H.; HUYSSTEEN, L. van. A Geoestatistical analysis of the penetrometer soil strength of a deep ploughed soil. **Soil & Tillage Research**, v. 15, p.11-24, 1989.
- MULQUEEN, J.; STAFFORD, J.V. ; TANNER D.W. Evaluation of penetrometers for measuring soil strength. **Journal of Terramechanics**, v. 14, p.137-151, 1977.
- PEARCE, S.C. Randomized blocks and some alternatives: A study in tropical conditions. **Tropical Agriculture**, v.57, p.1-10, 1980.
- PIDGEON, J.D. ; SOANE, B.D. Soil structure and strength relations following tillage, zero tillage and wheel traffic in Scotland. In: John Wiley & Sons. **Modification of soil structure**. 1979.
- PREVEDELLO, B.M.S. Variabilidade espacial de parâmetros de solo e planta. Piracicaba, 1987. 166p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

- PRIMAVESI, O. Nutrição mineral de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) em dois solos sujeitos à compactação. Piracicaba, 1983, 142p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- RASIAH, V.; KOHL, R.A. Soybean root water uptake in two soils. **Agricultural Water Management**, v. 15, p.387-393, 1989.
- REICHARDT, K. Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera. Campinas: Fundação Cargill, 1985, 416 p.
- ROVIRA, L.A.A. Estudo do sistema radicular do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) var. Carioca. Piracicaba, 1975. 86p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- SALVIANO, A.A.C. Variabilidade de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* L. em solo degradado do município de Piracicaba, 1996, 91p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- SÁNCHEZ, P.A. Suelos del trópico: características y manejo. San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperacion para la Agricultura, 1981. 633 p.
- SCHAFFER, R.L. ; JOHNSON, C.E. Changing soil condition- The dynamic of tillage. In: **Predicting tillage effects on soil physical properties and processes**. American Society of Agronomy Proceedings, 1982. p.151-178.
- SELIM, H.M.; DAVIDOFF, B.; FLUHLER, H. SCHULIN, R. Variability of *in situ* measured mechanical impedance for a fragipan soil. **Soil Science**, v.144, p.442-452, 1987.
- SILVA, A.P. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo. Piracicaba,1988, 105p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

- SILVA, A.P. ; LIBARDI, P.L. ; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho-Escuro ao longo de uma transeção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.13, p.1-5, 1989.
- SOUZA, L.S. Variabilidade espacial do solo em sistemas de manejo. Porto Alegre, 1992, 162p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SOUZA, L.D. ; REICHARDT, K. Estimativas da capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.183-189, 1996.
- STITT, R.E.; CASSEL, D. K.; WEED, S. B.; NELSON, L. A. Mechanical impedance of tillage pans in Atlantic Coastal plains soils and relationships with soil physical, chemical and mineralogical properties. **Soil Science Society of America Journal**, v.46, p.100 - 106, 1982.
- STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M.; ZIMMERMANN, F.J.P. Características físico-hídricas e químicas de um Latossolo após adubação e cultivos sucessivos de arroz e feijão, sob irrigação por aspersão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.18, p.533 - 539, 1994.
- THOMASSON, A.J. Towards an objective classification of soil structure. **Journal of Soil Science**, v.29, p.38-46, 1978.
- TORMENA, C.A. Resistência à penetração e porosidade em plantio direto influenciados por preparos pré-implantação e tráfego. Curitiba, 1991. 159p. Dissertação (Mestrado)-Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Paraná.
- UEHARA, G.; TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S. Spatial variability of soil properties. **Proceedings of a workshop of the ISSS and the SSSA**. Las Vegas, 1984.
- VAUCLIN, M.; VIEIRA, S.R.; BERNARD, R. ; HATFIELD, J.L. Spatial variability of surface temperature along two transects of a bare soil. **Water Resources Research**, v.18, p.1677-1686, 1982.

- VAUCLIN, M.; VIEIRA, S.R.; VAUCHAUD, R.; NIELSEN, D.R. The use of cokriging with limited field observations. **Soil Science Society of America Journal**, v. 47, p.175-184, 1983.
- VAZQUEZ, D.L., Soil compaction associated with tillage treatment for soybean. **Soil Tillage Research**, v.13, p.35-42, 1989.
- VIEIRA, S.R.; DE MARIA, I.C.; CASTRO, O.M. de; DECHEN, S.C.F.; LOMBARDI NETO, F. Utilização da análise de Fourier no estudo do efeito residual da adubação em uva, na crotalária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.11, p.7 -10, 1987.
- VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R. ; BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, v.51, n.3, p.1-75, 1983.
- VIEIRA, S.R.; LOMBARDI NETO, F.; BURROWS, I.T. Mapeamento da chuva máxima provável para o Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.15, n.11, p.93-98,1991
- VOORHEES, W.B.; NELSON, W.W. ; RANDALL, G.W. Extent and persistence of subsoil compaction caused by heavy axle loads. **Soil Science Society of America Journal**, v.50, p. 428 - 433, 1986.