

**VARIABILIDADE ESPACIAL DO  
COMPORTAMENTO COMPRESSIVO DE  
DOIS LATOSSOLOS SOB DIFERENTES USOS**

**IVONEY GONTIJO**

**2007**

**IVONEY GONTIJO**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DO COMPORTAMENTO  
COMPRESSIVO DE DOIS LATOSSOLOS SOB DIFERENTES USOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, para a obtenção do título de “Doutor”.

**Orientador**  
**Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Junior**

**LAVRAS**  
**MINAS GERAIS - BRASIL**  
**2007**

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

Gontijo, Ivoney.

Variabilidade espacial do comportamento compressivo de dois  
latossolos sob diferentes usos / Ivoney Gontijo. -- Lavras : UFLA, 2007.  
120 p. : il.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2007.

Orientador: Moacir de Souza Dias Junior.

Bibliografia.

1. Latossolo. 2. Compactação. 3. Tráfego. 4. Compressibilidade. 5.  
Cafê. 6. Variabilidade espacial. I. Universidade Federal de Lavras. II.  
Título.

CDD – 631.43

**IVONEY GONTIJO**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DO COMPORTAMENTO  
COMPRESSIVO DE DOIS LATOSSOLOS SOB DIFERENTES USOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, para a obtenção do título de “Doutor”.

APROVADA em 17 de agosto de 2007.

Professor Dr. Geraldo César de Oliveira - UFLA

Professor Dr. Luís Carlos Timm - UFPel

Professor Dr. Marcelo Silva de Oliveira - UFLA

Pesquisador Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães - EPAMIG

**Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Junior**  
UFLA  
(Orientador)

**LAVRAS  
MINAS GERAIS - BRASIL**

*Aos meus pais, Joaquim de Almeida Gontijo e Maria Conceição  
Porto Gontijo (in memoriam), pelo amor, educação,  
ensinamentos, caráter e exemplo de vida.*

OFEREÇO

*Aos meus irmãos Iris Afonsina Gontijo e Daniel  
Antônio Gontijo, pelo apoio, amizade e  
companheirismo ao longo de  
todos esses anos,*

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida.

A Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Departamento de Ciência do Solo, pela formação e pela oportunidade de crescimento profissional.

Ao Professor Dr. Moacir de Souza Dias Junior, pela orientação, amizade e acima de tudo pelo profissionalismo ao longo do curso.

Ao Dr. Paulo Gontijo, pela co-orientação, participação na banca e amizade.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos.

A EMBRAPA/CAFÉ, pelo apoio financeiro e estrutural para a realização da pesquisa.

Ao professor Dr. Geraldo César de Oliveira, pelos ensinamentos, amizade e apoio, por participar da banca examinadora e pelas críticas e sugestões apresentadas.

Ao professor Dr. Marcelo Silva de Oliveira, pelos ensinamentos, dedicação, apoio, por participar da banca examinadora e pelas críticas e sugestões apresentadas.

Ao professor Dr. Luís Carlos Timm, pela disponibilidade, participação na banca examinadora, críticas e sugestões.

A todos os professores do Departamento de Ciência do Solo, pelos conhecimentos transmitidos, especialmente ao Dr. Mozart Martins Ferreira e ao Dr. Nilton Curi.

Aos professores Dr. Elias Nascentes Borges e Dr. Gaspar Henrique Korndörfer pelo incentivo e ensinamentos proporcionados no início de minha vida acadêmica.

Ao Professor Dr. Donald Nielsen da Universidade da Califórnia, pela colaboração e sugestões na elaboração deste trabalho.

Ao Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues, pelo inestimável apoio e amizade que sempre demonstrou por mim e por muitos outros colegas.

A todos os funcionários do Departamento de Ciência do Solo que contribuíram para a realização deste trabalho, especialmente a Dulce Claret Monteiro Moraes e Delanne Ribeiro, pela amizade e dedicação ao trabalho.

Aos amigos Felipe Campos Figueiredo, André Nakatani e Iran Dias Borges, pelos vários anos de convivência e aprendizado.

A todos os colegas da pós-graduação, especialmente a Cezar Francisco, Gislene Aparecida, Bruno Pires, Arystides, Eduardo Nunes, Eduardo Severiano, Tiago, Ayodelle, Amanda, Krisle, Tais, Kátia, Gláucia, Meire, Adriana, Paula, Fabrício, Amauri e tantos outros pelos momentos especiais que vivemos.

A minha madrinha, Lázara e meus primos, Karla, João Batista e Eder, pelo apoio e amizade em todos os momentos.

Aos funcionários da EPAMIG de Patrocínio, MG, principalmente Lázaro, Jaime e César.

Aos grandes amigos que fiz na graduação com os quais aprendi muito, Lecio Pena, Ricardo Machado, Herbson Rocha, Adriano Maeda, Tatiana Lourenço, Juliano Vilela e Vitor Hugo Barbieri.

## SUMÁRIO

RESUMO GERAL .....	i
GENERAL ABSTRACT .....	ii
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	3
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	5
2.1 A CULTURA DO CAFEIEIRO .....	5
2.2 COMPACTAÇÃO DO SOLO .....	6
2.3 TEORIA GEOESTATÍSTICA .....	11
2.3.1 Semivariograma .....	13
2.3.2 Modelos de semivariograma e métodos de ajuste.....	16
2.3.3 Krigagem .....	19
2.3.4 Mapas de trafegabilidade .....	21
3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	23
CAPÍTULO 1: Planejamento amostral da pressão de preconsolidação de um Latossolo Vermelho distroférico .....	31
RESUMO.....	32
SUMMARY .....	33
INTRODUÇÃO.....	33
MATERIAL E MÉTODOS .....	35
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
CONCLUSÕES .....	48
LITERATURA CITADA .....	49
CAPÍTULO 2: Compressibilidade de um Latossolo Vermelho distrófico em diferentes locais na lavoura cafeeira .....	53



RESUMO.....	54
ABSTRACT .....	54
1 INTRODUÇÃO .....	56
2 MATERIAL E MÉTODOS .....	59
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
4 CONCLUSÕES .....	71
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72
CAPÍTULO 3: Spatial patterns of preconsolidation pressure and soil moisture content along transects in two directions under coffee plantation .....	76
ABSTRACT .....	77
RESUMO.....	77
1 INTRODUCTION .....	79
2 METHODS .....	81
3 RESULTS AND DISCUSSION .....	85
4 SUMMARY AND CONCLUSIONS.....	91
5 REFERENCES .....	92
CAPÍTULO 4: Comportamento espacial do processo compressivo de um latossolo em uma lavoura cafeeira.....	95
RESUMO.....	96
ABSTRACT .....	96
1 INTRODUÇÃO.....	98
2 MATERIAL E MÉTODOS .....	101
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	107

4 CONCLUSÕES .....	116
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117

## RESUMO GERAL

GONTIJO, Ivoney. **Variabilidade espacial do comportamento compressivo de dois latossolos sob diferentes usos**. 2007. 120 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. \*

O aumento na intensidade de tráfego na agricultura moderna tem trazido problemas quanto à preservação da estrutura do solo, principalmente quando realizado sob condições inadequadas de umidade, podendo ocasionar uma redução na produtividade das culturas. A pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) vem se destacando como uma metodologia capaz de prevenir a compactação adicional ao solo e relaciona a variação da capacidade de suporte de carga dos solos em função da variação da umidade. O objetivo deste estudo foi determinar a configuração e o número adequado de amostras para a determinação da  $\sigma_p$  em um solo sob plantio convencional, além de gerar mapas de trafegabilidade de um solo cultivado com cafeeiros. O experimento foi conduzido em duas partes, a primeira em um Latossolo Vermelho distroférico em Lavras (MG) e a segunda parte em um Latossolo Vermelho distrófico na região de Patrocínio (MG), ambos de textura muito argilosa. Foram coletadas amostras indeformadas na camada superficial e na profundidade de 10 – 13 cm, formando uma malha, analisando-se a variabilidade espacial da  $\sigma_p$  e umidade do solo por meio de semivariogramas. Para a obtenção dos modelos da  $\sigma_p$  versus umidade do solo, foram realizados ensaios de compressão uniaxial com as amostras indeformadas. Por meio da geoestatística, foram obtidos os semivariogramas experimentais, onde foram ajustados modelos teóricos, modelo esférico, a partir dos quais foram realizadas krigagens para a obtenção dos mapas de trafegabilidade. O estudo da variação espacial e de um esquema de amostragem representativo da capacidade de suporte de carga do solo em áreas intensamente mecanizadas possibilitará a minimização do impacto das atividades mecanizadas, com conseqüente redução de danos ambientais.

---

\* Comitê Orientador: Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Junior, DCS/UFLA (Orientador), Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães, CTSM/EPAMIG (Co-orientador), Prof. Dr. Marcelo Silva de Oliveira, DEX/UFLA (Co-orientador).

## GENERAL ABSTRACT

GONTIJO, Ivoney. **Spatial variability in compressive behavior in two latosols (Oxisols) under different uses.** 2007. 120 p. Thesis (Doctorate in Soil Science) – Federal University of Lavras, Lavras, Minas Gerais. Brazil. \*

The increase in the traffic intensity in modern agriculture has been causing problems as soil structure degradation, mainly when accomplished under inadequate moisture conditions, reducing the crop yield. The preconsolidation pressure ( $\sigma_p$ ) indicates a variation of the load support capacity of the soils as a function of soil water content variation. The objective of this study was to determine the layout and the number of samples required for the determination of  $\sigma_p$  under conventional tillage and to generate trafficability maps of a soil under coffee crop. The experiment was carried out in two parts, first part in Lavras under conventional tillage and the second part in Patrocínio under coffee crop, Minas Gerais State, Brazil. Both places located in a clayed Oxisol. Undisturbed soil samples were collected in superficial layer and 10 – 13 cm depth, forming a grid, where spatial variability of the  $\sigma_p$  and soil water content was analyzed through semivariograms. To obtain the models of  $\sigma_p$  as a function of the soil water content, uniaxial compression test soil in the undisturbed samples. Though the geostatistic, it was obtained the experimental semivariograms, where theoretical models were adjusted, spherical model, and krigings were made to obtaining the trafficability maps. The spatial variation study of the representative sampled scheme of the soil load support in intensive mechanized areas will minimize the mechanization impact, with consequent reduction of environmental damages.

---

\* Guidance Comittee: Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Junior, DCS/UFLA (Adviser), Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães, CTSM/EPAMIG (Co-adviser), Prof. Dr. Marcelo Silva de Oliveira, DEX/UFLA (Co-adviser)

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

O solo, como base da agricultura e sendo um recurso finito, deve ser preservado de modo que sua qualidade seja mantida e para que se torne possível a manutenção de níveis de produção satisfatórios por longos períodos. Com a crescente demanda por produtos agrícolas, há um incremento no uso de maquinário na agricultura, principalmente quando as condições de topográfica são favoráveis, como na região dos cerrados.

A condição favorável de relevo, associada a culturas que exigem grande demanda de trabalho mecanizado, como a cafeicultura, representa um cenário preocupante quanto à preservação da estrutura do solo. Lipiec & Hatano (2003) afirmam que o aumento do tamanho dos implementos agrícolas e a alta frequência de tráfego são causas importantes da indução da compactação e deterioração da estrutura do solo. Desse modo, é importante o desenvolvimento de metodologias que visem o controle e o monitoramento do processo de compactação do solo.

A pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ), que é definida como sendo a maior pressão que o solo já suportou no passado (Dias Junior & Pierce, 1996), é uma medida da capacidade de suporte de carga do solo. A  $\sigma_p$  é obtida a partir da curva de compressão do solo, que relaciona a densidade do solo com o logaritmo da pressão aplicada ao solo. A aplicação no solo de pressões menores do que a pressão de preconsolidação causa deformações elásticas, portanto recuperáveis, enquanto que a aplicação de pressões maiores causa deformações plásticas, não recuperáveis (Holtz & Kovacs, 1981). Essa propriedade tem sido utilizada por diversos autores como indicador de sustentabilidade da estrutura do solo em uma dada umidade e/ou potencial matricial (Kondo & Dias Junior, 1999; Imhoff et al., 2001; Silva et al., 2003; Oliveira et al., 2003; Dias Junior et al., 2005). No

entanto, são escassos os estudos que consideram a variabilidade espacial de tal atributo.

Com o conhecimento do comportamento espacial, utilizando-se ferramentas como a Geoestatística, é possível monitorar aspectos ligados à preservação da estrutura do solo, gerando mapas de distribuição espacial, conhecidos como mapas de trafegabilidade, possibilitando a otimização dos sistemas de produção agrícola.

Desse modo, os objetivos deste estudo foram: a) determinar a configuração e o número adequado de amostras para a determinação da  $\sigma_p$  em um Latossolo Vermelho distroférico, bem como caracterizar sua variabilidade e distribuição espacial, utilizando métodos da Estatística Clássica e da Geoestatística; b) estimar a capacidade de suporte de carga do solo em diferentes locais em uma lavoura cafeeira, bem como conhecer os efeitos do processo de compactação do solo na distribuição de poros e na retenção de água no solo; c) investigar o comportamento espacial da  $\sigma_p$  e umidade do solo em seis transectos: três ao longo das linhas de plantio e três através das linhas de plantio em locais com intensidade diferenciada de tráfego e d) caracterizar a variabilidade espacial da  $\sigma_p$  em diferentes locais na lavoura cafeeira, bem como a geração de mapas de trafegabilidade nas diferentes condições de tráfego

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 A cultura do cafeeiro

O café, que já representou 70% das receitas brasileiras com a exportação na década de 1950, atualmente, é a segunda “commodity” do mundo nas transações internacionais, perdendo somente para o petróleo. Produzido em 57 países, as receitas do café com as exportações mundiais somam US\$ 15 bilhões (Zafalon, 1998).

Atualmente, o Brasil é maior produtor e exportador mundial de café, com produção estimada de 42,5 milhões de sacas beneficiadas na safra 2006. Nesta mesma safra, o estado de Minas Gerais foi responsável por mais da metade da produção brasileira de café (50,9 %), apresentando uma área estimada em 1.129.000 ha destinados à lavoura cafeeira, tendo a área formada pelas regiões do Alto Paranaíba/Triângulo Mineiro/Noroeste contribuído com, aproximadamente, 177.000 ha de área destinada a essa cultura (Conab, 2007).

Nas regiões do Triângulo Mineiro e do Alto Paranaíba, a cafeicultura tem-se desenvolvido de forma acelerada em razão da alta tecnologia empregada. Juntamente com o avanço da cafeicultura no cerrado, há também um incremento no grau de mecanização em todas as suas etapas, desde a instalação da lavoura até a fase de colheita (Silva et al., 2006). Dentre as regiões produtoras de café em Minas Gerais, as regiões do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba se destacam pela maior utilização de máquinas agrícolas, devido, principalmente, à topografia favorável (Faemg, 1996), além de altos custos com mão-de-obra.

A mecanização excessiva aplicada aos solos da região dos cerrados tem comprometido suas propriedades físicas, tais como: densidade do solo, volume total de poros e macroporosidade (Guimarães, 2000). Essas características podem comprometer a sustentabilidade do ambiente agrícola devido à

ocorrência do fenômeno da compactação. Segundo Flowers & Lal (1998) o uso de máquinas agrícolas nas várias etapas do processo produtivo tem sido o principal responsável pela grande maioria do processo de compactação do solo, acarretando danos à sua estrutura, principalmente quando o solo é trafegado em condições inadequadas de umidade (Dias Junior & Pierce, 1996).

As alterações na estrutura do solo devido ao processo de compactação influenciam vários aspectos do solo, os quais refletem no desenvolvimento do sistema radicular das plantas (Lipiec & Hatano, 2003). Raízes que são submetidas a grandes resistências mecânicas do solo alongam-se menos, apresentam maior diâmetro e são bastante deformadas, pois a pressão de turgescência das células da região de alongamento das raízes não é suficiente para vencer a resistência mecânica oferecida pela matriz do solo (Rena & Guimarães, 2000). Assim, o processo de compactação do solo compromete as funções básicas do sistema radicular das plantas, como trocas gasosas e absorção de água e nutrientes, refletindo diretamente na produtividade da lavoura cafeeira e na sustentabilidade do sistema produtivo.

Assim, torna-se necessário o investimento em tecnologias que proporcionem melhorias à lavoura cafeeira no sentido de manter a qualidade física dos solos, possibilitando um bom desenvolvimento de raízes, resultando em um incremento na produção, aliado à diminuição de custos, tornando o processo de produção competitivo e sustentável.

## **2.2 Compactação do solo**

Para a obtenção de uma agricultura sustentável, em que se tenham níveis de produção satisfatórios por um longo período de tempo, sem comprometer a qualidade do meio ambiente, um dos fatores essenciais a ser observado é o solo. Portanto, manter a qualidade do solo é fator fundamental na busca de uma



agricultura moderna, competitiva e sustentável. A qualidade do solo deve ser observada sob uma visão holística, em que fatores físicos, químicos e biológicos interagem (Karlen et al., 2003), resultando em condições ideais para o crescimento e o desenvolvimento das plantas. A compactação do solo é um dos principais problemas em áreas intensamente mecanizadas, sendo um dos principais fatores de degradação da sua estrutura (Mosaddeghi et al., 2007), pois além dos aspectos físicos, pode afetar também propriedades ligadas aos fatores químicos e biológicos do solo (Barzegar et al., 2005).

Entende-se por compactação do solo o processo que descreve a diminuição de volume do solo não saturado resultante da expulsão de ar dos poros devido a uma carga aplicada (Gupta & Allmaras, 1987). Tal processo pode causar prejuízos ao solo quando essa carga aplicada é excessiva.

A mecanização utilizada na agricultura intensiva vem causando cada vez mais compactação no solo. Estima-se que aproximadamente 68 milhões de hectares em todo o mundo estejam em processo de degradação devido à compactação, sendo o tráfego de máquinas agrícolas responsável pela grande maioria das causas da compactação do solo na agricultura moderna (Flowers & Lal, 1998). Esse problema tende a se intensificar devido à tendência de aumento do tamanho e da potência dos implementos agrícolas, por permitir economia, trabalhar em larga escala, além de reduzir os custos de mão-de-obra (Yavuzcan et al. 2004).

O processo de compactação é influenciado por fatores externos e internos. Os fatores externos são caracterizados pelo tipo, intensidade e frequência de carga aplicada (Lebert & Horn, 1991; Alakukku et al., 2003), enquanto os fatores internos são influenciados pela história de tensão (Reinert, 1990; Dias Junior, 1994, Dias Junior & Pierce, 1996), umidade do solo (Dias Junior, 1994, Silva et al., 2000), textura do solo (Larson et al., 1980, McBride, 1989), estrutura do solo (Dexter & Tanner, 1974; Horn, 1988; Pagliai et al.,

2004; Boivin et al., 2005), densidade do solo inicial (Silva et al., 2000; Reinert, 1990) e teor de carbono do solo (Soane, 1990; Assouline et al., 1997; Etana et al., 1997).

Além de fatores, como altos valores de carga aplicada ao solo, número excessivo de passadas, as pressões inadequadas de inflação dos pneus e área de contato do pneu com o solo (Alakukku et al., 2003) também influenciam a pressão exercida sobre o solo, sendo caracterizadas como fatores externos no processo de compactação.

Estima-se que a pressão exercida pelos pneus de máquinas agrícolas se situam entre 100 a 200 kPa, enquanto que, para carretas agrícolas, dependendo da carga, podem exercer pressões de até 600 kPa (Carpenedo, 1994).

Dentre os fatores internos envolvidos com a capacidade de suporte de carga do solo, em uma mesma condição, a umidade é aquele que governa a quantidade de deformação que pode ocorrer no solo no momento da aplicação da pressão (Dias Junior & Pierce, 1996). Dessa forma, a água no solo forma uma película sobre as partículas sólidas do solo, atuando como um lubrificante, facilitando o deslocamento e o rearranjo das partículas nos vazios do solo (Silva et al., 2000). Desse modo, quando o solo está mais seco, sua capacidade de suporte de carga é maior, podendo suportar pressões sem que haja compactação adicional (Dias Junior, 1994).

A compactação do solo causa danos à sua estrutura, causando modificações em seus atributos físicos, como aumento da densidade e da resistência à penetração, diminuição da porosidade, modificações na continuidade dos poros e na relação entre macro e microporos (Flowers & Lal, 1998). Esse aumento do grau de compactação do solo está frequentemente associado com a diminuição da produtividade das lavouras e com a queda na qualidade ambiental (Lipiec et al., 1991). Lavouras que estão estabelecidas em solos compactados tendem a apresentar um sistema radicular superficial (Lipiec

et al., 1991), apresentando, conseqüentemente, uma restrição de ar e movimento de água, comprometendo a absorção de nutrientes, água e oxigênio pela planta.

Devido à importância e à complexidade do tema e sua interação com diversos fatores do solo, vários pesquisadores têm dado ênfase à modelagem matemática para previsão do fenômeno da compactação em solos (Dias Junior, 1994; Kondo & Dias Junior, 1999; Gysi, 2001; Defossez & Richard, 2002; Canillas & Salokhe, 2002; Assouline, 2002; Van den Akker, 2004). Um dos parâmetros dessa modelagem é a pressão de preconsolidação, que expressa a capacidade de suporte de carga dos solos parcialmente saturados (Dias Junior & Pierce, 1996).

A pressão de preconsolidação é obtida por meio da curva de compressão do solo (Figura 1) que representa graficamente a relação entre o logaritmo da pressão aplicada e a densidade do solo ou índice de vazios. A pressão de preconsolidação divide essa curva em duas partes, sendo uma região de deformações pequenas, elásticas e recuperáveis, chamada de curva de compressão secundária, e uma de deformações plásticas e não recuperáveis chamada de curva de compressão virgem (Dias Junior & Pierce, 1996). Assim, é na região da curva de compressão secundária que o solo deve ser trafegado e cultivado, sendo a pressão de preconsolidação a pressão máxima aplicada ao solo para que a compactação adicional seja evitada. Desse modo, a pressão de preconsolidação é um indicador quantitativo da sustentabilidade estrutural dos solos (Kondo & Dias Junior, 1999), podendo ser utilizado como parâmetro na avaliação da qualidade estrutural de solos agrícolas. Araujo Junior (2007), trabalhando com diferentes sistemas de controle de plantas daninhas em uma lavoura cafeeira, concluiu que a pressão de preconsolidação foi mais sensível em detectar as alterações estruturais no solo que a densidade do solo.

Uma possível aplicação do conhecimento da capacidade de suporte de carga, por meio da pressão de preconsolidação, é auxiliar na adequação futura de

máquinas e implementos agrícolas (Pytka & Dabrowski, 2001), uma vez que o tráfego de máquinas agrícolas é responsável pela maioria das causas da compactação do solo na agricultura moderna (Flowers & Lal, 1998).

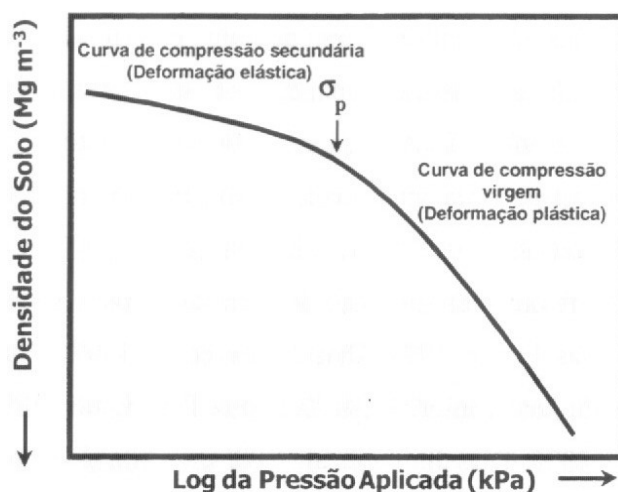


FIGURA 1 Curva de compressão do solo (Dias Junior, 1994).

Sabe-se que o manejo inadequado pode afetar a porosidade e a densidade do solo, além de provocar alterações na estrutura do solo que afetam a retenção de água e a resistência mecânica do solo (Silva et al., 1994). O processo da compactação do solo afeta a distribuição e a retenção de água no solo devido à diminuição do volume do solo, podendo ocorrer a compressão do espaço poroso, com alteração da estrutura do solo e, conseqüentemente, o decréscimo da porosidade, da macroporosidade, da disponibilidade de água e nutrientes e da difusão de gases no solo (Taylor & Brar, 1991), cujas relações com desenvolvimento das raízes são fundamentais.

A integração das informações de modelos que revelem a capacidade de suporte de carga com as curvas de retenção de água no solo permite um maior entendimento a respeito do efeito do tráfego sobre a distribuição do espaço poroso no solo. A determinação da curva de retenção da água no solo é parte fundamental da caracterização das propriedades hidráulicas do solo. Alguns modelos analíticos para predição da retenção de água no solo são utilizados, porém, o modelo de van Genuchten é preferido em relação ao demais (Assouline et al., 1997). Os efeitos do processo da compactação interferindo na distribuição do espaço poroso do solo já foram estudados por Starsev & McNabb (2001). Esses autores concluíram que o processo de compactação do solo não afetou significativamente a forma da curva de retenção de água no solo e a distribuição de poros no solo quando o solo apresentava umidades inferiores à umidade correspondente à capacidade de campo.

### **2.3 Teoria Geoestatística**

A literatura sobre experimentação agronômica enfatiza a necessidade de que as amostras sejam representativas de áreas homogêneas. A grande maioria dos modelos, teorias e recomendações ainda empregadas presume solos homogêneos e a amostragem em solos só considera a heterogeneidade em profundidade (Reichardt et al., 1986). Nielsen & Alemi (1989) comentam que o fato de as observações dentro e entre tratamentos não serem independentes entre si, em muitos casos, torna o desenho experimental inadequado, podendo comprometer os resultados de várias pesquisas. Assim, a amostragem clássica não leva em consideração a estrutura de dependência espacial, quando ela está presente na característica avaliada.

Devido às limitações da Estatística Clássica, torna-se necessário o uso de uma ferramenta que consiga detectar o grau de dependência entre as

amostras, levando em consideração as coordenadas geográficas de cada ponto. A teoria da Geoestatística pode ser empregada nesse caso, para descrever o padrão da variabilidade espacial do atributo medido.

A variabilidade espacial é uma preocupação antiga de pesquisadores, praticamente desde o início do século passado. Existem estudos realizados por volta de 1910 que relatam o uso de princípios da Geoestatística (Vieira, 2000). Entretanto, com o aparecimento da estatística proposta por Fisher (1956), baseado nos princípios da casualização e repetição, pesquisadores começaram a adotar o sistema de amostragem ao acaso, desprezando, assim, a localização do ponto amostrado. Esse procedimento, aliado à distribuição de frequência entre as amostras, foi e ainda é usado para assumir a independência entre as amostras (Vieira, 2000). Somente nas décadas de 1950 e 60, com o avanço da teoria de variáveis regionalizadas, como a Geoestatística, proposta por Matheron (1963), baseado em observações do engenheiro de minas sul-africano Krige sobre concentração de ouro na África do Sul, é que os cientistas começaram a perceber o potencial desse instrumento para o manuseio de dados quantitativos, facilitando a compreensão da variabilidade espacial no solo (Burrough et al., 1994).

Inicialmente, os princípios da Geoestatística tiveram suas aplicações em mineração (Clark, 1979), porém já existem vários estudos e aplicações abordando temas em Ciência do Solo e, mais especificamente, em física do solo, tais como densidade do solo (Cassel & Bauer, 1975; Libardi et al., 1986), infiltração de água no solo (Vieira et al., 1981; Hui et al., 1998; Bertolani & Vieira, 2001), temperatura do solo (Morkoc et al., 1985; Yates et al., 1988; Mohanty et al., 1995), resistência do solo à penetração (Silva et al., 1989; Utset & Cid, 2001) e, mais recentemente, pressão de preconsolidação (Kondo, 2003).

Para aplicações da Geoestatística em fenômenos físicos, são necessárias algumas pressuposições. Dentre elas, está a hipótese intrínseca que requer

apenas a existência de estacionaridade do variograma. Tal hipótese é a mais freqüentemente usada em Geoestatística por ser menos restritiva (Vieira, 2000). Uma variável regionalizada está embasada na hipótese intrínseca quando:

-existir a esperança matemática para a variável regionalizada e ela não depender da posição  $x$ ;

$$E[Z(x) - Z(x + h)] = 0 \quad \text{para todo } x$$

-para todo vetor  $h$ , a variância da diferença  $[Z(x)-Z(x+h)]$  é finita e independente da posição  $x$ , dependendo apenas do vetor  $h$ .

$$VAR[Z(x) - Z(x + h)] = E[Z(x) - Z(x + h)]^2 = 2\gamma(h)$$

### 2.3.1 Semivariograma

O semivariograma é uma das ferramentas da Geoestatística utilizada para determinar a variabilidade espacial de atributos do solo, expressando o grau de dependência espacial entre amostras, por meio de seus parâmetros (Bertolani et al., 2000). Os semivariogramas exigem que apenas a hipótese intrínseca seja satisfeita, sendo, portanto, menos restritiva, diferente do autocorrelograma que exige estacionaridade de segunda ordem (Berndtsson et al., 1993). Por esse motivo o semivariograma pode ser usado em um maior número de situações.

O semivariograma é um gráfico que representa a semivariância dos dados  $\gamma(h)$  em relação à distância correspondente que os separa ( $h$ ), podendo ser definido como (Vieira et al., 1983):

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

O qual pode se estimado por:

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

sendo:  $n(h)$  número de pares amostrais  $[z(x_i); z(x_i + h)]$  separados pelo vetor  $h$ , sendo  $z(x_i)$  e  $z(x_i + h)$ , valores numéricos observados do atributo analisado, para dois pontos  $x_i$  e  $x_i + h$  separados pelo vetor  $h$ .

Normalmente, o conjunto de pontos amostrais se comporta como, intuitivamente, se deve esperar de dados de campo, ou seja, que as diferenças  $[z(x_i) - z(x_i + h)]$  aumentem à medida que  $h$ , a distância que os separa, aumente.

O princípio fundamental da Geoestatística é a esperança de que, na média, as amostras próximas no tempo e no espaço sejam mais similares entre si do que as que estiverem distantes, representando um padrão de continuidade espacial (Isaaks & Srivastava, 1989).

O semivariograma é representado pelo gráfico da semivariância  $\gamma(h)$  versus  $h$  (Figura 2) e, normalmente, à medida que  $h$  aumenta,  $\gamma(h)$  também aumenta até determinado valor. O semivariograma é composto de três regiões, de acordo com a figura 2: i) efeito pepita ( $C_0$ ), que é a interceptação do semivariograma com o eixo das ordenadas e indica a variação ao acaso ou erros na obtenção dos dados; ii) o patamar ( $C_0+C$ ), que é a estabilização dos valores do semivariograma, que é aproximadamente igual à variância dos dados, composto pelo efeito pepita e componente estrutural ( $C$ ), que é a parte da variação que é explicada pela continuidade espacial e, iii) o alcance ( $a$ ), que é a distância onde o semivariograma alcança o patamar. O alcance indica a distância limite entre pontos correlacionados entre si. Pontos localizados a distâncias maiores que o alcance são independentes, não existindo restrições quanto ao uso



da Estatística Clássica. Portanto, o alcance é a divisória para a aplicação de Geoestatística ou Estatística Clássica (Vieira, 2000).

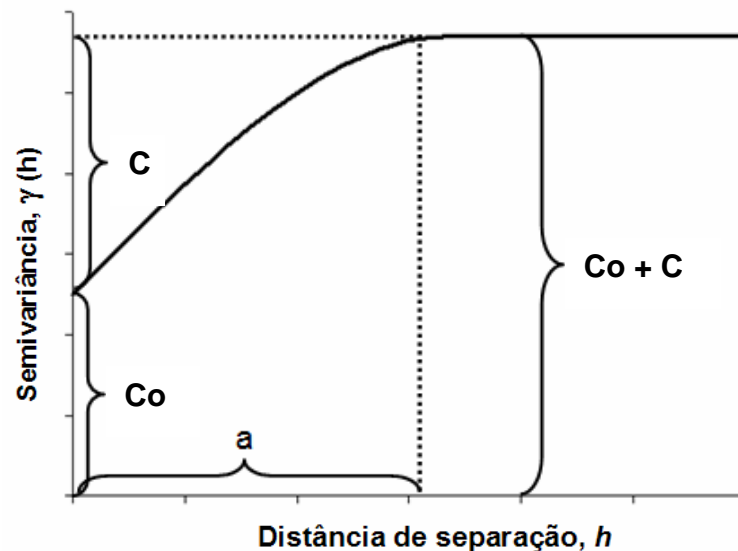


FIGURA 2 Semivariograma e seus componentes.

Os componentes efeito pepita ( $C_0$ ) e patamar ( $C_0+C$ ) são utilizados para determinar o grau de dependência espacial (GD), conforme equação (Cambardella et al., 1994):

$$GD = \frac{C_0}{C_0 + C} 100$$

Atributos que apresentam semivariogramas que, com grau de dependência espacial menor ou igual a 25%, têm forte dependência espacial. A dependência é moderada quando esta relação variar de 25% a 75% e fraca quando esse valor for superior a 75%.

O semivariograma é uma função do vetor  $h$  e, portanto, depende de sua direção e magnitude. Dependendo do comportamento do gráfico do semivariograma em diferentes direções, ele pode ser chamado de isotrópico ou anisotrópico (Vieira, 2000).

A anisotropia refere-se à existência de uma direção privilegiada ao longo da qual os valores da variável regionalizada não variam de forma significativa. Segundo Vieira (2000), a maioria das variáveis em Ciência do Solo pode ter um comportamento anisotrópico, aconselhando-se examinar semivariogramas para várias direções, tais como:  $0^\circ$  na direção das abscissas,  $90^\circ$  na direção das ordenadas e  $45^\circ$  e  $135^\circ$  nas duas diagonais. No entanto, o semivariograma pode não depender da direção, apresentando o mesmo comportamento nas diferentes direções. Nesse caso, diz-se que o fenômeno regionalizado é isotrópico. De qualquer maneira, é sempre aconselhável examinar os semivariogramas para várias direções, antes de tomar decisões.

### **2.3.2 Modelos de semivariograma e métodos de ajuste**

Existem vários modelos de ajuste possíveis de serem aplicados a diferentes fenômenos com continuidade espacial. Estes modelos, chamados de modelos teóricos, devem fornecer soluções estáveis para o estimador no processo de krigagem, pois todos os cálculos de Geoestatística dependem do modelo e de suas características para cada distância especificada. Desse modo, formas corretas e eficientes de estimar tais modelos são fundamentais. O ajuste de um modelo teórico ao semivariograma experimental é um dos aspectos mais importantes das aplicações da Teoria das Variáveis Regionalizadas e pode ser uma das maiores fontes de ambigüidade e polêmica nessas aplicações (Vieira et al., 1981), portanto, se torna importante a aplicação de metodologias que estimem o modelos que representem a continuidade espacial de modo confiável.

Escolher um modelo de semivariograma apropriado não é um procedimento automático. Requer um bom julgamento baseado na experiência e uma compreensão das limitações matemáticas da função (McBratney & Webster, 1986).

De fato, o que se espera é que o ajuste do semivariograma seja eficiente especialmente para pequenas distâncias, flutuações no semivariograma a grandes distâncias de  $h$  não constituem um problema sério, dado que os resultados de krigagem são pouco sensíveis a valores a grandes distâncias (Ribeiro Junior, 1995). Vieira (2000) enfatiza que quanto mais simples puder ser o modelo ajustado melhor e não se deve dar importância excessiva a pequenas flutuações que podem ser artifícios referentes a um pequeno número de dados.

O método de ajuste de modelos variográficos mais tradicional é o chamado ajuste “a sentimento”. Uma vez obtido o semivariograma experimental, este serve de indicação visual sobre a forma e os parâmetros do modelo a ser adotado (Ribeiro Júnior, 1995), pois, de forma simples, o que se procura é ajustar o modelo de modo que ele fique o mais próximo possível dos pontos do semivariograma experimental. Clark (1979) adota procedimento “a sentimento” para ajuste de modelos teóricos, porém, literatura mais recente como Isaaks & Srisvastava (1989) relatam outras formas de ajuste. Com o conhecimento de equações matemáticas mais complexas e o avanço dos recursos computacionais, há uma tendência que o método de ajuste “a sentimento” seja cada vez menos utilizado (Ribeiro Júnior, 1995).

Para comparação dos métodos e parâmetros ajustados nos modelos, pode-se utilizar o procedimento de autovalidação comumente chamado de “jack-knifing”, que consiste em retirar, individualmente, cada ponto conhecido e o seu valor é estimado por meio da krigagem, utilizando o semivariograma modelado, como se ele nunca existisse.

Em Vieira (2000) encontram-se os principais modelos para o ajuste do semivariograma, os quais são representados graficamente na figura 3:

modelo linear com patamar

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + b h & 0 < h < a \\ C_0 + C & h \geq a \end{cases}$$

modelo esférico

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C [1,5 (h/a) - 0,5 (h^3/a^3)] & 0 < h < a \\ C_0 + C & h \geq a \end{cases}$$

modelo exponencial

$$\gamma(h) = C_0 + C [1 - \exp(-3h/a)] \quad 0 < h < d$$

Nesse modelo e no modelo gaussiano,  $d$  é a distância máxima na qual o semivariograma é definido e, nesses modelos, o patamar “ $a$ ” é atingido apenas assintoticamente. O parâmetro “ $a$ ” é determinado visualmente como a distância após a qual o semivariograma se estabiliza.

modelo gaussiano

$$\gamma(h) = C_0 + C [1 - \exp(-3h^2/a^2)] \quad 0 \leq h \leq d$$

modelo sem patamar

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

Os parâmetros “b” e “B” são constantes que definem o modelo, tendo “B” que ser estritamente maior que zero e menor que dois para garantir a condição de positividade definida condicional e “b” representa a inclinação da reta no semivariograma.

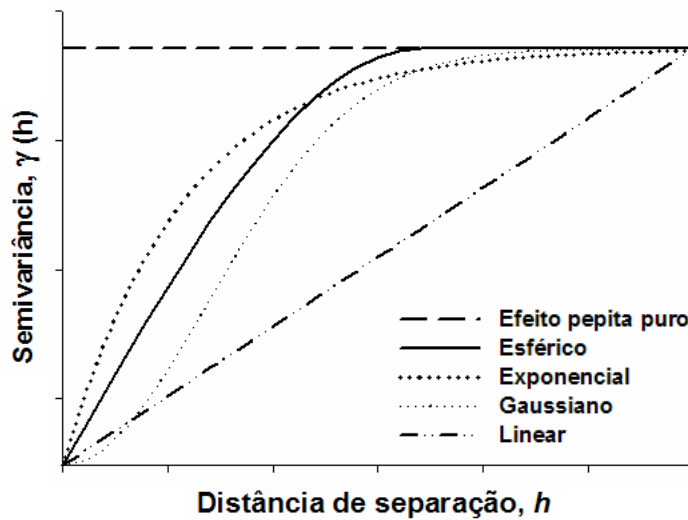


FIGURA 3 Modelos de semivariograma.

### 2.3.3 Krigagem

O termo “krigagem” foi usado por Matheron, em 1965, em homenagem ao engenheiro de minas sul-africano Daniel G. Krige, que primeiro formulou e implementou essa forma de interpolação, em 1951. A krigagem, diferente de outros métodos tradicionais, leva em conta a minimização da variância do erro esperado, por meio de um modelo empírico da continuidade espacial existente ou do grau de dependência espacial com a distância ou direção, isto é, por meio do modelo ajustado no semivariograma. Além de ser um estimador não tendencioso, a krigagem é um interpolador exato, isto é, se o ponto a ser

estimado coincidir com um dos pontos amostrados, o valor estimado deverá ser igual ao valor amostrado (Zimback, 2003).

O inverso do quadrado da distância e a krigagem são técnicas de interpolação comumente usadas na agricultura (Mello et al., 2003). Ambos os métodos estimam valores de locais não amostrados baseados na medição de locais vizinhos com pesos determinados para cada medição. A ponderação do inverso do quadrado da distância é de mais fácil realização, enquanto a krigagem consome mais tempo e é de mais difícil aplicação. Contudo, a krigagem faz uma descrição mais acurada da estrutura espacial dos dados e produz valiosa informação sobre a distribuição da estimação do erro. A maior vantagem do processo de krigagem sobre os outros métodos de interpolação é a de que a variância de estimação pode ser estimada. Assim, os valores interpolados podem ser usados com confiança conhecida (Vieira et al., 1981).

A exatidão desses dois processos tem sido comparada em numerosos estudos. Mello et al. (2003), comparando os métodos da krigagem e do inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas, constataram que ambos os métodos apresentaram boa precisão, mas a krigagem produziu menores erros, sendo considerado o método mais adequado.

A maneira como é feita a coleta de amostras e a sua representatividade determinam como deverá ser calculada a krigagem ordinária, se será pontual ou em bloco. A krigagem pontual é indicada quando a coleta é de amostras simples, isto é, não foram misturadas várias amostras para compor uma amostra composta (Zimback, 2003). Já a krigagem em blocos envolve estimativas de valores da variável regionalizada para uma subárea total, sendo apropriada para situações em que a informação média é mais útil do que o valor exato no ponto (Burgess & Webster, 1980).

O estimador da krigagem segue a mesma forma de praticamente todos os métodos de interpolação, porém, na krigagem, os pesos são variáveis de

acordo com a variabilidade espacial expressa pelo semivariograma. Esse estimador nada mais é que uma média móvel ponderada, o que torna a krigagem um interpolador ótimo (Vieira, 2000). A estimativa pontual é obtida pela seguinte expressão:

$$Z(x_o) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i)$$

em que  $N$  é o número de valores medidos,  $z(x_i)$ , envolvidos na estimativa, e  $\lambda_i$  são os pesos associados a cada valor medido,  $z(x_i)$ .

#### **2.3.4 Mapas de trafegabilidade**

Estudos que abordam a capacidade de suporte de carga associada a trabalhos que levem em consideração as coordenadas geográficas dos pontos e a continuidade espacial, como a variabilidade espacial, são fundamentais na adoção de mapas de trafegabilidade. Esses mapas podem auxiliar no manejo adequado do solo, possibilitando a tomada de decisão sobre onde e quando trafegar sem causar compactação adicional ao solo, sendo, portanto, uma ferramenta com grande potencial na busca do manejo sustentável do solo. A adoção da variabilidade espacial no estudo da compactação do solo gerando mapas de trafegabilidade já foi abordada por alguns autores como perspectiva de estudos futuros (Dias Junior & Pierce, 1996; Defossez & Richard, 2002; Kondo 2003), podendo ser integrado como parte de um sistema completo no processo da agricultura de precisão.

A agricultura de precisão é o gerenciamento do processo de produção levando em consideração sua variabilidade e objetiva correlacionar causas e efeitos a partir de séries históricas de dados e de sua distribuição espacial

(Carvalho & Silveira, 2001). Seu conceito abrange o uso de informações sobre a variabilidade de propriedades locais e climáticas de uma área, visando ao aumento da produtividade, otimizando o uso dos recursos e à redução do impacto da agricultura ao meio ambiente (Corá et al., 2004). O avanço dessa técnica está relacionado à aplicação de taxas variáveis de insumos no solo, de acordo com sua variabilidade espacial. Contudo, sistemas baseados apenas em atributos químicos do solo podem não ter resultado satisfatório, caso os fatores limitantes sejam os físicos (Marques Júnior & Corá, 1998).

O mapeamento de atributos relacionados com a resistência do solo à penetração e a capacidade de suporte de carga já são objeto de estudo, visando à preservação da estrutura do solo. Sirjacobs et al. (2002), trabalhando com mapeamento da resistência mecânica do solo, concluíram que os resultados foram promissores para implantação da agricultura de precisão. No Brasil, pela primeira vez, Kondo (2003) monitorou a variação da pressão de preconsolidação em lavoura de café em função da umidade do solo, gerando mapas de trafegabilidade. O autor concluiu que é possível a obtenção de mapas de trafegabilidade e sua utilização na previsão da distribuição da capacidade de suporte de carga em áreas cultivadas com cafeeiro. O conhecimento de propriedades do solo e, especialmente, da capacidade de suporte de carga, é um aspecto importante na agricultura de precisão, na confecção de mapas de isolinhas, dando suporte à tomada de decisão no manejo do solo e adequação do maquinário para cada situação específica.



### 3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAKUKKU, L.; WEISSKOPF, P.; CHAMEN, W. C. T.; TIJINK, F. G. J.; van der LINDEN, J. P.; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part1. Machine/soil interactions. **Soil & Tillage Research**, v.73, n. 1/2, p. 145-160, Oct. 2003.

ARAUJO JUNIOR, C. F. **Modelos da capacidade de suporte de carga de um Latossolo submetido a diferentes sistemas de manejo de plantas daninhas em lavoura cafeeira**. 2007. 132 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

ASSOULINE, S. Modeling soil compaction under uniaxial compression. **Soil Science Society of America Journal**, v.66 p.1784-1787, 2002.

ASSOULINE, S.; TAVARES-FILHO, J.; TESSIER, D. Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties: experimental results and modeling. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, n.2, p. 390-398, Mar./Apr. 1997.

BARZEGAR, A. R.; NADIAN, H.; HEIDARI, F.; HERBERT, S. J.; HASHEMI, A. M. Interaction of soil compaction, phosphorus and zinc on clover growth and accumulation of phosphorus. **Soil & Tillage Research**, v. 87, n. 2, p. 155-162, June 2006.

BERNDTSSON, R.; BAHRI, A.; JINNO, K. Spatial dependence of geochemical elements in a semiarid agricultural field: II. Geostatistical Properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, p. 1323-1329, Sep./Oct. 1993.

BERTOLANI, F. C.; GONZÁLEZ, A. P.; LIÑARES, M. L.; VÁZQUEZ, E. V.; MIRANDA, J. G. V. Variabilidade espacial da rugosidade superficial do solo medida com rugosímetros de agulhas e laser. **Bragantia**, v. 59, n. 2, p. 227-234, 2000.

BERTOLANI, F. C.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial da taxa de infiltração de água e da espessura do horizonte A, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 987-995, 2001.

BOIVIN, P.; SCHAFFER, B.; TEMGOUA, E.; GRATIER, M.; STEINMAN, G. Assessment of soil compaction using soil shrinkage modeling: Experimental

data and perspectives. **Soil & Tillage Research**, v. 88, n. 1/2, p. 65-79, July 2006.

BURGESS, T. M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I: The semivariogram and punctual kriging. **Journal of Soil Science**, v. 33, p. 315-331, 1980.

BURROUGH, P. A.; BOUMA, J.; YATES, S. R. The state of the art in pedometrics. **Geoderma**, v. 62 p. 311-326, 1994.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, Sep./Oct. 1994.

CANILLAS, E. C.; SALOKHE, V. M. A decision support system for compaction assessment in agricultural soils. **Soil & Tillage Research**, v. 65, n. 2, p. 221-230, May 2002.

CARPENEDO, V. **Compressibilidade de solos em sistemas de manejo**. 1994. 106 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M. Associação das técnicas multivariada e geoestatística na estimativa e interpretação de mapas de produção. **Embrapa Informática Agropecuária**, 2001. 41p.

CASSEL, D. K.; BAUER, A. Spatial variability in soils below depth of tillage: bulk density and fifteen atmosphere percentage. **Soil Science Society of America Journal**, v. 39, p. 245-250, 1975.

CLARK, I. **Practical geostatistics**. London: Applied Science, 1979. 128p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Segunda previsão de safra de café 2006/2007**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conabweb/>>. Acesso em: 16 de março de 2007.

CORÁ, J. E.; ARAUJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28 p. 1013-1021, 2004.

DEFOSSEZ, P.; RICHARD, G. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. **Soil & Tillage Research**, v. 67 p. 41-64, 2002.

DEXTER, A. R.; TANNER, D. W. Time dependence of compressibility for remolded and undisturbed soils. **Journal of Soil Science**, v. 25, p. 153-164, 1974.

DIAS JUNIOR, M. S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114 p. Dissertation (Ph.D.) - Michigan State University, East Lansing.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, J. F. O processo de compactação do solo e sua modelagem: revisão de literatura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 175-182, 1996.

DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P.; LASMAR JÚNIOR, E.; ARAUJO JUNIOR, C. F. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to *Eucalyptus* harvest operations. **Scientia Agricola**, v. 62, p. 248-255, 2005.

ETANA, A.; COMIA, R. A.; HAKANSON, I. Effects of uniaxial stress on the physical properties of four Swedish soils. **Soil & Tillage Research**, v. 44, p. 13-21, 1997.

FEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO ESTADO DE MINAS GERAIS - FAEMG. **Diagnóstico da cafeicultura em Minas Gerais**. Belo Horizonte, 1996. 52 p.

FISHER, R. A. **Statistical methods and scientific inference**. Edinburg, Oliver & Boyd, 1956. 175 p.

FLOWERS, M. D.; LAL, R. Axle load tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. **Soil & Tillage Research**, v. 48, p. 21-35, 1998.

GUIMARÃES, E. C. **Variabilidade espacial de atributos de um Latossolo Vermelho Escuro textura argilosa da região do cerrado, submetido ao plantio direto e ao plantio convencional**. 2000, 85 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

GUPTA, S. C.; ALLMARAS, R. R. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, v. 6 p. 65-100, 1987.

GYSI, M. Compaction of a Eutric Cambisol under heavy wheel traffic in Switzerland: field data and a critical state soil mechanics model approach. **Soil & Tillage Research**, v. 61 p. 133-142, 2001.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An introduction to geotechnical engineering**. New Jersey, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1981. 733 p.

HORN, R. Compressibility of arable land. In: DRESCHER, J.; HORN, R.; De BOODT, M. (Ed.). **Impact of water and external forces on soil structure**. Cremlingen-Destedt, Germany: Catena Verlag, 1988. p. 53-71.

HUI, S.; WENDROTH, O.; PARLANGE, M. B.; NIELSEN, D. R. Soil variability-infiltration relationships of agroecosystems. **Journal of Balkan Ecology**, v. 1, n. 2, p. 21-40, 1998.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; DIAS JUNIOR, M. S.; TORMENA, C. A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 11-18, 2001.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University, 1989. 600p.

KARLEN, D. L.; DITZLER, C. A.; ANDREWS, S. S. Soil quality: why and how? **Geoderma**, v. 114, p.145-156, 2003.

KONDO, M. K. **Variabilidade espacial do comportamento compressivo do solo e mapas de trafegabilidade na cultura do cafeeiro irrigado**. 2003, 166p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 211-218, 1999.

LARSON, W. E.; GUPTA, S. C.; USECHE, R. A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 450-457, 1980.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil & Tillage Research**, v. 19, p. 275-286, 1991.

LIBARDI, P. L.; PREVEDELLO, C. L.; PAULETTO, E. A.; MORAES, S. O. Variabilidade espacial da umidade e densidade de partículas ao longo de uma transeção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 10, p. 85-90, 1986.

LIPIEC, J.; HAKANSSON, I.; TARKIEWICZ, S.; KOSSOWSKI, J. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. **Soil & Tillage Research**, v. 19, p. 307-317, 1991.

LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. **Geoderma**, 116:107-136, 2003.

MARQUES JÚNIOR, J.; CORÁ, J. E. Atributos do solo para agricultura de precisão. In: SILVA, F. M. da; BORGES, P. H. de M. **Mecanização e agricultura de precisão**. Lavras: UFLA/SBEA, 1998. p. 31-70.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Econ. Geol.**, v. 58, p. 1246-1266, 1963.

McBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, v. 37, p. 617-639, 1986.

McBRIDE, R. A. Estimation of density-moisture-stress function from uniaxial compression on unsaturated structured soils. **Soil & Tillage Research**, v. 13 p. 383-397, 1989.

MELLO, C. R.; LIMA, J. M.; SILVA, A. M.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, M. S. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 925-933, 2003.

MOHANTY, B. P.; KLITTICH, W. M.; HORTON, R.; van GENUCHTEN, M. T. Spatio-temporal variability of soil temperature within three land areas exposed to different tillage systems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 59, p. 752-759, 1995.

MORKOC, F.; BIGGAR, J. W.; MILLAR, R. J.; NIELSEN, D. R. Statistical analysis of sorghum yield: a stochastic approach. **Soil Science Society of America Journal**, p. 49, p. 1342-1348, 1985.

MOSADDEGHI, M. R.; KOOLEN, A. J.; HEMMAT, A.; HAJABBASI, M. A.; LERINK, P. Comparisons of different procedures of pre-compaction stress

determination on weakly structured soils. **Journal of Terramechanics**, v. 44, p. 53-63, 2007.

NIELSEN, D. R.; ALEMI, M. H. Statistical opportunities for analyzing spatial and temporal heterogeneity of field soils. **Plant and Soil**, v. 115, p. 285-296, 1989.

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI, N., RESCK, D. V. S. Compressibilidade de um latossolo vermelho argiloso de acordo com a tensão de água no solo, uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 773-781, 2003.

PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Soil structure and the effect of management practices. **Soil & Tillage Research**, v. 79, p. 131-143, 2004.

PYTKA, J.; DABROWSKI, J. Determination of the stress-strain relationship for sandy soil in field experiments. **Journal of Terramechanics**, v. 38, p. 185-200, 2001.

REICHARDT, K.; VIEIRA, S. R.; LIBARDI, P. L. Variabilidade espacial de solos e experimentação de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 10, p. 1-6, 1986.

REINERT, D. J. **Soil structural form and stability induced by tillage in a typic hapludalf**. 1990. 129 p. Dissertation (Ph. D.) - Michigan State University, East Lansing.

RENA, A. B.; GUIMARÃES, P. T. G. **Sistema radicular do cafeeiro: estrutura, distribuição, atividade e fatores que o influenciam**. Belo Horizonte: EPAMIG, 2000. 80p. (EPAMIG. Série Documentos, 37).

RIBEIRO JÚNIOR, P. J. **Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo**. 1995. 99 p. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agronômica) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, p. 1775-1781, 1994.

SILVA, R. B.; DIAS JUNIOR, M. S.; SILVA, F. A. M.; FOLE, S. M. O. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de

um Latossolo dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 211-218, 2003.

SILVA, A. R.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; ARAUJO JUNIOR, C. F. Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 207-216, 2006.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 13, p. 1-5, 1989.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedoura em dois sistemas de manejo do solo. **Ciência Rural**, v. 30, p. 795-801, 2000.

SIRJACOBS, D.; HANQUET, B.; LEBEAU, F.; DESTAIN, M. F. On-line mechanical resistance mapping and correlation with soil physical properties for precision agriculture. **Soil & Tillage Research**, v. 64, p. 231-242, 2002.

SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. **Soil & Tillage Research**, v. 16, p. 179-201, 1990.

STARTSEV, A. D.; McNABB, D. H. Skidder traffic effects on water retention, pore-size distribution, and van Genuchten Parameters of Boreal forest soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p. 224-231, 2001.

TAYLOR, H. M.; BRAR, G. S. Effects of soil compaction on root development. **Soil & Tillage Research**, v. 19, p. 111-119, 1991.

UTSET, A.; CID, G. Soil penetrometer resistance spatial variability in a Ferralsol at several soil moisture conditions. **Soil & Tillage Research**, v. 61, p. 193-202, 2001.

Van den AKKER, J. J. H. Socomo: a soil compaction model to calculate soil stresses and the subsoil carrying capacity. **Soil & Tillage Research**, v. 79, p. 113-127, 2004.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade especial do solo. In: NOVAIS, P. F.; ALVARES, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1. p. 1-54.

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, p. 1-15, 1983.

VIEIRA, S. R.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal**, v. 45, p. 1040-1048, 1981.

YATES, S. R.; WARRICK, A. W.; MATTHIAS, A. D.; MUSIL, S. Spatial variability of remotely sensed surface temperatures at field scale. **Soil Science Society of America Journal**, v. 52, p. 40-45, 1988.

YAVUZCAN, H. G.; MATTHIES, D.; AUERNHAMMER, H. Vulnerability of Bavarian silt loam soil to compaction under heavy wheel traffic: impacts of tillage method and soil water content. **Soil & Tillage Research**, v. 84, n. 2, p. 200-215, 2005.

ZAFALON, M. Cafeicultura quer voltar aos bons tempos. **Folha de São Paulo**, Caderno Dinheiro, p.12, 1998.

ZIMBACK, C. R. L. **Geostatística**. Botucatu: Universidade Estadual Paulista. Grupo de Estudos e Pesquisas Agrárias Georreferenciadas, 2003. p. 1-25.



## **CAPÍTULO 1**

### **PLANEJAMENTO AMOSTRAL DA PRESSÃO DE PRECONSOLIDAÇÃO DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRICO**

*(Preparado de acordo com as normas da Revista Brasileira de Ciência do Solo)*

## RESUMO

Atualmente, a pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) tem sido utilizada como uma ferramenta no estudo do processo de compactação do solo. Este trabalho foi realizado com o objetivo de determinar a configuração e o número adequado de amostras para a determinação da  $\sigma_p$  em um Latossolo Vermelho distroférico, bem como caracterizar sua variabilidade e distribuição espacial, utilizando métodos da Estatística Clássica e da Geoestatística. O estudo foi conduzido em uma área experimental, no município de Lavras MG, sob plantio convencional nos últimos 30 anos, no qual são realizadas anualmente 1 aração e 2 gradagens. A área experimental possui dimensões de 32 x 160 m (5.120 m<sup>2</sup>), com 68 pontos distanciados a 10 m no eixo X e a 8 m no eixo Y, mais seis transectos, sendo quatro com pontos distanciados de 2 m e dois transectos com pontos distanciados de 1 m, visando detectar variações a pequenas distâncias. Foram coletadas 98 amostras indeformadas na profundidade de 0-3 cm, as quais foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial para a obtenção das  $\sigma_p$ . Por meio dos parâmetros da Estatística Clássica, determinou-se o número adequado de amostras para determinar a  $\sigma_p$ , que foi igual a 10 pontos. A maior variabilidade foi obtida para a  $\sigma_p$  (CV 14,8 %) e a menor para a umidade do solo (CV 12,0 %). Ambas as variáveis apresentaram distribuição normal, com modelo esférico ajustado e uma moderada estrutura de dependência espacial, com alcances de 19,5 e 90,0 m, respectivamente. Para futuras amostragens para determinação da  $\sigma_p$ , em condições similares às da área estudada, sugere-se dispor os pontos de coleta com intervalo igual ao alcance de dependência espacial, visando associar menor esforço de amostragem com maior representatividade da área. Apesar da razão de dependência espacial encontrada para as variáveis estudadas ter sido moderada, seu alcance deve ser considerado no planejamento de novas amostragens. A declividade do solo influenciou indiretamente os valores de  $\sigma_p$ . O mapeamento da área permitiu observar zonas de maior e menor susceptibilidade à compactação, possibilitando a tomada de decisão sobre onde começar a trafegar evitando danos à estrutura do solo.

**Termos de indexação:** compactação do solo, Geoestatística, amostragem de solo.

**SUMMARY:** *THE PRECONSOLIDATION PRESSURE SAMPLING PLANNING OF A RED LATOSOL, USING GEOSTATISTICS TECHNIQUES*

*Nowadays the preconsolidation pressure has been used as a tool in the study of the soil compaction process. The objective of this work was to determine the layout and the number of samples required for the determination of preconsolidation pressure ( $\sigma_p$ ) in a Red Latosol, as well as to characterize its variability and its spatial distribution using Classical Statistics and the Geostatistics parameters. The study was carried out in an experimental farm area, in Lavras, Minas Gerais State, Brazil, submitted to conventional tillage in the last 30 years. The experimental area was 32 x 160 m (5120 m<sup>2</sup>) divided into regular mesh. Samples were collected at 68 regular grid points distanced of 10 X 8 m. Six transects were chosen: four transects with 4 points and two transects with 8 points were sampled to detect variation at short distances. Ninety eight samples were collected at 0-3 cm depth, the samples were submitted to the uniaxial compression test for obtaining the  $\sigma_p$  at field conditions. Using Classical Statistics parameters, it was established that appropriate number of points for determination of the  $\sigma_p$ , it was 10 points. The highest variability was obtained for  $\sigma_p$  (CV 14.8 %) and the lowest was obtained for water content (CV 12.0 %). In both cases, the soil parameters were normally distributed, and the semivariograms were well described by spherical models, presenting a moderate spatial structure, with spatial ranges of 19.5 and 90.0 m, respectively. For future samplings for  $\sigma_p$ , in similar conditions to the studied area, it is suggested that sample should be collected at least at the spatial range, resulting in lower sampling effort and greater representativeness. The preconsolidation distribution map was constructed for the area, which allows the identification of regions with high and low compaction susceptibility. It also allowed to note that the field slope influenced the  $\sigma_p$  values. These results will be useful in making realistic decisions about where to begin to traffic machines on the soil, without causing additional problems to the soil structure.*

*Index terms: soil compaction, classical statistics, soil sampling.*

## **INTRODUÇÃO**

Atualmente, um dos problemas que mais limitam a produção agrícola e a qualidade do ambiente em áreas intensamente mecanizadas é a compactação do solo. Assim, é necessário o conhecimento dos efeitos da compactação do solo

para identificar estratégias de prevenção, com a finalidade de estabelecer metodologias para a correta quantificação dos impactos causados em áreas agrícolas.

A pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) é definida como sendo a maior pressão que o solo já suportou no passado (Dias Junior & Pierce, 1996) e é uma medida da capacidade de suporte de carga do solo. A  $\sigma_p$  é obtida a partir da curva de compressão do solo, que relaciona a densidade do solo (ou índice de vazios) com o logaritmo da pressão aplicada ao solo. A aplicação no solo de pressões menores do que a pressão de preconsolidação causa deformações elásticas, portanto, recuperáveis, enquanto que a aplicação de pressões maiores causa deformações plásticas, não recuperáveis (Holtz & Kovacs, 1981). Essa propriedade tem sido utilizada por diversos autores como indicador de sustentabilidade da estrutura do solo em uma dada umidade e/ou potencial matricial (Kondo & Dias Junior, 1999; Imhoff et al., 2001; Silva et al., 2003; Oliveira et al., 2003; Dias Junior et al., 2005). No entanto, são escassos os estudos que consideram a variabilidade espacial de tal atributo.

Assim, torna-se necessário um planejamento de amostragem eficiente e representativo para a  $\sigma_p$ , no qual se leve em consideração sua estrutura de dependência espacial. A estimativa do número adequado de amostras dos diversos atributos do solo, utilizando a Geoestatística como ferramenta de decisão, já foi abordada em alguns estudos (McBratney & Webster, 1983; Oliveira, 1991; Souza Filho & Oliveira, 1996; Souza et al., 1997; Gonçalves et al., 1999), visando minimizar os custos envolvidos, otimizando o processo de amostragem sem, no entanto, comprometer a sua confiabilidade.

Quando não se conhece o grau de autocorrelação espacial entre os pontos amostrais de determinada propriedade do solo, como no caso da Estatística Clássica, freqüentemente coleta-se uma quantidade excessiva de amostras para se obter a precisão desejada. Assim, o conhecimento da

dependência espacial das propriedades do solo é importante para nortear o processo de amostragem, promovendo uma redução nos custos de coleta.

Normalmente, pontos de amostragem localizados a pequenas distâncias são mais semelhantes entre si que pontos mais distantes (McBratney & Webster, 1983). Na amostragem ao acaso, alguns pontos de amostragem podem ser tomados muito próximos uns dos outros, duplicando a informação e onerando o processo de amostragem. Assim, informações a respeito da continuidade da distribuição espacial entre as amostras, representado pelo alcance, permitirão a construção de conjuntos de dados independentes possibilitando o uso da estatística clássica sem restrições. Além do mais, permite determinar onde se realizarão novas amostragens, se necessário e a definição de novos esquemas de amostragem no campo, evitando uma situação de dependência espacial (Miller et al., 1988). Na literatura, dependendo da situação estudada, encontram-se valores de alcance igual a 69 m para umidade do solo e de 22 m para densidade do solo em um Latossolo Vermelho eutroférico (Souza et al., 2004). Libardi et al. (1986), entretanto, encontraram alcance de 16 m para umidade do solo em uma Terra Roxa Estruturada.

O objetivo deste trabalho foi determinar a configuração e o número adequado de amostras para a determinação da  $\sigma_p$  em um Latossolo Vermelho distroférico, bem como caracterizar sua variabilidade e distribuição espacial, utilizando métodos da Estatística Clássica e da Geoestatística.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi instalado na região do Sul de Minas, no município de Lavras, MG, a área encontra-se a 21°14' S e a 45°00' W e a uma altitude de 918 m. O clima da região, segundo a classificação de Koppen, é do tipo tropical

úmido (Cwb), com duas estações bem definidas, inverno seco e verão chuvoso com precipitação média anual de 1.593 mm (Brasil, 1992). O solo da área foi caracterizado como sendo um Latossolo Vermelho distroférico típico (LVdf) (Embrapa, 1999), textura muito argilosa (Quadro 1), apresentando relevo suave ondulado localizado no ombro da encosta, com declividade média de 8,0%. A área encontrava-se sob plantio convencional nos últimos 30 anos, sendo submetida a uma operação de uma aração e duas gradagens anualmente. Por ocasião da instalação do experimento, a área, neste ano, não foi cultivada. Para evitar a ocorrência de alterações na estrutura do solo pela ação das plantas daninhas, a área foi mantida livre de plantas daninhas por meio de capina manual alternada com aplicação de herbicida de pós-emergência (Glyphosate).

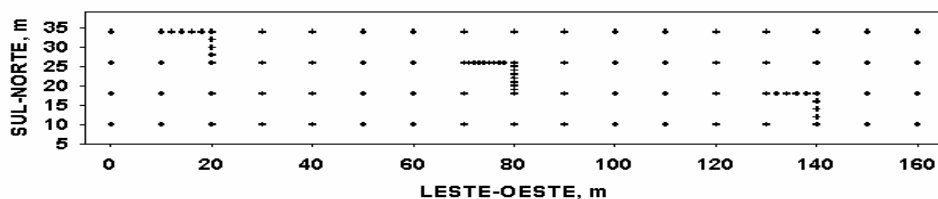
**Quadro 1. Propriedades físico-hídricas do Latossolo Vermelho distroférico típico (LVdf), utilizando média de cinco repetições**

Prof.	KSAT cm h <sup>-1</sup>	VTP	Macro m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	Micro	Ds Mg m <sup>-3</sup>	Dp	Arg	Silte	Areia
0-3 cm	9,48	0,59	0,19	0,40	1,14	2,79	630	176	194

Prof. – profundidade, KSAT – condutividade hidráulica do solo saturado; VTP – volume total de poros; Macro – macroporosidade; Micro – microporosidade; Ds – densidade do solo; Dp – densidade de partículas, Arg – argila.

Demarcou-se uma malha regular de 32 x 160 m (5120 m<sup>2</sup>), com 68 pontos distanciados a 10 m no eixo X e a 8 m no eixo Y, mais seis transectos, sendo quatro com pontos distanciados de 2 m e dois transectos com pontos distanciados de 1 m, conforme figura 1, visando detectar variações a pequenas distâncias, totalizando 98 amostras. A amostragem foi realizada no mês de outubro de 2004, com o auxílio de um amostrador de Uhland, utilizando anéis de alumínio de 2,5 cm de altura por 6,3 cm de diâmetro para a obtenção de

amostras indeformadas. Após a coleta das amostras, elas foram cuidadosamente embaladas em filme plástico, parafinadas para a preservação da estrutura e manutenção da umidade natural e posteriormente, identificadas.



**Figura 1. Esquema de amostragem realizada na área experimental.**

Em laboratório, cada amostra foi moldada segundo o volume do anel, sendo submetidas ao ensaio de compressão uniaxial (Bowles, 1986), trabalhando com sua umidade natural. As pressões aplicadas a cada amostra, utilizando um consolidômetro da marca Boart Longyear®, obedeceram à seguinte ordem; 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa. Cada pressão foi aplicada até que 90% da deformação máxima fosse alcançada (Holtz & Kovacs, 1981) e somente então aplicou-se nova pressão. Após o término do ensaio, as amostras foram levadas à estufa a 105°–110°C, até massa constante, para a determinação da umidade gravimétrica, conforme Embrapa (1997).

Realizado o ensaio, a curva de compressão do solo foi obtida, plotando-se a pressão aplicada no eixo das abscissas, em escala logarítmica, versus a densidade do solo ( $D_s$ ) correspondente no eixo das ordenadas, em escala decimal, conforme Dias Junior & Pierce (1996).

A partir das curvas de compressão foram obtidas as  $\sigma_p$ , determinadas de acordo com Dias Junior & Pierce (1995).

Inicialmente, foi realizada a análise exploratória dos dados por meio da Estatística Descritiva obtendo-se as seguintes medidas: média aritmética,

mediana, variância amostral, desvio padrão, coeficiente de variação, valores máximo e mínimo, amplitude e coeficientes de assimetria e de curtose.

A definição do número de pontos amostrais ( $n$ ) que represente os atributos do solo foi calculado pela equação (Cline, 1944):

$$n = \left( \frac{t_{\alpha/2} \cdot CV}{er} \right)^2 \quad (1)$$

em que  $t_{\alpha}$  é o valor da tabela de distribuição de Student para o nível de probabilidade  $\alpha/2$  (bilateral),  $CV$  é o coeficiente de variação (%) e  $er$  é o erro relativo admitido em torno da média (%).

A análise de distribuição de frequência dos dados foi realizada para verificar sua normalidade, utilizando-se o teste de Shapiro-Wilk a 5%. Tal análise é importante, pois, para a utilização da equação 1, exige-se que a distribuição dos resultados seja normal, além de que eles sejam espacialmente independentes.

A análise da dependência espacial foi feita pela Geoestatística, com auxílio do software GS+ (Robertson, 1998), que realiza os cálculos das semivariâncias amostrais, cuja expressão pode ser encontrada em Vieira et al. (1983):

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

sendo  $n(h)$  número de pares amostrais  $[z(x_i); z(x_i + h)]$  separados pelo vetor  $h$ , sendo  $z(x_i)$  e  $z(x_i + h)$ , valores numéricos observados do atributo analisado, para dois pontos  $x_i$  e  $x_i + h$  separados pelo vetor  $h$ . O semivariograma é representado pelo gráfico de  $\gamma(h)$  versus  $h$ . Após o ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de  $\gamma(h)$ , são definidos os parâmetros do modelo teórico para o semivariograma (efeito pepita,  $Co$ ; alcance da dependência espacial,  $a$ ; e patamar,  $Co+C$ ). Amostras separadas por distâncias menores que o alcance são



espacialmente correlacionadas, ao passo que as separadas por distâncias maiores não são correlacionadas.

Foi calculada a razão de dependência espacial (RD), que é a proporção em percentagem do efeito pepita ( $C_o$ ) em relação ao patamar ( $C_o+C$ ), equação 3 que, de acordo com Cambardella et al. (1994), apresenta a seguinte proporção: (a) dependência forte  $< 25\%$ ; (b) dependência moderada de  $25\%$  a  $75\%$  e (c) dependência fraca  $> 75\%$ .

$$RD = \left( \frac{C_o}{C_o + C} \right) * 100 \quad (3)$$

Na determinação da existência ou não de dependência espacial, utilizou-se o exame de semivariogramas, por meio do programa GS+ (Robertson, 1998). Em caso de dúvida entre mais de um modelo para o mesmo semivariograma, utilizou-se a técnica de validação conhecida como “jack-knifing”. Essa técnica consiste em retirar, individualmente, cada ponto medido da área estudada e o seu valor é estimado pelo modelo como se ele nunca existisse. Na elaboração dos mapas de distribuição espacial das variáveis, foi utilizado o programa Surfer 7.0 (Golden Software, 1999), com base nos parâmetros de semivariograma, obtidos com o programa GS+ (Robertson, 1998).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados referentes à análise descritiva para  $\sigma_p$  e umidade do solo são apresentados no quadro 2. Os valores da média e da mediana, para ambos os atributos do solo, estão próximos, mostrando haver distribuição simétrica, o que pode ser confirmado pelos valores de assimetria próximos de zero. Os resultados

referentes ao teste de Shapiro-Wilk a 5% ( $P > 0,05$ ), reforçam a aceitação da hipótese de normalidade dos erros (Quadro 2). O conhecimento da distribuição de frequência dos dados de uma variável tem importantes conseqüências, pois a análise da variância e os testes de significância normalmente usados na Estatística Clássica (Tukey, F, t, etc.) baseiam-se na distribuição normal. Entretanto, esse fato não deve ser objeto para maiores preocupações quando se aborda somente a Geoestatística.

**Quadro 2. Resumo estatístico dos dados de pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) e umidade do solo (U) obtidos a partir de 98 determinações**

Parâmetros estatísticos	$\sigma_p$ (kPa)	U (kg kg <sup>-1</sup> )
Média	341,9	0,2180
Mediana	334,7	0,2160
Variância amostral	2543,8	0,00071
Desvio padrão	50,4	0,027
CV (%)	14,8	12,0
Mínimo	220,8	0,1615
Máximo	469,0	0,2798
Amplitude	248,2	0,1183
Assimetria	0,20	0,10
Curtose	-0,63	-0,62
P valor teste de Shapiro Wilk	0,2427*	0,4748*

\* Possui distribuição normal, pelo teste de Shapiro Wilk, a 5% de probabilidade

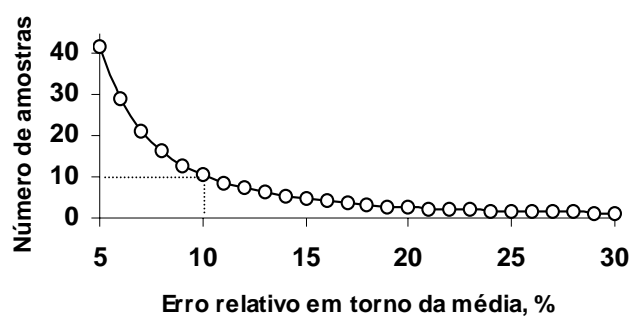
Observa-se que os valores de  $\sigma_p$  apresentaram uma elevada amplitude, 248,2 kPa (Quadro 2), com valores mínimo e máximo de 220,8 e 469,0 kPa, respectivamente. A elevada amplitude da  $\sigma_p$  reflete o manejo empregado na área, já que o tráfego de máquinas ocorre aleatoriamente, além da constante alteração da estrutura do solo pelas operações de cultivo convencional, tais como manejo das plantas daninhas realizado por meio de capina manual alternada com

aplicação de herbicida de pós-emergência, o que promove a inversão das camadas e a deposição diferencial de partículas, influenciando a  $\sigma_p$ . Ressalta-se que o valor mínimo está acima das pressões médias aplicadas pelo maquinário agrícola, as quais se situam entre 100 e 200 kPa (Carpenedo, 1994). Castro Neto (2001), trabalhando com trator MF 299<sup>®</sup>, concluiu que o mesmo aplicou uma pressão de 116,9 kPa ao solo. Desse modo, pressões menores que a  $\sigma_p$  mínima (220,8 kPa) não causariam problemas adicionais à estrutura do solo na área estudada, na presente condição de umidade. No entanto, é necessário considerar que os valores da umidade do solo são relativamente baixos e que, normalmente, podem apresentar valores mais altos durante o ano, modificando o comportamento da  $\sigma_p$ .

A  $\sigma_p$  e umidade do solo apresentaram coeficientes de variação de 14,8% e 12,0% respectivamente, valores considerados médios, de acordo com Warrick & Nielsen (1980), corroborando com os resultados obtidos por Kondo (2003). Tal índice é de grande importância para a definição do número adequado de amostras a serem coletadas para se obter um valor representativo (Melo Filho et al., 2006) de determinado atributo do solo. Entretanto, como uma das pressuposições para utilização da equação 1 é a independência dos dados, optou-se por selecionar pontos na malha amostral (Figura 1) que apresentassem total independência espacial, ou seja, pontos separados por distâncias maiores que o alcance. Desse modo, o novo valor do coeficiente de variação para a  $\sigma_p$  foi de 16,29 %. Os pontos foram selecionados da seguinte maneira: tomou-se aleatoriamente o primeiro ponto e, em seguida, respeitou-se a distância do alcance, que foi de 19,5 m para pressão de preconsolidação (Quadro 3), para a seleção dos demais pontos, totalizando 18 pontos selecionados.

O número de amostras para se obter um valor médio representativo da  $\sigma_p$ , para um nível de confiança desejado, pode ser calculado pela equação 1. Na figura 2 é mostrado o número necessário de amostras, a 5%, para variações

em torno da média, medida pelo erro relativo, de 5% a 30%. O número de amostras necessário para obter uma variação de 10% em torno da média, a 5% de significância, seria de 10 pontos amostrais, nas condições estudadas (Figura 2). Para uma variação de 5% em torno da média, esse número seria 42, valor considerado alto do ponto de vista prático. Há um aumento no número de amostras à medida que se reduz a variação em torno da média. Desse modo, um aumento da exatidão da estimativa da média está associado a um acréscimo considerável do esforço, onerando o processo de amostragem sem um incremento proporcional em precisão.

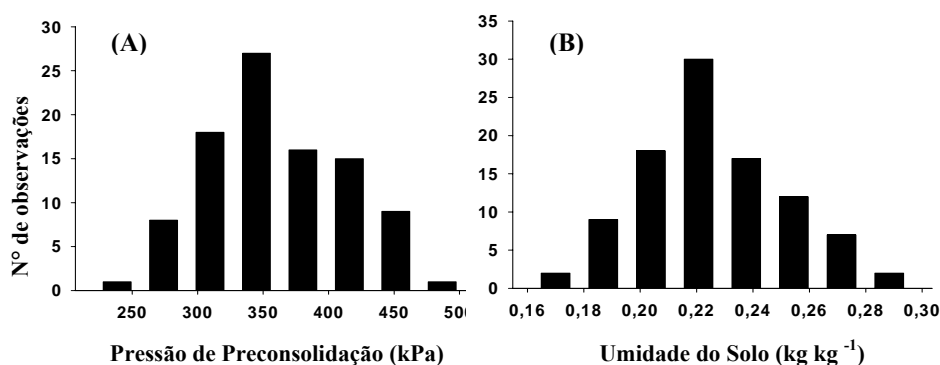


**Figura 2. Número necessário de amostras para estimativa da média da  $\sigma_p$  conforme o erro relativo em torno da média, a 5% significância.**

Os coeficientes de assimetria e de curtose são apresentados para efeito de comparação com a distribuição normal (Figura 3), sendo esses próximos de zero, o que está de acordo com os valores de CV, que foram de 14,8% e 12,0% para  $\sigma_p$  e umidade do solo, respectivamente.

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk, a 5% (Quadro 2), há normalidade nos atributos estudados, como se pode observar na figura 3. Segundo Isaaks & Srivastava (1989), mais importante que a normalidade dos dados é a ocorrência ou não do chamado efeito proporcional, ou seja, que a média e a variabilidade dos dados sejam constantes na área de estudo, como

pode ser observado na figura 4, ocorrendo assim a estacionaridade isotrópica, fato essencial na aplicação da Geoestatística. Não é possível visualizar se há ou não anisotropia dos dados devido à configuração da área, que possui um formato retangular com predomínio de pontos em uma direção (leste-oeste). Desse modo, assumiu-se, por hipótese de trabalho, a isotropia dos dados para a construção do semivariograma e posterior krigagem.

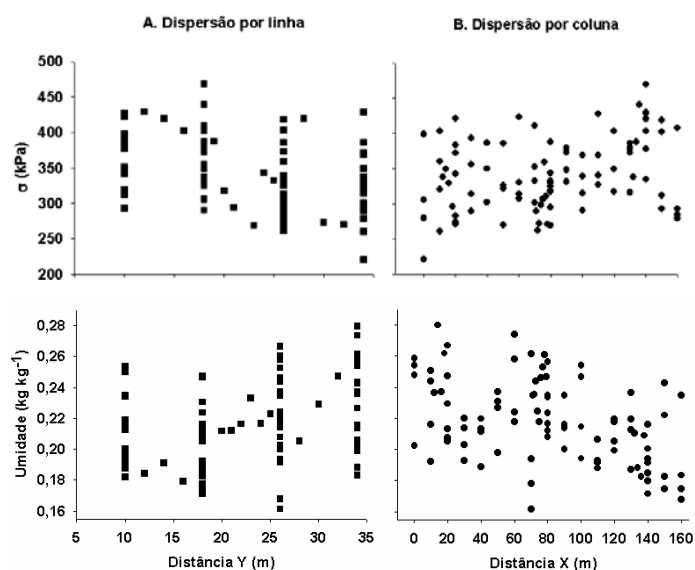


**Figura 3. Distribuição de freqüência para as 98 amostras de pressão de preconsolidação (A) e umidade do solo (B).**

O comportamento dos dados em relação às direções da malha amostral é mostrado na figura 4, na qual nota-se que eles estão distribuídos homogeneamente em toda a área, não havendo regiões com concentração de valores altos ou baixos em zonas específicas da área estudada. Essa análise indica não haver tendência nas direções da malha amostral, o que significa não existir, também, maiores problemas ao assumir a hipótese de estacionaridade isotrópica dos dados (Queiroz et al., 1999).

Dentre os parâmetros obtidos pela Estatística Espacial está o alcance da dependência espacial, que representa a distância em que os pontos amostrais

estão correlacionados entre si (Vieira, 2000). Desse modo, amostras localizadas numa área de raio igual ao alcance são mais homogêneas entre si do que com aquelas localizadas fora dessa área. Portanto, o conhecimento do alcance da dependência espacial permitirá a definição desse intervalo que deverá ser de, no mínimo, igual ao alcance, garantindo a independência entre os pontos amostrais, diminuindo o esforço e os custos de amostragem, não comprometendo sua representatividade.



**Figura 4. Gráficos de dispersão dos dados de pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) e umidade do solo, por linha (A) e coluna (B).**

O modelo teórico ajustado às duas variáveis estudadas foi o esférico (Quadro 3), que é muito utilizado por vários pesquisadores para descrever o comportamento de semivariogramas de atributo de solo e de plantas (Salviano et al., 1998).

O efeito pepita ( $Co$ ) é um parâmetro do semivariograma que indica variabilidade não explicada, que pode ser devido a erros de medição ou variação não detectada pela escala de amostragem (Cambardella et al., 1994), além de ser influenciado pelas características extrínsecas do solo ocasionadas pela ação antrópica. Esse parâmetro pode ser quantificado pela razão entre o efeito pepita e o patamar ( $Co+C$ ), chamada de razão da dependência espacial (RD), proposta por Cambardella et al. (1994). Pelo quadro 3 observa-se que a RD foi praticamente a mesma para as duas variáveis estudadas, sendo considerada uma dependência moderada (entre 25% e 75%) Esse fato é explicado pelas variações extrínsecas causadas pelo preparo do solo (Cambardella et al., 1994), que influenciam sobremaneira ambas as variáveis, principalmente a  $\sigma_p$ , por meio do tipo, intensidade e freqüência da carga aplicada ao solo (Horn, 1998; Lebert & Horn, 1991).

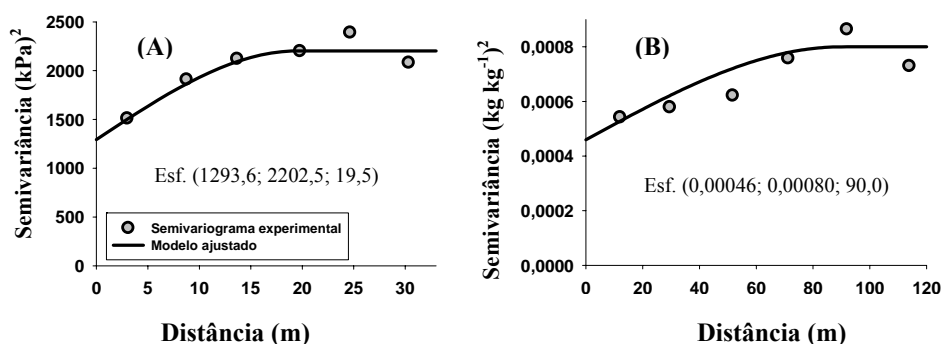
**Quadro 3. Estimativa dos parâmetros do modelo teórico ajustado para pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) e umidade do solo (U)**

Variável	Modelo	Co	Co+C	Alcance (m)	R <sup>2</sup>	RD (%)
$\sigma_p$ (kPa)	esférico	1293,6	2202,5	19,5	0,88	59
U (kg kg <sup>-1</sup> )	esférico	0,00046	0,00080	90,0	0,80	58

Co – efeito pepita; Co+C – patamar; R<sup>2</sup> – coeficiente de determinação; RD – razão da dependência espacial [Co/(Co+C) 100]

Os semivariogramas experimentais, com os respectivos modelos ajustados, são apresentados na figura 5. Os alcances de 19,5 e 90,0 m para  $\sigma_p$  e umidade do solo, respectivamente, indicam a amplitude de correlação espacial entre as observações de cada variável, representando o raio de um círculo no qual as amostras têm correlação entre si. Portanto, não se recomenda amostrar mais de um ponto dentro desse intervalo, sob pena de haver duplicidade de amostragem bem como um alto ônus para o agricultor.

Se as amostras forem coletadas seguindo a presente recomendação de amostragem para a área em estudo (10 pontos distanciados de, no mínimo, 19,5 m), será possível aplicar a Estatística Clássica e seus parâmetros sem restrições. Sendo desnecessário, portanto, o uso da Geoestatística e suas aplicações. Isso se deve ao fato de que as amostras futuramente coletadas estarão dispostas a distâncias maiores que o alcance espacial, proporcionando independência total entre as amostras.



**Figura 5. Semivariograma da pressão de preconsolidação (A) e umidade do solo (B). Valores entre parênteses são efeito pepita ( $C_0$ ), patamar ( $C_0+C$ ) e alcance (a), respectivamente.**

Com os parâmetros do modelo ajustado ao semivariograma, utilizando-se o processo de krigagem ordinária pontual com 16 vizinhos, foram estimados os valores da  $\sigma_p$  e umidade do solo na área estudada. A partir dos valores estimados, construíram-se os mapas de isolinhas apresentados na figura 6. A área possui uma declividade média de 8,0% no sentido de sul-norte (Figura 6), que influencia diretamente os valores de umidade do solo que, por sua vez, influencia os de valores da  $\sigma_p$ , corroborando com Ferrero et al. (2005). A correlação da declividade, tanto com a umidade quanto com a  $\sigma_p$ , foi significativa a 5 %, com coeficiente de correlação de 0,32 para ambas as



variáveis. Devido a esse fato, observam-se maiores valores de umidade na região Norte, principalmente mais à leste da área, com valores de umidade maiores que  $0,2150 \text{ kg kg}^{-1}$  (Figura 6). Essa região apresenta menor capacidade de suporte de carga, sendo considerada, portanto, mais susceptível à compactação do solo.

Nota-se que, a oeste da área, existe uma região que apresentou valores de  $\sigma_p$  acima de 370 kPa, a qual está situada na lateral da lavoura, próximo aos carregadores, apresentando índices maiores de compactação, devido ao tráfego intenso de máquinas, conforme verificado por Silva et al. (2004). Por outro lado, essa região apresenta uma maior capacidade de suporte de carga, podendo ser, portanto, trafegada sem que haja compactação adicional do solo. Outro fato que contribuiu para elevada  $\sigma_p$  nessa região foi a baixa umidade ( $< 0,2150 \text{ kg kg}^{-1}$ ), influenciada pelas maiores cotas de altitude. Entretanto, uma maior capacidade de suporte de carga pode limitar o desenvolvimento do sistema radicular das culturas, devido à alta pressão que as raízes têm que realizar para se desenvolverem, visto que estas pressões têm que ser iguais às pressões de preconsolidação (Römken & Miller, 1971).

O mapa de isolinhas pode, portanto, ser usado como uma ferramenta para auxiliar na tomada de decisão de onde e quando trafegar em uma determinada área, optando-se por trafegar inicialmente em regiões menos susceptíveis à compactação do solo, devido aos maiores valores de  $\sigma_p$ , preservando, em consequência, a estrutura do solo.

Apesar da moderada dependência espacial encontrada para a pressão de preconsolidação, seu alcance deve ser considerado no planejamento de novas amostragens. Assim, em futuras amostragens para determinação da pressão de preconsolidação, em condições similares à área estudada, sugere-se dispor os pontos de coleta (10 pontos) com intervalo no mínimo, igual ao alcance de dependência espacial (19,5 m), associando um menor esforço de amostragem com uma maior representatividade da área.

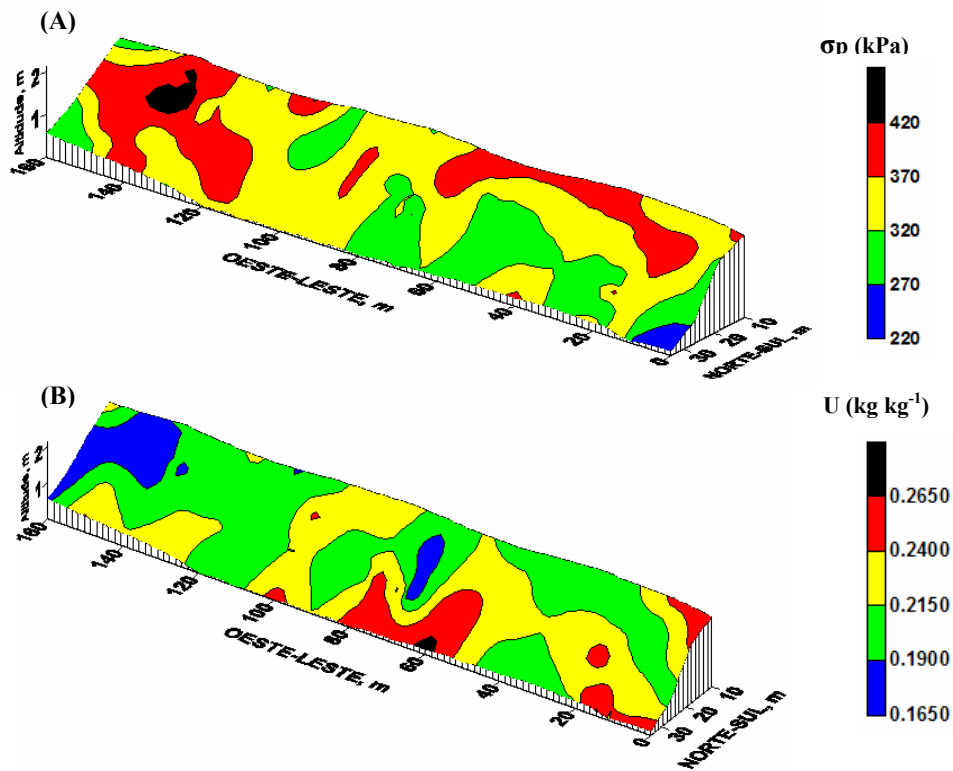


Figura 6. Mapa de isolinhas da pressão de preconsolidação (A) e umidade do solo (B), representados conjuntamente com o relevo da área.

## CONCLUSÕES

1. A pressão de preconsolidação e a umidade do solo apresentaram uma moderada estrutura de dependência espacial, com alcances de 19,5 e 90,0 m, respectivamente.

2. O mapeamento da área permitiu observar zonas de maior e menor susceptibilidade à compactação, possibilitando a tomada de decisão sobre onde começar a trafegar sem causar problemas adicionais à estrutura do solo.

3. O conhecimento da distribuição espacial da pressão de preconsolidação e da umidade do solo pode ser usado para o desenvolvimento de estratégias de manejo que minimizem os riscos da compactação adicional do solo e os impactos causados pelas operações motomecanizadas.

#### LITERATURA CITADA

- BOWLES, J. E. Engineering properties of soils and their measurements. 3 ed. New York, McGraw-Hill, 1986. 218 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Normais Climatológicas (1961-1990). Brasília: Secretaria Nacional de Irrigação. Departamento Nacional de Meteorologia, 1992. 84 p.
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F. & KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 58:1501-1511, 1994.
- CARPENEDO, V. Compressibilidade de solos em sistemas de manejo. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1994. 106 p. (Tese de Doutorado).
- CASTRO NETO, P. Desenvolvimento e avaliação de equipamentos e metodologia para determinação de parâmetros físicos do solo relacionados a dias trabalháveis com máquinas agrícolas. Botucatu SP, Universidade Estadual Paulista, 2001. 155 p. (Tese de Doutorado).
- CLINE, M. G. Principles of soil sampling. Soil Sci., Baltimore, 58:275-288, 1944.
- DIAS JUNIOR, M. S. & PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. Soil Technol., 8:139-151, 1995.
- DIAS JUNIOR, M. S. & PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. R. Bras. Ci. Solo, 20:175-182, 1996.

- DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P.; LASMAR JÚNIOR, E. & ARAUJO JUNIOR, C. F. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to *Eucalyptus* harvest operations. *Sci. Agric.*, 62:248-255, 2005.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 1999. 412 p.
- FERRERO, A.; USOWICZ, B. & LIPIEC, J. Effects of tractor traffic on spatial variability of soil strength and water content in grass covered and cultivated sloping vineyard. *Soil Till. Res.*, 84:127-138, 2005.
- GOLDEN SOFTWARE. SURFER for Windows: release 7.0: contouring and 3 D surface mapping for scientist's engineers, user's guide. New York, 1999. 619p.
- GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V. & VIEIRA, S. R. Padrões de amostragem e intensidade de krigagem na caracterização do armazenamento de água no solo, em área irrigada por pivô central. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:485-495, 1999.
- HOLTZ, R. D. & KOVACS, W. D. An introduction to geotechnical engineering. New Jersey, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1981, 733 p.
- HORN, R. Compressibility of arable land. *Catena Sup.*, 11: 53-71, 1988.
- IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; DIAS JUNIOR, M. S. & TORMENA, C. A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:11-18, 2001.
- ISAAKS, E. H. & SRIVASTAVA, R. M. An introduction to applied geostatistics. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.
- LEBERT, M. & HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil Till. Res.*, 19:274-286, 1991.

- LIBARDI, P. L.; PREVEDELLO, C. L.; PAULETTO, E. A. & MORAES, S. O. Variabilidade espacial da umidade, textura e densidade de partículas ao longo de uma transeção. *R. Bras. Ci. Solo*, 10:85-90, 1986.
- KONDO, M. K. Variabilidade espacial do comportamento compressivo do solo e mapas de trafegabilidade na cultura do cafeeiro irrigado. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2003. 166 p. (Tese de Doutorado)
- KONDO, M. K. & DIAS JUNIOR, M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:211-218, 1999.
- McBRATNEY, A. B. & WEBSTER, R. How many observations are needed for regional estimation of soil properties? *Soil Sci.*, 135:177-183, 1983.
- MELO FILHO, J. F.; OLIVEIRA, A. S.; LOPES, L. & VELLAME, L. M. Análise exploratória e variabilidade da densidade do solo em um perfil de Latossolo Amarelo Coeso dos tabuleiros costeiros da Bahia. *Ci. & Agrotec.*, 30:199-205, 2006.
- MILLER, M. P.; SINGER, M. J. & NIELSEN, D. R. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:1133-1141, 1988.
- OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI, N. & RESCK, D. V. S. Compressibilidade de um latossolo vermelho argiloso de acordo com a tensão de água no solo, uso e manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:773-781, 2003.
- OLIVEIRA M. S. de. Planos amostrais para variáveis espaciais utilizando Geoestatística. Campinas: Unicamp, 1991. 110 p. (Tese de mestrado).
- QUEIROZ, J. E.; CRUCIANI, D. E. & LIBARDI, P. L. Variabilidade espacial da porosidade drenável de um solo de várzea, no município de Piracicaba, estado de São Paulo. *R. Bras. Eng. Agric. Amb.*, 3:135-139, 1999.
- ROBERTSON, G. P. *GS<sup>+</sup>: Geostatistics for the environmental sciences. Versão 5.1 for windows*, Plainwell, Gamma Design Software, 1998. 152 p.
- RÖMKENS, M. J. M. & MILLER, R. R.: Predicting root size and frequency from one-dimensional consolidation data: a mathematical model. *Plant Soil*, 35:237-248, 1971.

- SALVIANO, A. A. C.; VIEIRA, S. R. & SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* L. em área severamente erodida. R. Bras. Ci. Solo, 22:115-122, 1998.
- SILVA, R. B.; DIAS JUNIOR, M. S.; SILVA, F. A. M. & FOLE, S. M. O. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo dos cerrados. R. Bras. Ci. Solo, 27:211-218, 2003.
- SILVA, V. R.; REICHERT, J. M. & REINERT, D.J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. Ci. Rural, 34:399-406, 2004.
- SOUZA FILHO, M. D. I. & OLIVEIRA, M. S. Planejamento da amostragem de solos visando à estimação da média espacial do teor de cálcio utilizando a geoestatística. Ci. Agrotec., 20:387-393, 1996.
- SOUZA, L.; COGO, N. P. & VIEIRA, S. R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. R. Bras. Ci. Solo, 21:367-372, 1997.
- SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J. & PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. R. Bras. Ci. Solo, 28:937-944, 2004.
- VIEIRA, S. R. :Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H. & SCHAEFER, C. E. G. R., eds. Tópicos em ciência do solo, 2000, v. 1, p. 1-54.
- VIEIRA, S. R.; HATFIEL, J. L.; NIELSEN, D. R. & BIGGAR, J. W. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. Hilgardia, 51:1-75, 1983.
- WARRICK, A. W. & NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.) Applications of soil physics. New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.

## **CAPÍTULO 2**

### **COMPRESSIBILIDADE DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO EM DIFERENTES LOCAIS NA LAVOURA CAFEIEIRA**

## RESUMO

GONTIJO, Ivoney. Compressibilidade de um Latossolo Vermelho distrófico em diferentes locais na lavoura cafeeira. In: \_\_\_\_\_. **Variabilidade espacial do comportamento compressivo de dois latossolos sob diferentes usos**. 2007. Cap. 2, p. 53-75. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. \*

A busca por alternativas que proporcionem a sustentabilidade do ambiente agrícola, principalmente do ponto de vista da manutenção da estrutura do solo, tem sido constante, devido à crescente ocorrência do processo de compactação presente em áreas cultivadas. O objetivo do presente trabalho foi o de estimar a capacidade de suporte de carga do solo em diferentes locais em uma lavoura cafeeira, bem como conhecer os efeitos do processo de compactação do solo na distribuição de poros e na retenção de água no solo. O estudo foi realizado em uma lavoura de café (*Coffea arabica* L.) implantada no ano de 1995, no município de Patrocínio, MG. A área total do experimento é de 40.000 m<sup>2</sup> e as plantas estavam implantadas no espaçamento de 4 x 1 m. A vegetação predominante da região é do tipo cerrado. O relevo é plano a suave ondulado, com declividade média de 3%, sendo o solo classificado como um Latossolo Vermelho distrófico típico, textura muito argilosa. As amostras foram coletadas, na profundidade de 10-13 cm, um total de 30 amostras indeformadas, para cada local da lavoura cafeeira, entrelinha (EL), projeção da saia (PS) e linha de tráfego (LT), além da condição de mata nativa (MN) para a construção do modelo de capacidade de suporte de carga do solo. Destas, foram retiradas 6 amostras de cada local para a obtenção das curvas de retenção de água, nas tensões de água de -2, -4, -6, -10, -33, -100, -500 e -1500 kPa. As amostras deformadas foram obtidas para determinação dos teores de matéria orgânica, textura e densidade de partículas. Os limites de liquidez, de plasticidade e de contração também foram determinados. A compactação do solo aumentou no sentido: EL<PS = MN<LT; mesmo nos locais onde há menor espaço poroso, LT e PS, a relação entre macro e microporos foi considerada dentro da faixa ideal.

---

\* Comitê Orientador: Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Junior, DCS/UFLA (Orientador), Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães, CTSM/EPAMIG (Co-orientador), Prof. Dr. Marcelo Silva de Oliveira, DEX/UFLA (Co-orientador).



## ABSTRACT

GONTIJO, Ivoney. Compressibility in a Red Latosol (Oxisol) in different places in coffee plantation. In: \_\_\_\_\_ **Spatial variability in compressive behavior in two latosols (Oxisols) under different uses**. 2007. Cap. 2, p. 53-75. Thesis (Doctorate in Soil Science) – Federal University of Lavras, Lavras, Minas Gerais. Brazil. \*

The search for alternatives that provide the sustainability of the agricultural, mainly of the point of view of maintenance of the soil structure, it has been constant due to occurrence of soil compaction process present in cultivated areas. The objective of this work is to estimate the soil load support capacity in different positions in a coffee plantation, as well as to know the effects of soil compaction process in soil pores distribution and soil water retention. The research was carried out at a farm located in Patrocínio county, Minas Gerais State, Southeast of Brazil. The soil type is Red Latosol (Oxisol) with an average field slope of 3%. Thirty undisturbed soil samples were taken, in a 0.10 – 0.13 m depth, in each one of three positions within the coffee plantation a) in the track (T); b) in the between track (BT) and c) under the coffee crop canopy (C). Beyond those positions, samples also were collected in native forest (NF) to obtain the soil load capacity models. Five undisturbed samples were taken to study the soil retention curve, in the following water tensions -2, -4, -6, -10, -33, -100, -500 e -1500 kPa. The soil compaction increased in the following order: BT < C = NF < T; and even in the positions where there is minor porous space, T and C, the relationship between macro and micropores was considered ideal.

---

\* Guidance Comittee: Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Junior, DCS/UFLA (Adviser), Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães, CTSM/EPAMIG (Co-adviser), Prof. Dr. Marcelo Silva de Oliveira, DEX/UFLA (Co-adviser)

## 1 INTRODUÇÃO

A busca por alternativas que proporcionem a sustentabilidade do ambiente agrícola, principalmente do ponto de vista da manutenção da estrutura do solo, tem sido constante devido à crescente ocorrência do processo de compactação presente nas áreas cultivadas. A maioria das ocorrências do processo de compactação do solo na agricultura moderna deve-se ao tráfego de implementos agrícolas, o qual é parte integrante do sistema de manejo das culturas. O aumento do tamanho dos implementos agrícolas e a alta frequência de tráfego são causas importantes da indução da compactação e deterioração da estrutura do solo (Lipiec & Hatano, 2003).

Sabe-se que o manejo inadequado pode afetar a porosidade e a densidade do solo, além de provocar alterações na sua estrutura, as quais afetam a retenção de água e a resistência mecânica do solo (Silva et al., 1994). Entende-se por compactação do solo o processo que descreve a diminuição de volume do solo não saturado resultante da expulsão de ar dos poros devido a uma carga aplicada (Gupta & Allmaras, 1987). Tal processo pode causar prejuízos ao solo, quando essa carga aplicada é excessiva.

O elevado índice de mecanização presente na agricultura moderna vem causando cada vez mais, índices elevados de compactação no solo. Estima-se que aproximadamente 68 milhões de hectares em todo o mundo estejam em processo de degradação devido à compactação, sendo o tráfego de máquinas agrícolas responsável pela maior parte das causas de compactação nos solos agrícolas (Flowers & Lal, 1998). Esse problema tende a se intensificar devido à tendência de aumento do tamanho e da potência dos implementos agrícolas, por permitir economia, trabalhar em larga escala, além de reduzir os custos de mão-de-obra (Yavuzcan et al., 2004).

O processo de compactação causada pelo tráfego de máquinas afeta a distribuição, a retenção e a distribuição de água no solo, devido à diminuição do volume do solo, ocorrendo a compressão do espaço poroso. É importante conhecer modelos que estimem a pressão máxima que o solo pode suportar sem que a compactação adicional ocorra para diferentes graus de umidade, com base na sua história de tensão. Pressões exercidas no solo podem ou não causar compactação adicional (Dias Junior & Pierce, 1996).

A compactação aumenta a densidade do solo e a sua resistência mecânica (Beutler & Centurion, 2004) e diminui a porosidade total, o tamanho e a continuidade dos poros (Hillel, 1982; Horn & Lebert, 1994). Reduções significativas ocorrem principalmente no volume dos macroporos, enquanto os microporos permanecem praticamente inalterados (Hillel, 1982). Em solos compactados ocorre alteração da estrutura e, conseqüentemente, decréscimo da porosidade, da macroporosidade, da disponibilidade de água e nutrientes e da difusão de gases no solo (Taylor & Brar, 1991), cujas relações com desenvolvimento das raízes são fundamentais.

As alterações na estrutura do solo devido ao processo de compactação influenciam vários aspectos, os quais refletem no desenvolvimento do sistema radicular das plantas (Lipiec & Hatano, 2003). Raízes que são submetidas a grandes resistências mecânicas do solo alongam-se menos, apresentam maior diâmetro e são bastante deformadas, pois a pressão de turgescência das células da região de alongamento das raízes não é suficiente para vencer a resistência mecânica oferecida pela matriz do solo (Rena & Guimarães, 2000). Assim, o processo de compactação do solo compromete as funções básicas do sistema radicular das plantas, como trocas gasosas e absorção de água e nutrientes, refletindo diretamente na produtividade da lavoura cafeeira e na sustentabilidade do sistema produtivo.

O sistema de manejo e a intensidade de tráfego em locais específicos na lavoura podem exercer grande influência nos parâmetros de compactação e compressibilidade do solo. Lima et al. (2004), comparando diferentes locais dentro de um pomar cítrico, sob um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de textura franco-arenosa, concluíram que a compactação do solo aumentou no sentido dos locais: linha de plantio, entrelinha, linha de tráfego e projeção da copa das plantas.

A integração das informações de modelos que revelem a capacidade de suporte de carga com as curvas de retenção de água no solo permitem um maior entendimento a respeito do efeito do tráfego sobre a distribuição do espaço poroso no solo. A determinação da curva de retenção de água no solo é parte fundamental da caracterização das propriedades hidráulicas do solo, influenciando nas estratégias de manejo adotadas para a manutenção da preservação da estrutura do solo e a disponibilidade de água para as plantas. A interferência do processo de compactação na distribuição do espaço poroso do solo já foi estudada por Starsev & McNabb (2001). Esses autores concluíram que o processo de compactação não afetou significativamente a forma da curva de retenção de água no solo e a distribuição de poros, quando o solo apresentava umidades inferiores à umidade correspondente à capacidade de campo. Assim, a avaliação, o entendimento e a prevenção da compactação do solo, associados a mudanças no espaço poroso, se tornam importantes para prevenir a degradação da estrutura do solo.

O objetivo do presente trabalho foi estimar a capacidade de suporte de carga do solo em diferentes locais em uma lavoura cafeeira, bem como conhecer os efeitos do processo de compactação do solo na distribuição de poros e na retenção de água no solo.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em uma lavoura de café (*Coffea arabica* L.), implantada no ano de 1995, localizada no município de Patrocínio, MG. Antes da implantação da lavoura cafeeira a área foi utilizada com pastagem. A área total do experimento é de 40.000 m<sup>2</sup>, com cafeeiros implantados no espaçamento de 4 x 1 m. A área encontra-se a 18°59'15'' de latitude sul e a 46°56'47'' de longitude, a oeste de Greenwich e a uma altitude de 934 m.

O município de Patrocínio está inserido em uma área geologicamente complexa, conhecida como Arco da Canastra, que separa as bacias sedimentares do São Francisco e do Paraná. O clima da região, segundo a classificação de Koppen, é do tipo Aw, com duas estações bem definidas, inverno seco e verão chuvoso, com precipitação média anual de 1.620,1 mm (Silva & Malvino, 2005). A vegetação predominante da região é do tipo cerrado. O relevo é plano a suave ondulado, com declividade média de 3%, sendo o solo classificado como um Latossolo Vermelho distrófico típico (Embrapa, 1999) de textura muito argilosa, apresentando 78% de argila, 11% de silte e 11% de areia, 34 g kg<sup>-1</sup> de matéria orgânica e densidade de partículas de 2,69 Mg m<sup>-3</sup>.

A análise textural foi realizada por meio do processo de ultrason, devido à forte agregação encontrada no latossolo estudado. Foi utilizado um aparelho da marca Misonix<sup>®</sup>, modelo XL2020, operando a 20 kHz. A potência aplicada foi de 60 Watts, durante 5 minutos, proporcionando uma energia de 90 J mL<sup>-1</sup>, conforme técnicas calorimétricas descritas por Sá et al. (2000).

O controle de plantas daninhas é realizado com a aplicação de herbicida na projeção da saia antes da adubação e na linha de tráfego e entrelinha, o controle é realizado com utilização de roçadeira em associação com aplicação de herbicida. O controle fitossanitário é realizado uma vez ao mês, utilizando pulverizador ARBUS 2000<sup>®</sup> com, aproximadamente, 2.600 kg, quando cheio. A

adubação de cobertura, aplicada de 40 em 40 dias no período chuvoso, é realizada utilizando-se um aplicador da marca Komander<sup>®</sup>, com capacidade para 4.000 kg, com pneus 6.50-16 com calibragem de 50 PSI. Em todas as operações agrícolas foi utilizado um trator Valmet 785 Fruteiro<sup>®</sup> (4 x 2), com peso aproximado de 2.670 kg e pneus dianteiros do tipo 7.50-16, cuja pressão de inflação de ar é de 28 PSI e traseiros do tipo 14.9-28, com pressão de 18 PSI.

A amostragem foi realizada no mês de janeiro do ano de 2006, distribuindo-se aleatoriamente, na profundidade de 10-13 cm, um total de 30 amostras indeformadas em anéis metálicos de 2,54 cm de altura por 6,30 cm de diâmetro, para cada local da lavoura cafeeira, entrelinha (EL), linha de tráfego (LT) e projeção da saia (PS), conforme ilustrado na figura 1, bem como na condição de mata nativa (MN) utilizada como referência. Essas amostras foram utilizadas para a construção do modelo de capacidade de suporte de carga do solo. Destas, foram retiradas 6 amostras de cada local para a obtenção das curvas de retenção de água (Embrapa, 1997), nas tensões de água de 2, 4, 6, 10, 33, 100, 500 e 1500 kPa. As tensões de 2, 4, 6 kPa foram obtidas utilizando-se a unidade de sucção (Grohmann, 1960) e, para a obtenção das demais tensões, utilizou-se uma câmara de Richards (Klute, 1986). As curvas de retenção de água no solo foram ajustadas pelo modelo proposto por van Genuchten (1980), em que o conteúdo volumétrico de água ( $m^3 m^{-3}$ ) em função do potencial de água ( $\Psi$ , kPa) é dado por:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|\psi|)^n]^{1-\frac{1}{n}}}$$

em que  $\theta_r$  ( $m^3 m^{-3}$ ) é o conteúdo de água residual e  $\theta_s$  ( $m^3 m^{-3}$ ) é o conteúdo de água de saturação;  $\alpha$  e  $n$  são parâmetros de ajuste do modelo. Na prática,  $\theta_r$  é definido como conteúdo de água retido em mais baixos potenciais, por exemplo,

-1500 kPa (van Genuchten, 1980). Os valores de  $\alpha$  e  $n$  são obtidos para cada amostra durante o processo de ajuste.



FIGURA 1 Foto da área experimental localizada em Patrocínio, MG, com destaque para os locais: EL - entrelinha, LT - linha de tráfego e PS - projeção da saia.

As amostras previamente submetidas à tensão de 6 kPa foram utilizadas na determinação da microporosidade (Grohmann, 1960). O volume total de poros (VTP) foi determinado por meio da umidade volumétrica do solo saturado e a macroporosidade calculada pela diferença entre a VTP e a microporosidade. Foi calculada também a quantidade de água disponível AD ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), que é obtida por diferença entre o teor de água do solo na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) e

no ponto de murcha permanente ( $\theta_{pmp}$ ), conforme a equação, [ $AD = \theta_{cc}$  (6 kPa) -  $\theta_{pmp}$  (1500 kPa)]. Para latossolos argilosos, a tensão aplicada em laboratório para a capacidade de campo é de 6 kPa (Reichardt, 1988; Oliveira et al., 2003)

Em laboratório, cada amostra foi moldada segundo o volume do anel, sendo submetidas ao ensaio de compressão uniaxial (Bowles, 1986) para a obtenção da pressão de preconsolidação. As pressões aplicadas a cada amostra, utilizando um consolidômetro da marca Boart Longyear®, obedeceram à seguinte ordem; 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa. Cada pressão foi aplicada até que 90% da deformação máxima fosse alcançada (Taylor, 1948) e somente então aplicou-se nova pressão. Após o término do ensaio, as amostras foram levadas à estufa a 105°–110°C, até massa constante, para a determinação da umidade gravimétrica, conforme Embrapa (1997).

Realizado o ensaio, a curva de compressão do solo foi obtida plotando-se a pressão aplicada no eixo das abscissas, em escala logarítmica, versus a densidade do solo (Ds) correspondente no eixo das ordenadas, em escala decimal, conforme Dias Junior & Pierce (1996).

A partir das curvas de compressão foram obtidas as  $\sigma_p$ , determinadas de acordo com Dias Junior & Pierce (1995). Com a utilização do software Sigma Plot 8.0® (2000), foram obtidas as equações matemáticas que correspondem aos modelos de capacidade de suporte de carga do solo, de acordo com a equação  $\sigma_p = 10^{(a+bU)}$ . As comparações das equações dos modelos de capacidade de suporte de carga entre os locais, relacionando  $\sigma_p$  e umidade do solo, foram realizadas utilizando-se os procedimentos descritos por Snedecor & Cochran (1989).

As amostras deformadas foram obtidas para a determinação dos teores de matéria orgânica (Raij & Quaggio, 1983), textura (Day, 1986) e densidade de partículas (Blake & Hartge, 1986). Os limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) foram determinados conforme Sowers (1965), enquanto o limite de



contração (LC) foi determinado segundo Bowles (1986). Esses limites definem a faixa de plasticidade (LL-LP) não recomendada para o tráfego e/ou preparo do solo, pois, nessa condição, o solo pode sofrer deformações não-recuperáveis. A faixa de friabilidade (LP-LC) define a condição de consistência na qual o solo pode ser preparado, pois menores danos são causados à estrutura do solo (Kondo & Dias Junior, 1999).

Os valores referentes a VTP, macro e microporos e densidade do solo foram submetidos à análise exploratória, para a obtenção da distribuição de frequência e normalidade dos dados pelo teste W (Shapiro-Wilk, 1965). Nas situações em que ocorreu normalidade dos dados, procedeu-se a análise de variância e a comparação das médias utilizando do teste de Scott-knott, a 5% de probabilidade, pelo programa estatístico Sisvar (Ferreira, 2000).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para analisar os efeitos do tráfego nos diferentes locais na lavoura cafeeira e sua resistência ao processo de compactação, foi utilizado o modelo de capacidade de suporte de carga proposto por Dias Junior (1994) para a área estudada (Figura 2). Observa-se que as  $\sigma_p$  decresceram exponencialmente com o aumento da umidade do solo, de acordo com o modelo proposto por Dias Junior (1994), [ $\sigma_p = 10^{(a + bU)}$ ], em que  $\sigma_p$  é a pressão de preconsolidação (kPa), a e b são parâmetros empíricos, obtidos por meio do ajuste das curvas de regressão, e U é a umidade gravimétrica ( $\text{kg kg}^{-1}$ ). O parâmetro “a” variou de 2,65 a 2,68 e o “b” de -0,64 a -0,89. Os coeficientes de determinação foram todos significativos, a 1% de probabilidade, pelo teste de t-Student e variaram de 0,78 a 0,84 (Tabela 1).

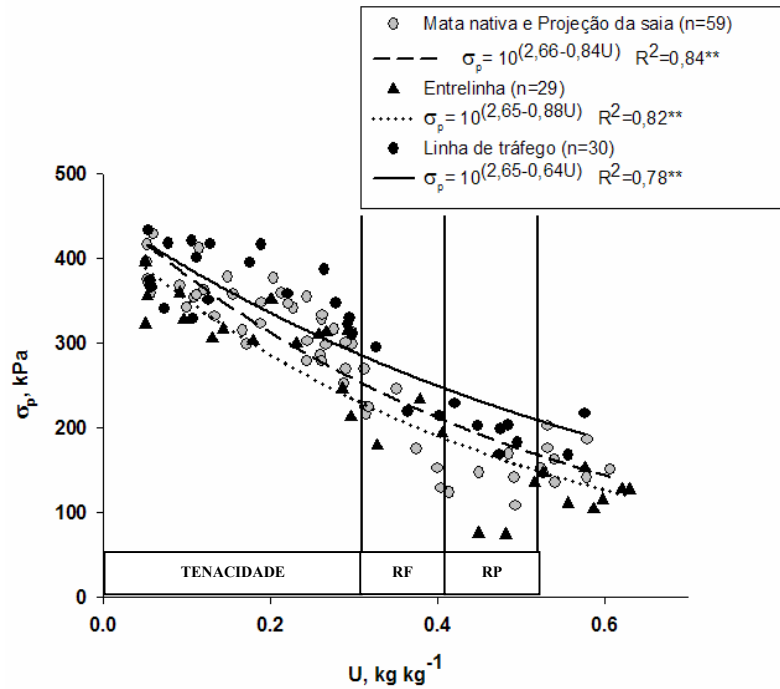


FIGURA 2 Modelo de capacidade de suporte de carga para mata nativa e projeção da saia, entrelinha e linha de tráfego. RF – região de friabilidade, RP – região de plasticidade.

A região de friabilidade (RF) é considerada a faixa de umidade adequada para o preparo do solo (Hillel, 1982). A faixa de pressões que podem ser aplicadas aos solos, na zona de friabilidade, com umidades variando de 0,41-0,31 kg kg<sup>-1</sup>, variaram de 207 a 251 kPa para MN e PS, de 194 a 238 kPa, para EL e de 244 a 283 kPa, para LT (Figura 2). Desse modo, pressões aplicadas ao solo maiores do que esses limites poderão provocar compactação adicional, mesmo na faixa de friabilidade, devido à capacidade de suporte de carga do solo ser excedida (Kondo & Dias Junior, 1999).

TABELA 1 Coeficientes dos modelos de capacidade de suporte de carga [ $\sigma_p = 10^{(a+bu)}$ ] para o Latossolo Vermelho distrófico, para os diferentes locais, na lavoura cafeeira e mata nativa

Local	a	b	R <sup>2</sup>
<b>Entrelinha</b>	2,65	-0,88	0,82**
<b>Projeção da saia</b>	2,68	-0,89	0,84**
<b>Linha de tráfego</b>	2,65	-0,64	0,78**
<b>Mata nativa</b>	2,65	-0,80	0,82**

a – intercepto da regressão linearizada; b – coeficiente angular da regressão linearizada; \*\* - significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste t-Student

Os três locais estudados na lavoura cafeeira apresentaram comportamentos distintos com relação à capacidade de suporte de carga, devido aos manejos diferenciados aplicados em cada local. Nesse caso, dentre os fatores que afetam a capacidade de suporte de carga de um solo, a história de tensão se destaca, justificando esse comportamento. A EL apresentou menor capacidade de suporte de carga devido ao processo de subsolagem realizado 14 meses antes da data de amostragem (janeiro de 2006), apagando toda a história de tensão existente nesse local da lavoura cafeeira. A LT possui uma história de tensão já estabelecida pelo tráfego desde a implantação da lavoura, apresentando maior capacidade de suporte de carga. A PS é o local onde atualmente não sofre influência direta do maquinário, mais que, no momento da implantação da lavoura pode ter sido trafegado, apresentando condição intermediária de capacidade de suporte de carga.

Para verificar possíveis alterações na estrutura do Latossolo Vermelho, causadas pelas condições de tráfego nos diferentes locais avaliados, todos os modelos de capacidade de suporte de carga foram comparados. Na tabela 2, observa-se que PS e MN não diferiram entre si, quanto à capacidade de suporte de carga do solo. Assim, uma nova equação foi ajustada, considerando todos os

valores de  $\sigma_p$  e U para cada local, obtendo-se um único modelo de capacidade de suporte de carga para esses dois locais (Figura 2).

TABELA 2 Teste de significância, descrito por Snedecor & Cochran (1989), entre os modelos de capacidade de suporte de carga [ $\sigma_p = 10^{(a+bU)}$ ] para o Latossolo Vermelho distrófico, para os diferentes locais na lavoura cafeeira e mata nativa

Localização	F	F	
		Coefficiente angular, b	Coefficiente linear, a
PS x MN	H	ns	ns
PS e MN x LT	H	*	**
PS e MN x EL	H	ns	*
LT x EL	H	*	**

PS - projeção da saia, MN - mata nativa; LT - linha de tráfego; EL - entrelinha; \*\* significativo a 1% de probabilidade, \* significativo, a 5 % de probabilidade; H - homogêneo; ns - não significativo.

Rena & Guimarães (2000) relatam que solos com grande resistência mecânica podem ser benéficos à trafegabilidade de máquinas para o manejo da lavoura cafeeira, porém, podem afetar severamente o desenvolvimento do sistema radicular e a absorção de água e nutrientes pelas raízes. Porém, a PS, onde se encontra a maior parte das raízes absorventes, apresentou o mesmo comportamento da MN quanto à capacidade de suporte de carga, revelando boas condições estruturais para desenvolvimento radicular.

A MN apresentou distribuição de poros semelhante à da EL (Tabela 3), porém, suporta mais carga que este local (Figura 2). Esse fato pode ser explicado pela agregação do solo, pois o solo referente à EL foi desestruturado pela realização de uma subsolagem e a MN apresenta um solo estruturalmente estável, reflexo da maior atividade biológica, com presença de hifas e deposição

de material biológico, conferindo-lhe maior agregação. Apesar de a MN apresentar maior teor de matéria orgânica, seus valores não diferem estatisticamente dos demais locais avaliados (Tabela 3). Assim, não é possível afirmar que o teor de matéria orgânica foi o fator que proporcionou a maior capacidade de suporte de carga do solo da MN, quando comparado com a EL. De acordo com Lebert & Horn (1991), a pressão de preconsolidação do solo depende não somente de atributos como densidade e umidade do solo, mas também de fatores relacionados com sua estrutura, como sua agregação. Silva & Cabeda (2006) verificaram correlação positiva entre resistência dos agregados à ruptura e pressão de preconsolidação, comprovando sua influência na capacidade de suporte de carga do solo.

Na tabela 3 estão apresentados os dados sobre a distribuição dos poros, a quantidade de água disponível, a relação entre macro e microporos, a densidade do solo e o teor de matéria orgânica nos diferentes locais na lavoura cafeeira e MN. O manejo adotado causou redução significativa do volume total de poros na LT e PS, quando comparado com a EL e MN. Esse menor volume total de poros se deve à redução do volume de macroporos, condicionando, inclusive, um aumento no volume de microporos no solo (Tabela 3), corroborando com Lipiec & Hatano (2003) e Yavuzcan et al. (2004).

Lipiec & Hatano (2003) relatam que o volume de macroporos é inversamente proporcional à compactação do solo, apresentando efeito direto no comportamento da água no solo, na movimentação de solutos e no crescimento radicular. Essa redução dos macroporos ocorreu devido ao colapso da estrutura do solo, reduzindo o volume dos poros de maior tamanho devido à carga excessiva aplicada ao solo nesses locais específicos da lavoura, principalmente na LT. Desse modo, a ocorrência do processo de compactação pode causar deformação dos agregados do solo, reduzindo os poros de maior tamanho. A quebra dos agregados produz fragmentos que preenchem os macroporos, criando

um espaço adicional de microporos (Starsev & McNabb, 2001). De acordo com Kiehl (1979), um solo em condições ideais deve apresentar 1/3 da porosidade total formada por macroporos e os 2/3 restantes por microporos, estabelecendo uma relação macroporos/microporos igual a 0,5, valor próximo aos encontrado nos locais mais compactados da lavoura (LT e PS). A maioria das plantas desenvolve satisfatoriamente seu sistema radicular quando a porcentagem de macroporos está acima de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Kiehl, 1979; Gupta & Allmaras, 1987), condição verificada no solo em todos os locais estudados (Tabela 3).

TABELA 3 Propriedades físico-hídricas do Latossolo Vermelho distrófico típico, utilizando média de 6 repetições

Local	VTP	Ma	Mi	AD	Ma/ Mi	Ds	MO
		$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$				$\text{Mg m}^{-3}$	$\text{g kg}^{-1}$
EL	0,66 a	0,30 a	0,36 b	0,11 a	0,82 a	0,87 b	35 a
PS	0,63 b	0,24 b	0,39 a	0,11 a	0,62 b	0,97 a	33 a
LT	0,61 b	0,21 b	0,40 a	0,10 b	0,54 b	1,01 a	33 a
MN	0,65 a	0,29 a	0,36 b	0,10 b	0,81 a	0,90 b	36 a

EL – entrelinha, PS – projeção da saia, LT – linha de tráfego, MN – mata nativa, VTP – volume total de poros; Ma – macroporosidade; Mi – microporosidade; AD – água disponível; Ds – densidade do solo; MO – matéria orgânica; Médias seguidas da mesma letra em cada coluna não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Observa-se, pela tabela 3, que, em comparação com a MN, os locais referentes à LT e PS sofreram redução na macroporosidade e aumento na porosidade de retenção de água, concordando com Oliveira et al. (2004), trabalhando em Latossolo Vermelho distrófico típico textura argilosa. Essa redução na VTP reflete nos maiores valores de densidade do solo observados nesses locais da lavoura cafeeira. Nota-se, portanto, que LT e PS apresentaram os valores de macroporosidade e relação macro/microporosidade próximos da faixa considerada ideal por Kiehl (1979). De acordo com Resende et al. (1999),

para latossolos mais intemperizados, com baixa capacidade de armazenamento de água para as plantas, a compactação do solo poderia ser benéfica em termos de retenção de água, dentro de certos limites, pela transformação de parte dos macroporos em microporos.

Foi utilizado o modelo de van Genuchten para predição da retenção de água no solo. De acordo com Assouline et al. (1997), alguns modelos analíticos podem ser utilizados para a predição da retenção de água no solo, porém o modelo de van Genuchten é preferido em relação aos demais. Analisando-se a figura 3 verifica-se que as curvas de retenção de água no solo foram influenciadas pelo processo de compactação, corroborando com os resultados obtidos por Dias Junior & Estanislau (1999). Com relação à distribuição de poros, os locais LT e PS são semelhantes estatisticamente (Tabela 3), refletindo no mesmo comportamento da curva de retenção de água nesses dois locais (Figura 3).

Desse modo, observam-se maiores valores de umidade residual nesses locais, que é a umidade obtida quando se aplica ao solo valores de sucção de -1500 kPa. Esse fato é explicado pela redução do potencial de superfície causado pela compressão do solo, aumentando os pontos de contato entre partículas e, conseqüentemente, a adsorção da água (Assouline et al., 1997). Os locais onde há menor espaço poroso apresentaram menor conteúdo de água volumétrico a baixas tensões e maior conteúdo de água em tensões mais altas, o que pode ser observado na curva de retenção de água (Figura 3). Esse fato se deve ao maior volume de microporos em relação aos locais não afetados pelo processo de compactação do solo (Tabela 3).

Desse modo, devido ao menor VTP, o conteúdo de água de saturação também será menor; por outro lado, em razão do maior volume de microporos há também um maior contato do solo com a água, possibilitando a maior

retenção a altas tensões (1500 kPa). Esses resultados corroboram com Assouline et al. (1997).

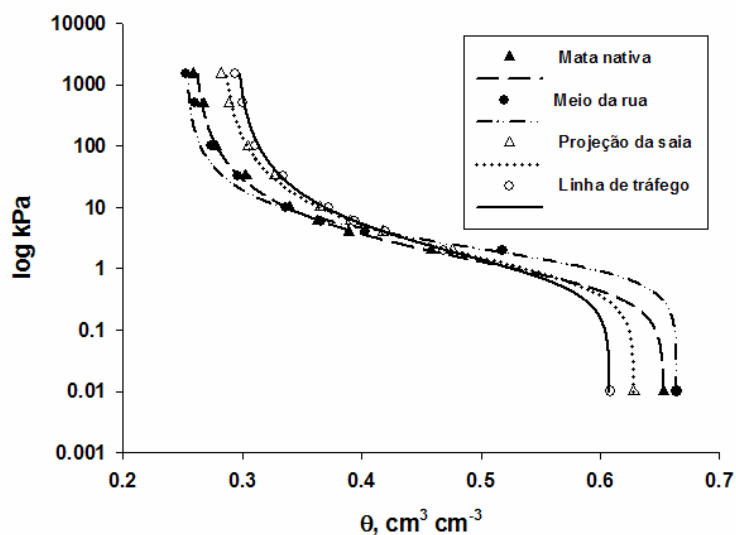


FIGURA 3 Curva de retenção de água no solo em diferentes regiões na lavoura cafeeira e mata nativa. As curvas representam a equação de van Genuchten.

Apesar dos valores semelhantes de água disponível (AD) em todos os locais, houve diferença estatística entre os locais avaliados, com EL e PS apresentando valores maiores em relação a LT e MN. Esse fato é importante, pois é na PS que se concentra a maioria das raízes absorventes, possibilitando a maior oferta de água em períodos de maior déficit hídrico.



#### **4 CONCLUSÕES**

A compactação do solo aumentou no sentido:  $EL < PS = MN < LT$ ;

Mesmo nos locais onde há menor espaço poroso, LT e PS, a relação entre macro e microporos foi considerada dentro da faixa ideal.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOULINE, S.; TAVARES FILHO, J. TESSIER, D. Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties: experimental results and modeling. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, p. 390-398, 1997.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo e produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 581-588, 2004.

BLAKE, G. F.; HARTGE, K. H. Particle density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2.ed. Madison: American Society Agronomy, 1986. p. 377-382. (Agronomy Monograph, 9).

BOWLES, J. E. **Engineering properties of soils and their measurements**. 3.ed. New York: McGraw-Hill, 1986. 218 p.

DAY, P. R. Particle fractionation and particle size analysis. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2.ed. Madison: American Society Agronomy, 1986. p. 545-567. (Agronomy Monograph, 9).

DIAS JUNIOR, M. S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114p. Dissertation (Ph.D.) - Michigan State University, East Lansing.

DIAS JUNIOR, M. S.; ESTANISLAU, W. T. Grau de compactação e retenção de água de Latossolos submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 45-51, 1999.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, v. 8, p. 139-151, 1995.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 175-182, 1996.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412 p.

FERREIRA, D. F. **Sisvar**. Sistema para análise de variância, para Windows versão 4.3. Lavras: Universidade Federal de Lavras Departamento de Ciências Exatas, 2000.

FLOWERS, M.; LAL, R. Axle load and tillage effect on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. **Soil Tillage Research**, v. 48, p. 21-35, 1998.

GROHMANN, F. Distribuição e tamanho de poros em três tipos de solos do Estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 19, p. 319-328, 1960.

GUPTA, S. C.; ALLMARAS, R. R. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, v. 6, p. 5-10, 1987.

HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. San Diego: Academic, 1982. 365p.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactibility and compressibility. In: SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C. (Ed.). **Soil compaction in crop production**. Elsevier, 1994. p. 45-69.

KIEHL, E. L. **Manual de edafologia**. São Paulo: Ceres, 1979. 262p.

KLUTE, A. **Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soils**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 253-261 (Monograph, 9).

KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p.211-218, 1999.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil & Tillage Research**, v. 19, p. 275-286, 1991.

LIMA, C. L. R.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S.; LIMA, H. V.; LEÃO, T. P. Heterogeneidade da compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 409-414, 2004.

LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. **Geoderma**, v. 116, p. 107-136, 2003.

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI, N.; RESCK, D. V. S. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 327-336, 2004.

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; RESCK, D. V. S.; CURI, N. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 291-299, 2003.

RAIJ, B. van; GUAGGIO, J. A. **Métodos de análises de solo para fins de fertilidade**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1983. 16p. (Circular, 63)

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 12, p. 211-216, 1988.

RENA, A. B.; GUIMARÃES, P. T. G. **Sistema radicular do cafeeiro: estrutura, distribuição, atividades e fatores que o influenciam**. Belo Horizonte: EPAMIG, 2000. 80p. (EPAMIG. Série Documentos, 37).

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 3.ed. Viçosa: NEPUT, 1999. 304p.

SÁ, M. A.; LIMA, J. M.; LAGE, G. Procedimento padrão para medida da potência liberada pelo aparelho ultra-som. Comunicação. **Ciência & Agrotecnologia**, v. 24, p. 300-306, 2000.

SHAPIRO, S. S. ; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, v. 52, p. 591-611, 1965.

SIGMA PLOT. **Scientific Graphing Software**. Versão 8.0. San Rafael: Jandel Corporation, 2002. Software.

SILVA, A. J.; CABEDA, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 921-930, 2006.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, p.1775-1781, 1994.

SILVA, E. M.; MALVINO, S. S. A. B. Análise climática do município de Patrocínio (MG). **Caminhos da Geografia**, v. 10, p. 93-108, 2005.

SNEDECOR, G. W.; COCHARAN, W. G. **Statistical methods**. 8.ed. Ames: Iowa State University, 1989. 503 p.

SOWERS, G. F. Consistency. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis physical and mineralogical properties including statistics of measurement and sampling**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. pt. 1, p. 391-399.

STARTSEV, A. D.; McNABB, D. H. Skidder traffic effects on water retention, pore-size distribution, and van Genuchten Parameters of Boreal forest soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p. 224-231, 2001.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: J. Wiley, 1948. 700 p.

TAYLOR, H. M.; BRAR, G. S. Effects of soil compaction on root development. **Soil & Tillage Research**, v. 19, p. 111-119, 1991.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 892-898, 1980.

YAVUZCAN, H. G.; MATTHIES, D.; AUERNHAMMER, H. Vulnerability of Bavarian silty loam soil to compaction under heavy wheel traffic: impacts of tillage method and soil water content. **Soil & Tillage Research**, v.84, n. 2, p. 200-215, Dec. 2005.

### **CAPÍTULO 3**

#### **SPATIAL PATTERNS OF PRECONSOLIDATION PRESSURE AND SOIL MOISTURE CONTENT ALONG TRANSECTS IN TWO DIRECTIONS UNDER COFFEE PLANTATION**

## ABSTRACT

GONTIJO, Ivoney. Spatial patterns of preconsolidation pressure and soil moisture content along transects in two directions under coffee plantation. In: \_\_\_\_\_ **Spatial variability in compressive behavior in two latosols (Oxisols) under different uses**. 2007. Cap. 3, p. 76-94. Thesis (Doctorate in Soil Science) – Federal University of Lavras, Lavras, Minas Gerais. Brazil. \*

Information on the spatial structure of soil physical and structural properties is needed to evaluate the soil quality. The purpose of this study was to investigate the spatial behavior of the preconsolidation pressure and of the soil moisture content in six selected transects: three along and three across coffee rows, at three different sites under different tillage management practices. The research was carried out at a farm located in Patrocinio county, Minas Gerais State, Southeast of Brazil. The soil type is Oxisol with an average field slope of 3%. Undisturbed soil core samples were taken in three different positions within the coffee plantation a) in the track, where there is a track caused by equipment wheel used in farm operations; b) in the between track and c) under the coffee crop canopy. Six linear transects were established in the experimental area: three transects along the coffee rows and three across the rows. 161 samples were collected in the transect across the coffee rows, in the three sites, while 117 samples were collected along the row directions. The shortest sampling distance on the transect across the row was 4 m, and 0.5 m for the transect along the row. The preconsolidation pressure values exhibited no clear patterns in the 200-m transect. The semivariograms results for both variables indicated high nugget value and short range for the studied parameters on all transects. A cyclic pattern of the parameters was observed on the transect across the row. An inverse relationship between preconsolidation pressure and moisture content was better visualized in the samples collected along the track, in both directions.

---

\* Guidance Comittee: Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Junior, DCS/UFLA (Adviser), Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães, CTSM/EPAMIG (Co-adviser), Prof. Dr. Marcelo Silva de Oliveira, DEX/UFLA (Co-adviser).

## RESUMO

GONTIJO, Ivoney. Padrões espaciais da pressão de preconsolidação e da umidade do solo ao longo de transectos em duas direções na lavoura cafeeira. In: \_\_\_\_\_. **Variabilidade espacial do comportamento compressivo de dois latossolos sob diferentes usos**. 2007. Cap. 3, p. 76-94. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. \*

Informações sobre a estrutura espacial das propriedades físicas e estruturais do solo são necessárias para avaliar a qualidade do solo. O objetivo do presente estudo foi investigar o comportamento espacial da pressão de preconsolidação e da umidade do solo em seis transectos: três ao longo e três através das linhas de plantio do café, em três locais com diferentes condições de tráfego. O experimento foi conduzido em uma fazenda localizada em Patrocínio, no estado de Minas Gerais. O solo foi classificado como sendo um Latossolo Vermelho distrófico, com declividade média de 3%. Amostras indeformadas foram coletadas em três diferentes locais na lavoura cafeeira: na linha de tráfego; na entrelinha e sob a projeção da saia do cafeeiro. Foram dispostos seis transectos lineares na área experimental: três transectos ao longo das linhas de plantio e três através das linhas de plantio. Assim, 161 amostras foram coletadas nos transectos através das linhas nos três locais estudados e 117 amostras foram coletadas ao longo das linhas de plantio, em cada um dos locais avaliados. A menor distância entre os pontos amostrados foi de 4 m através dos transectos e 0,5 m no sentido das linhas de plantio. Os valores de pressão de preconsolidação não exibiram padrões claros nos transectos. Os resultados dos semivariogramas para ambas as variáveis indicaram alto efeito pepita e curtos alcances em todas as situações estudadas e em todos os transectos. Um padrão cíclico dos parâmetros foi observado nos transectos através das linhas de plantio. A relação inversa entre a pressão de preconsolidação e a umidade do solo foi melhor visualizada nas amostras coletadas na linha de tráfego, em ambas as direções avaliadas.

---

\* Comitê Orientador: Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Junior, DCS/UFLA (Orientador), Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães, CTSM/EPAMIG (Co-orientador), Prof. Dr. Marcelo Silva de Oliveira, DEX/UFLA (Co-orientador).



## 1 INTRODUCTION

Nowadays, the main problem that may limit agricultural production and induce a degradation of environmental quality, under mechanized agricultures is soil compaction. This is quite prevalent in coffee crop plantation, where there is intensive traffic because of the mechanization level in all the stages of production. Thus, a better knowledge of the effects the soil compaction is needed in order to identify preventions strategies.

Preconsolidation pressure ( $\sigma_p$ ) is commonly defined as the highest pressure that the soil has been subjected in the past (Dias Junior & Pierce, 1996) and it is a measure of soil bearing capacity. The  $\sigma_p$  is obtained from the soil compression curve, which relate the bulk density to the logarithm of the applied pressure. The application of pressures smaller than the  $\sigma_p$  to the soil causes elastic deformations, while the application of pressures larger than  $\sigma_p$ , causes plastic deformations. This soil property has been used by several authors as indicator of soil structure sustainability in given soil moisture condition (Kondo & Dias Junior, 1999; Imhoff et al., 2001; Silva et al., 2003; Oliveira et al., 2003). However, relatively few studies have approached soil physical properties in terms of their spatial variability, mainly mechanical soil properties.

Only in recent years scientists have begun to study the variation of soil properties using geostatistical methods in which the structural distribution of a given soil parameter over space can be investigated (Davidoff & Selim, 1988). The semivariogram is a more adequate and informative tool to measure the structural variation of a variable of interest (Vieira et al., 1983). This method of analysis has been used to investigate the spatial variability of several soil physical properties. The geostatistics approach has received considerable attention in the agricultural sciences in recent years and has been applied to quantify the spatial variability of different soil properties. Geostatistical analyses

have been used to estimate spatial variability of soil compaction (Utset & Cid, 2001; Kondo, 2003; Ferrero, 2005), bulk density (Ferrero, 2005; Greco & Vieira, 2005) and soil water content (Davidoff & Selim, 1988; Libardi et al., 1996). Better knowledge of the patterns of variability of the preconsolidation pressure and of the causes of these patterns is needed to improve soil sampling methods for this soil property and planning a better strategy for traffic in the area.

Therefore, the increase of interest in spatial behavior of soil compaction emphasizes the need to quantify the spatial distribution of this property. The purpose of this study was to investigate the spatial behavior of preconsolidation pressure and soil moisture content in six selected transects: three along and three across coffee rows, at three different sites under different tillage management practices.

## 2 METHODS

The research was carried out in a farm located in Patrocínio county, Minas Gerais state, southeast of Brazil (lat. 18°59'15'' S, long. 46°56'47'' W elev. 934m) with an average field slope of 3%. The climate, according to Köppen classification, is classified as Aw type. The annual mean temperature is 22°C and the mean annual precipitation of approximately 1.370 mm with dry winter and rainy summer, presenting a much defined rain period, occurring in the months of December, January and February; more than 50% of the annual mean precipitation (Brasil, 1992). The coffee plantation (*Coffea arabica* L), with rows in the direction contrary to the slope, was established in a Oxisol. The soil characterization is showed in the table 1. The coffee farm under different tillage management practices was installed in 1995 and the weeds were managed by chemical control.

TABLE 1 Soil physical properties of the Oxisol

Site	TSP	Ma	Mi	BD	PD	Clay	Silt	Sand	OM
	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$			$\text{Mg m}^{-3}$			$\text{g kg}^{-1}$		$\text{g kg}^{-1}$
<b>BT</b>	0.66	0.30	0.36	0.87	2.71				35
<b>C</b>	0.63	0.24	0.39	0.97	2.67	780	110	110	33
<b>T</b>	0.61	0.21	0.40	1.01	2.69				33

BT – between track; C – canopy; T - track; TSP – total soil porosity; Ma – macroporosity; Mi – microporosity; BD – bulk density do solo; PD – particle density, OM – organic mater

The undisturbed soil samples were collected in January of 2006, which is the rainiest period, therefore more critical for the soil structure. The samples were taken in three different positions within the coffee plantation: a) in the track, where there is a track caused by wheel of the equipment used in farm operations; b) in the between track and c) under the coffee crop canopy. Six linear transects were established in the experimental area: three transects along

the coffee rows and three across the rows (Figure 1). All the soil samples were taken using an Uhland equipment. In the direction across the coffee rows, 161 samples were collected consisting of 46 samples under the canopy and between-row and 69 samples along the track. In the other direction, associated with coffee row (along rows), 117 samples were collected for each site, these transects were oriented parallel to the row of coffee plantation. The shortest distance between the samples collected across the row direction was 4 m and along the row direction was 0.5 m.

The nature moisture content of the soil samples were preserved by using wax covering and used in the uniaxial compression test (Bowles, 1986). For the uniaxial compression tests the undisturbed soil samples were kept within the coring cylinders, which were placed into the compression cell and subsequently subjected to pressures 25, 50, 100, 200, 400, 800 and 1600 kPa. Each pressure was applied until 90% of the maximum deformation was reached and then the pressure was increased to the next level (Taylor, 1948).

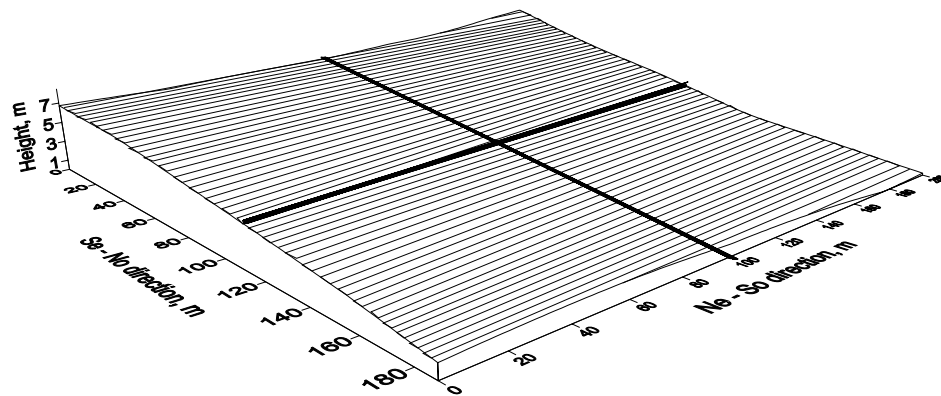


FIGURE 1 Three dimensional representation of surface elevations and transects locations, across and along the coffee rows.

On the average, 17 tractor passes were recorded in a year in all rows, due to the management of the coffee plantation. Traffic patterns related to the management were along the coffee rows across the slope at the same location. The farm uses Valmet 785<sup>®</sup> brand of tractor with a mean weight 2.95 Mg.

Data collected were the first subject to classical statistical analyses to obtain descriptive statistics such as mean, range, standard deviation, and normality tests.

Variography was used to uncover patterns of spatial correlation between sampling positions and as an additional tool to reveal periodic trends on data set. Unidirectional sample semivariograms were calculated for each transect. The semivariogram was calculated by taking all pairs of observations at a lag distance  $h$  apart and averaging the square of their differences. This was done for all possible lag distances,  $h$ , and the resulting function  $\gamma(h)$ , is then given by (Vieira et al., 1983):

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

where  $z(x_i)$  is the value of the variable  $z$  at sample location  $x_i$ , and  $z(x_i + h)$  is the value of the variable  $z$  at a distance  $h$  away from  $x_i$ . There are  $n(h)$  pairs of sample locations that are a distance  $h$  apart. The semivariogram is then plotted with  $h$  on the x-axis (the lag or separation distance) and  $\gamma(h)$  on the y-axis (the semivariance). A random distribution of semivariances along a horizontal line suggests no spatial dependency among sampling positions. The intercept of the line with the ordinate axis defines the nugget semivariance, which represents random variability, measurement error, and spatially dependent variability with a range smaller than the minimum separation distance (Journel & Huijbregts, 1978). Semivariances were calculated with version 5.1 of the GS+ geostatistical

package (Robertson, 1998), and at least 33 pairs of observations were used in the calculations.

### 3 RESULTS AND DISCUSSION

The distribution of the preconsolidation pressure and moisture content in all site of coffee plantation, as well as the distribution along and across the coffee rows, are shown in figure 2. A statistical summary of the properties for the two variables is given in table 2. The highest variability was found in the between track sites for both variables (Table 2); and is evidenced by the scattered distribution of the data (Figure 2), although the low CV values (Warrick & Nielsen, 1980). This observation may be attributed to the periodic disturbance of this site in past years caused by subsoiling process. Considering that the preconsolidation pressure is an indicative of the maximum applied pressure to the soil in the past (Dias Junior, 1994), it was observed that the track site presented highest  $\sigma_p$  values in both directions, followed by the canopy and the between track. For the moisture content, the highest values were found under the coffee crop canopy. This could be attributed to reduced evaporation under the canopies due to limited soil surface exposure to sunshine.

In spite of the experimental semivariogram and the estimation procedures produced by geostatistics do not depend on what distribution the samples follow (Clark, 1979), the Shapiro–Wilk statistic (W) was computed for each complete data set to test the normality of the distributions (Shapiro & Wilk, 1965). All data sets, for both soil properties, presented normal distribution according skewness and kurtosis values and with Shapiro-Wilk test, except in the  $\sigma_p$  in the track site across the rows and moisture content in the between track along rows. This way, normal and log-normal distributions are commonly assumed for soil physical properties (Warrick & Nielsen, 1980).

TABLE 2 Descriptive statistics for preconsolidation pressure ( $\sigma_p$ ) and soil moisture content values (200 m transects across and along rows)

Direction	Site	Mean <sup>(1)</sup>	Var	CV	Min	Max	Skew.	Kurt.	W
Across	BT	289.19 b	958.00	10.70	223.88	355.38	0.22	-0.37	0.9745
	C	288.59 b	740.63	9.43	228.42	336.76	-0.26	-0.59	0.9809
	T	312.41 a	799.89	9.05	256.99	358.71	-0.36	-0.91	0.9496 <sup>(2)</sup>
Along	BT	288.90 c	1280.45	12.39	202.08	367.43	-0.29	-0.47	0.9822
	C	298.24 b	635.51	8.45	245.54	353.42	0.26	-0.14	0.9905
	T	324.64 a	665.63	7.95	265.05	394.87	0.20	-0.17	0.9923
Across	BT	0.2971 c	0.00015	3.99	0.2609	0.3215	-0.51	0.73	0.9693
	C	0.3166 a	0.00010	3.15	0.2949	0.3405	-0.18	-0.24	0.9713
	T	0.3050 b	0.00012	3.66	0.2827	0.3291	0.03	-0.46	0.9846
Along	BT	0.2975 b	0.00031	5.96	0.2400	0.3274	-0.70	0.76	0.9576 <sup>(2)</sup>
	C	0.3110 a	0.00015	3.95	0.2820	0.3414	0.30	0.03	0.9856
	T	0.2985 b	0.00014	3.98	0.2595	0.3225	-0.33	0.11	0.9842

Var – sample variance, CV – coefficient of variation, Min – minimum value, Max – maximum value, BT – between track, C – canopy, T – track, Skew. – Skewness, Kurt. – Kurtosis, W – Shapiro-Wilk statistic. <sup>(1)</sup>Values differ significantly when followed by different letters for each site data set into each direction (according Student's test P=0.05). <sup>(2)</sup> Data set that do not present normal distribution.

In general, the observed values were generally scattered around the mean along the transects with no apparently obvious pattern. The more obvious periodic pattern was observed in the between track site, in both directions and variables (Figure 2). This observation may be explained by the fact that site is more sensitive to the external factors and due to the subsoiling operation, as mentioned previously. Also this site presents more distinct variability as indicated by its high coefficient of variation (CV). It should be noted that there is an opposite pattern in the spatial distribution between  $\sigma_p$  and moisture content, mainly in the direction along rows, as showed in the cross-semivariogram (Figure 3). This observation is expected because the soil moisture content is the major factor regulating the compressive behavior of the soil (Dias Junior, 1994), therefore when the moisture content is high the soil bearing soil capacity is low.



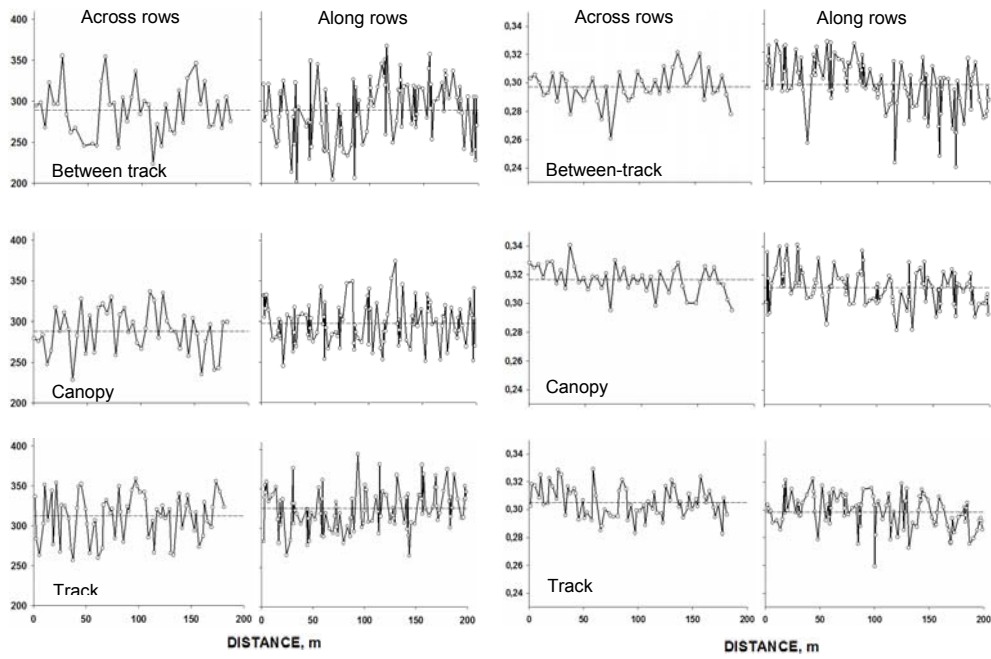


FIGURE 2 Spatial distribution of preconsolidation pressure and soil moisture content for three sites in coffee plantation from 200-m transects across and along the direction of crop rows

The cross-semivariograms of the preconsolidation pressure and soil moisture content in all studied sites and in both directions are shown in figure 3. Unlike semivariogram, cross-semivariograms can be negative. A negative cross-semivariogram is an indication of an inverse relation between the two variables. A visual inspection of the cross-semivariograms indicates, a negative correlation between  $\sigma_p$  and moisture content was obtained for most of situations, i.e., an increase of moisture content was related to a decrease in the preconsolidation pressure and vice versa. Therefore, when soil moisture content is high, careful attention should be placed on the traffic intensity, due to the lower soil bearing

capacity and consequent higher possibility to damage the soil structure. Such an inverse relation was not distinctly visible for all situations, mainly for the between track site across rows transect (Fig. 2). Contrary to expectations, this behavior was not found in the between track sites across rows and in the canopy along the rows. These findings can be explained by the small natural moisture content interval used, that was not large enough to detect such variation.

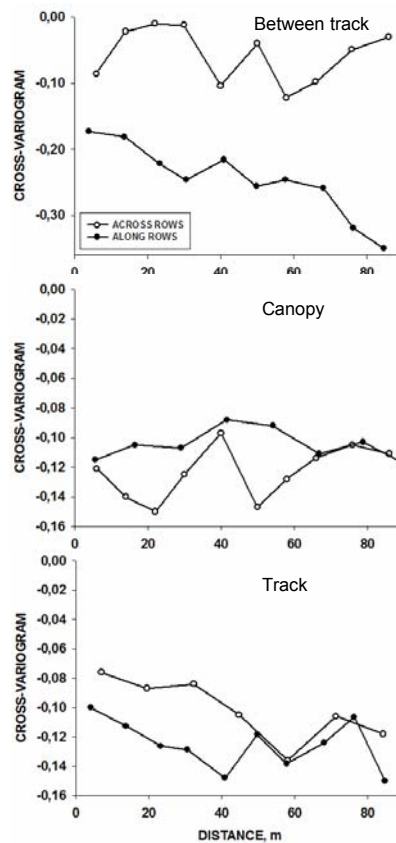


FIGURE 3 Cross-semivariograms between preconsolidation pressure and moisture content, in all sites and both directions.

The nature of soil variability identified by spatial studies of soil properties depends largely on the scale of the observation (Trangmar et al., 1985). It was used in this study two kinds of observation, with 90 m and 30 m (Figure 4). It is important to observe that when we use observation of 30 m, it is possible to see variation in small distance. The between track site presented high values of variability as was indicated by the high CV values. For moisture content it was high sample variances along the rows direction in all studied sites. This observation was contrary to the results obtained by Mallarino (1996), that reported high variability across rows when compared with along rows direction; and for  $\sigma_p$  was verify higher spatial structure along rows only for between track site. Semivariances normally presented low or nothing spatial structure presenting pure nugget. When there was spatial structure, it was possible visualized better when we use observation of 30 m (Figure 4). This observation may be explained by extrinsic variations, such as tillage, that may control the variability of these weakly spatially dependent parameters (Cambardella et al., 1994). In some situations it is possible to observe the periodicity in the semivariograms, which is called “hole effect”, and it is an indicative of nonmonotonic growth of the semi-variance with distance (Journel & Huijbregts, 1978). The spatially repetitious behavior of soil observations may probably be as a result of cyclic tillage traffic and cropping patterns in cultivated fields (Nielsen et al., 1983). The “hole effect” was more common in across rows direction, therefore it may be the consequence of soil management. Normally a “hole effect” occurred in one predominant direction, except for moisture content in the a canopy site in observation of 30 m. This periodic effect is present only in a certain direction because of the periodicity of the soil processes that does not generally operate isotropically (Trangmar et al., 1985). This result is not surprising because clusters of high and low values and periodic trends are evident on some transects (Figure 2).

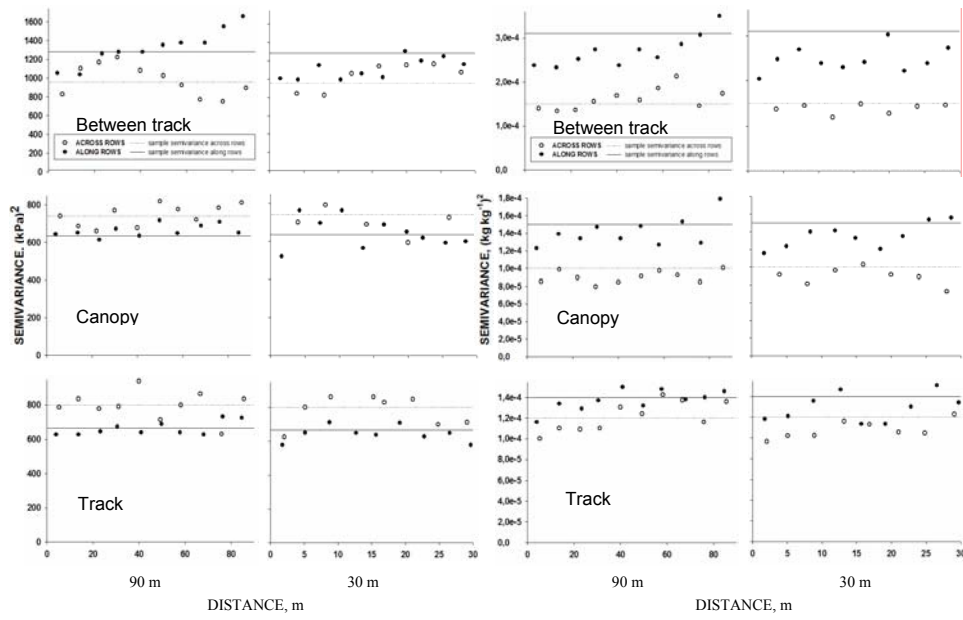


FIGURE 4 Experimental semivariograms for preconsolidation pressure and moisture content, in all sites and both directions.

#### **4 SUMMARY AND CONCLUSIONS**

The Preconsolidation Pressure exhibited no distinct spatial patterns in the 200 m transect. The semivariograms results for both variables indicated high nugget value and short range for the studied parameters on all transects. A cyclic pattern of the parameters was observed on the transect across the row.

From the results of natural soil moisture content spatial distribution, an inverse relationship between preconsolidation pressure and moisture content was better visualized in the samples collected along the track, in both directions.

## 5 REFERENCES

- BOWLES, J. E. **Engineering properties of soils and their measurements**. 3.ed. New York: McGraw-Hill, 1986. 218 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. **Normas climatológicas**. Brasília, 1992. 84 p.
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, p. 1501-1511, 1994.
- CLARK, I. **Practical geostatistics**. London: Applied Science, 1979.
- DAVIDOFF, B.; SELIM, H. M. Correlation between spatially variable soil moisture content and soil temperature. **Soil Science**, v. 145, p. 1-10, 1988.
- DIAS JUNIOR, M. S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114p. Ph.D. (Dissertation in Crop and Soil Science) - Michigan State University, East Lansing.
- DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 175-182, 1996.
- FERRERO, A.; USOWICZ, B.; LIPIEC, J. Effects of tractor traffic on spatial variability of soil strength and water content in grass covered and cultivated sloping vineyard. **Soil & Tillage Research**, v. 84, p. 127-138, 2005.
- GRECO, C. R.; VIEIRA, S. R. Spatial variability of soil physical properties on an experimental plot. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 169-177, 2005.
- IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; DIAS JUNIOR, M. S.; TORMENA, C. A. Quantifying critical pressures for plant growth. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 11-18, 2001.
- JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. **Mining geostatistics**. New York: Academic, 1978.

- KONDO, M. K. **Spatial variability of the soil compressive behavior and trafficability maps in irrigated coffee crop.** 2003. 166 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Soil compressibility of three latosols (Oxisols) as a function of moisture and use. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 211-218, 1999.
- LIBARDI, P. L.; MANFRON, P. A.; MORAES, S. O.; TUON, R. L. Gravimetric soil water content variability of a hydromorphic soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 1-12, 1996.
- MALLARINO, A. P. Spatial variability patterns of Phosphorus and Potassium in no-tilled soils for two sampling scales. **Soil Science Society of America Journal**, v. 60, p. 1473-1481, 1996.
- NIELSEN, D. R.; TILLOTSON, P. M.; VIEIRA, S. R. Analyzing field-measured soil-water properties. **Agricultural Water Management**, v. 6, p. 93-109, 1983.
- OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. D.; CURI, N.; RESK, D. V. S. Compressibility of a clayey red Latosol as a function of water tension, use and management of the soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 773-781, 2003.
- ROBERTSON, G. P. **GS: geostatistics for the environmental sciences** (version 5.1 for windows). Gamma Design Software, 1998. 152 p.
- SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality. **Biometrika**, v. 52, p. 591-611, 1965.
- SILVA, A. P.; IMHOFF, S.; CORSI, M. Evaluation of soil compaction in irrigated short-duration grazing system. **Soil & Tillage Research**, v. 70, p. 83-90, 2003.
- TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics.** New York: J. Wiley, 1948. 700 p.
- TRANGMAR, B. B., YOST, R. S., UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, v. 38. p. 45-94, 1985.

UTSET, A.; CID, G. Soil penetrometer resistance spatial variability in a Ferrasol at several soil moisture conditions. **Soil & Tillage Research**, v. 61, p. 193-202, 2001.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, v. 51, p. 1-75, 1983.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic, 1980. p. 319-344.



## **CAPÍTULO 4**

### **COMPORTAMENTO ESPACIAL DO PROCESSO COMPRESSIVO DE UM LATOSSOLO EM UMA LAVOURA CAFEIEIRA**

## RESUMO

GONTIJO, Ivoney. Comportamento espacial do processo compressivo de um latossolo em uma lavoura cafeeira. In: \_\_\_\_\_. **Variabilidade espacial do comportamento compressivo de dois latossolos sob diferentes usos**. 2007. Cap. 4, p. 95-120. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. \*

A mecanização excessiva aplicada aos solos dos cerrados, sob cafeicultura, tem comprometido suas propriedades físicas, principalmente quando realizada em condições inadequadas de umidade. Este trabalho teve como objetivo caracterizar a variabilidade espacial da pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) em diferentes locais na lavoura cafeeira, bem como a geração de mapas de trafegabilidade nas diferentes condições de tráfego. O estudo foi realizado em uma lavoura de café (*Coffea arabica* L.), implantada no ano de 1995, no município de Patrocínio, MG. A área total do experimento é de 40.000 m<sup>2</sup>, implantado no espaçamento de 4 x 1 m. A vegetação predominante da região é do tipo cerrado. O relevo é plano a suave ondulado, com declividade média de 3%, sendo o solo classificado como um Latossolo Vermelho distrófico típico, textura muito argilosa. As amostras foram coletadas, na profundidade de 10-13 cm, num total de 828 amostras indeformadas, sendo: 250 na entrelinha (EL), 251 na projeção da saia (PS) e 327 linha de tráfego (LT). Para cada um desses locais foram obtidos os semivariogramas com os respectivos mapas de isolinhas. A análise Geoestatística, efetuada por meio do semivariograma, mostrou que todos os atributos do solo estudado apresentaram dependência espacial, com semivariogramas ajustando-se ao modelo esférico, com valores R<sup>2</sup> variando de 0,81 a 0,99. A  $\sigma_p$  e a umidade do solo apresentaram dependência espacial moderada para todos os locais avaliados; observou-se maior continuidade espacial da  $\sigma_p$ , com maior valor de alcance, na PS. No mapa referente à LT, que é o local mais crítico em relação à compactação do solo, as bordas da lavoura apresentaram maiores valores de  $\sigma_p$ , indicando maior grau de degradação estrutural.

---

\* Comitê Orientador: Dr. Moacir de Souza Dias Junior – UFLA (Orientador), Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães – EPAMIG (Co-orientador), Dr. Marcelo Silva de Oliveira - UFLA (Co-orientador).

## ABSTRACT

GONTIJO, Ivoney. Spatial behavior of the soil compressive process in latosol (Oxisol) under coffee plantation. In: \_\_\_\_\_ **Spatial variability in compressive behavior in two latosols (Oxisols) under different uses**. 2007. Cap. 4, p. 95-120. Thesis (Doctorate in Soil Science) – Federal University of Lavras, Lavras, Minas Gerais. Brazil. \*

The excessive mechanization applied to Cerrado soils, under coffee plantation, can damage their physical properties, mainly when it occurs in inadequate moisture conditions. The purpose of this study was to characterize the spatial variability of the preconsolidation pressure ( $\sigma_p$ ) in different positions in the coffee plantation, as well as to make trafegability maps in different traffic conditions. The research was carried out in a coffee plantation (*Coffea arabica* L.), located in Patrocínio county, Minas Gerais State, Southeast of Brazil. The soil type is Red Latosol (Oxisol) with an average field slope of 3%. The samples were collected, at 10-13 cm depth, with a total of 828 undisturbed soil samples, being: 250 for between track (BT), 251 for canopy (C) and 327 for track (T). For each one position was obtained the semivariograms and their respective maps. The geostatistics analysis showed that all of the soil attributes studied presented spatial dependence, with semivariograms being adjusted to the spherical model, with  $R^2$  varying from 0.81 to 0.99. The  $\sigma_p$  and soil moisture content presented moderate spatial dependence for all the studied places. It was observed larger spatial continuity of  $\sigma_p$ , with larger range value, in the canopy. In the maps of wheel track, that is the most critical position in relation to the soil compaction, the borders of coffee plantation presented larger values of  $\sigma_p$ , indicating larger degree of structural degradation.

---

\* Guidance Comittee: Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Junior, DCS/UFLA (Adviser), Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães, CTSM/EPAMIG (Co-adviser), Prof. Dr. Marcelo Silva de Oliveira, DEX/UFLA (Co-adviser).

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café, com produção estimada de 42,5 milhões de sacas beneficiadas na safra 2006. Nesta mesma safra, o estado de Minas Gerais foi responsável por mais da metade (50,9 %) da produção brasileira (Conab, 2007).

Na região dos cerrados, a cafeicultura tem se desenvolvido de forma acelerada, em razão da alta tecnologia empregada. Juntamente com o avanço da cafeicultura no cerrado, há também um incremento na intensidade de mecanização em todas as suas etapas, desde a instalação até a fase de colheita (Silva et al., 2006). Dentre as regiões produtoras de café em Minas Gerais, as regiões do Triângulo Mineiro e do Alto Paranaíba se destacam pela maior utilização de máquinas agrícolas, devido, principalmente, à topografia favorável (Faemg, 1996) além do alto custo com mão-de-obra.

A mecanização excessiva aplicada aos solos da região dos cerrados tem comprometido suas propriedades físicas, como: a densidade do solo, o volume total de poros e a macroporosidade (Guimarães, 2000). Essas características podem comprometer a sustentabilidade do ambiente agrícola devido à ocorrência do fenômeno da compactação. Segundo Flowers & Lal (1998), o uso de máquinas agrícolas nas várias etapas do processo produtivo tem sido o principal responsável pela grande maioria do processo de compactação do solo, acarretando danos à sua estrutura, principalmente quando o solo é trafegado em condições inadequadas de umidade (Dias Junior & Pierce, 1996).

Em lavouras cafeeiras, o aumento da intensidade das operações mecanizadas ocorre na estação chuvosa (Araujo Junior, 2007), principalmente as operações de adubação. Nessa época, o solo encontra-se com alta umidade, o que aumenta o potencial para a degradação da sua estrutura (Dias Junior et al., 2005).

A pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) vem se destacando como uma ferramenta eficaz na detecção de áreas sujeitas à ocorrência do processo de compactação, funcionando como um eficiente indicador de sustentabilidade estrutural do solo. Ao contrário de outros indicadores físicos de sustentabilidade do solo, como densidade do solo, porosidade total e resistência à penetração (Imhoff et al., 2001), a  $\sigma_p$  é capaz de quantificar os níveis de pressão que podem ser aplicados aos solos sem que haja compactação adicional (Dias Junior, 1994). Estudando os efeitos de diferentes sistemas de manejo de plantas daninhas em lavoura cafeeira, Araujo Junior (2007) verificou que a  $\sigma_p$  foi mais sensível em detectar as alterações estruturais no solo do que a densidade do solo.

É importante conhecer a variabilidade espacial da  $\sigma_p$  para definir estratégias de manejo que minimizem a degradação da estrutura do solo, pois a maioria das propriedades do solo não varia aleatoriamente, mas apresenta correlação espacial (Miller et al., 1988) que pode variar de acordo com a prática de manejo adotada.

A variabilidade do solo é consequência de complexas interações entre fatores e processos de sua formação. Além dos fatores e processos, práticas de manejo do solo e da cultura são causas adicionais de variabilidade. Áreas pedologicamente idênticas podem apresentar variabilidade distinta em atributos, quando submetidas às diferentes práticas de manejo. Da mesma forma, áreas pedologicamente diferentes, quando submetidas ao mesmo manejo, podem apresentar-se semelhantes em seus atributos (Corá et al., 2004). Assim, torna-se necessário a utilização de procedimentos complementares como a geoestatística, que visem um maior conhecimento da variabilidade espacial do solo.

O semivariograma é uma das ferramentas da Geoestatística, utilizada para determinar a variabilidade espacial de atributos do solo, expressando o grau de dependência espacial entre pontos amostrais. O semivariograma e seus parâmetros são utilizados na krigagem (Isaaks & Srivastava, 1989), que constitui

de uma técnica de interpolação para estimativa dos valores de determinadas propriedades em locais não amostrados, possibilitando a confecção de mapas de isolinhas.

Estudos que abordam a capacidade de suporte de carga associada a trabalhos que levem em consideração as coordenadas geográficas dos pontos e a continuidade espacial, como a variabilidade espacial, são fundamentais na adoção de mapas de trafegabilidade. Os mapas de trafegabilidade podem auxiliar no manejo adequado do solo, possibilitando a tomada de decisão sobre onde e quando trafegar sem causar compactação adicional, sendo, portanto, uma ferramenta com grande potencial na busca do manejo sustentável do solo. A adoção da variabilidade espacial no estudo da compactação do solo gerando mapas de trafegabilidade já foi abordada por alguns autores como perspectiva de estudos futuros (Dias Junior & Pierce, 1996; Defossez & Richard, 2002; Kondo, 2003), podendo ser integrado como parte de um sistema completo no processo da agricultura de precisão.

Este trabalho teve como objetivo caracterizar a variabilidade espacial da  $\sigma_p$  em diferentes locais na lavoura cafeeira, bem como gerar mapas de trafegabilidade nas diferentes condições de tráfego.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em uma lavoura de café (*Coffea arabica* L.) implantada no ano de 1995, localizada no município de Patrocínio, MG. Antes da implantação da lavoura cafeeira, a área foi utilizada com pastagem. A área total do experimento é de 40.000 m<sup>2</sup>, sendo a lavoura implantada com espaçamento de 4 x 1 m. A área encontra-se a 18°59'15'' de latitude Sul e a 46°56'47'' de longitude a Oeste de Greenwich e a uma altitude de 934 m.

O município de Patrocínio está inserido em uma área geologicamente complexa conhecida como Arco da Canastra, que separa as bacias sedimentares do São Francisco e do Paraná. O clima da região, segundo a classificação de Koppen, é do tipo Aw, com duas estações bem definidas, inverno seco e verão chuvoso, com precipitação média anual de 1.620,1 mm (Silva & Malvino, 2005). A vegetação predominante da região é do tipo cerrado. O relevo é plano a suave ondulado, com declividade média de 3%, sendo do solo classificado como um Latossolo Vermelho distrófico típico (Embrapa, 1999) de textura muito argilosa, caracterizado na tabela 1.

A análise textural foi realizada utilizando-se o processo de ultra-som, devido à forte agregação encontrada nos latossolos. Foi utilizado um aparelho da marca Misonix<sup>®</sup>, modelo XL2020, operando a 20 kHz. A potência aplicada foi de 60 Watts, durante 5 minutos, proporcionando energia de 90 J mL<sup>-1</sup>, conforme técnicas calorimétricas descritas por Sá et al. (2000).

Foram coletadas amostras nos seguintes locais na lavoura cafeeira: entrelinha (EL), projeção da saia (PS) e linha de tráfego (LT). Para cada um desses locais foram obtidos os semivariogramas com os respectivos mapas de isolinhas. O controle de plantas daninhas foi realizado com a aplicação de herbicida na PS antes da adubação e, na LT e EL, o controle foi realizado com a utilização de roçadeira em associação com herbicida de pós-emergência. O

controle fitossanitário foi realizado uma vez ao mês, utilizando-se pulverizador ARBUS 2000® com, aproximadamente, 2.600 kg, quando cheio. A adubação de cobertura, aplicada de 40 em 40 dias no período chuvoso, é realizada utilizando-se um aplicador da marca Komander® com capacidade para 4.000 kg, com pneus 6.50-16, com calibragem de 50 PSI. Em todas as operações agrícolas foi utilizado um trator Valmet 785 Fruteiro® (4 x 2) com peso aproximado de 2.670 kg e pneus dianteiros do tipo 7.50-16, cuja pressão de inflação de ar é de 28 PSI e traseiros do tipo 14.9-28 com pressão de 18 PSI.

TABELA 1 Caracterização física do Latossolo Vermelho distrófico típico, utilizando média de 6 repetições

Local	MO g kg <sup>-1</sup>	VTP	Ma m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	Mi	Ds	Dp Mg m <sup>-3</sup>	Arg	Silte	Areia
EL	35	0,66	0,30	0,37	0,87				
PS	33	0,63	0,24	0,39	0,97	2,69	780	110	110
LT	33	0,61	0,21	0,39	1,01				

EL – entrelinha, PS – projeção da saia, LT – linha de tráfego, VTP – volume total de poros; Ma – macroporosidade; Mi – microporosidade; Ds – densidade do solo; Dp – densidade de partículas, Arg - argila.

A amostragem foi realizada no mês de janeiro de 2006, que correspondeu à época mais crítica, em se tratando de teor de umidade no solo e tráfego de maquinário. O esquema de amostragem é importante, pois a capacidade do semivariograma em detectar a estrutura de dependência espacial está diretamente ligada ao desenho do plano amostral (Oliveira, 1991; Ribeiro Júnior, 1995). Desse modo, foram coletadas 117 amostras em três transectos no sentido da linha de plantio (Nordeste-Sudoeste) em cada um dos locais avaliados na lavoura cafeeira. No sentido transversal à linha de plantio (Sudeste-Noroeste) foram amostrados 161 pontos em um transecto, sendo 46 pontos na EL e PS e 69



pontos na LT. Foram ainda coletados 152 pontos espalhados em toda área amostral (Figura 1). Em cada ponto foi retirada, na profundidade de 0,10-0,13 m, uma amostra indeformada com anel volumétrico de 6,50 cm de diâmetro e 2,54 cm de altura.

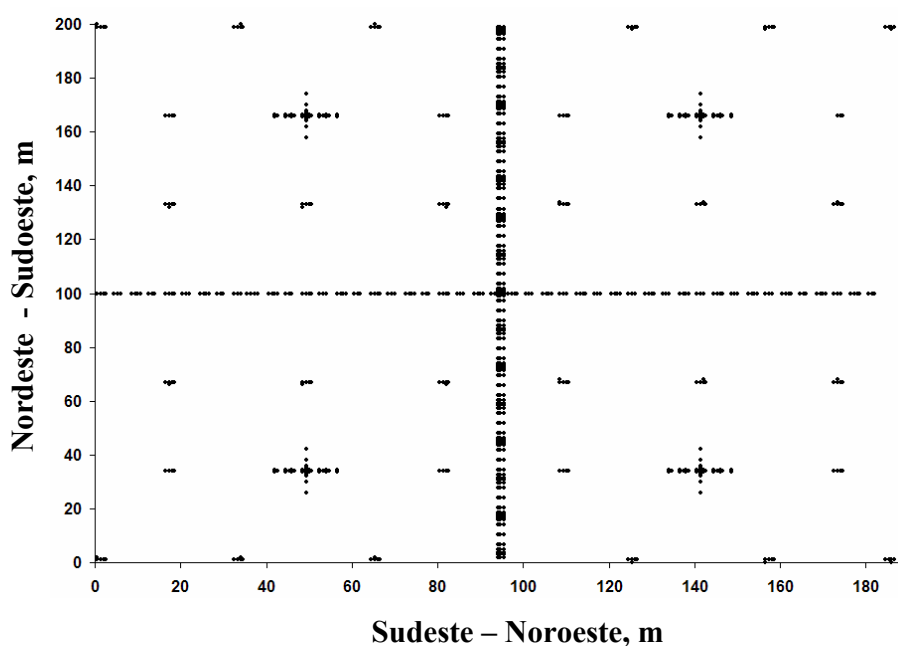


FIGURA 1 Distribuição dos pontos amostrais, nos três locais estudados.

Além das amostras citadas anteriormente, foram realizadas amostragens intensivas em quatro regiões específicas na lavoura cafeeira, com distâncias reduzidas para construção dos semivariogramas (Figura 2), obtendo-se maior definição a curtas distâncias, visando reduzir o valor do efeito pepita. Assim, o conjunto total possui 828 pontos amostrais, sendo 250 pontos para EL, 251 pontos para PS e 327 pontos para LT.

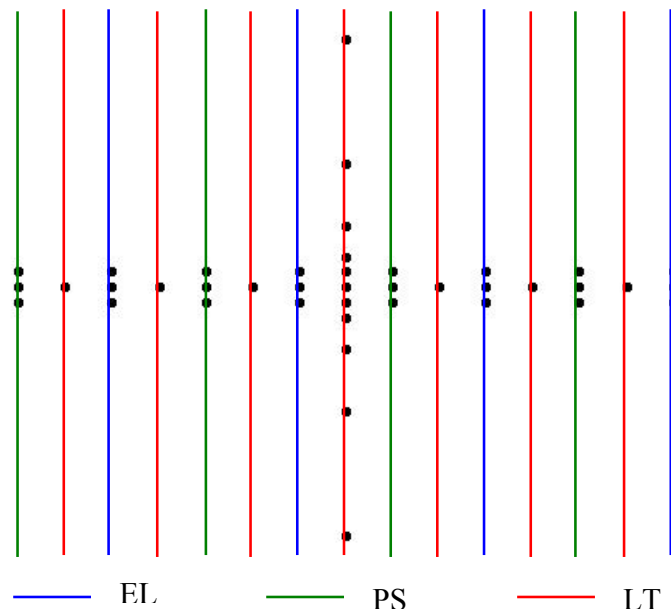


FIGURA 2 Distribuição dos pontos em escala intensiva, nos três locais estudados, EL – entrelinha; PS - projeção da saia e LT – linha de tráfego.

No laboratório cada amostra foi moldada segundo o volume do anel, sendo submetidas, em seguida, ao ensaio de compressão uniaxial (Bowles, 1986), com umidade natural. Esses ensaios foram realizados utilizando-se um consolidômetro da marca Boart Longyear<sup>®</sup>. As pressões aplicadas obedeceram à seguinte ordem; 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa. Cada pressão foi aplicada até que 90% da deformação máxima fosse alcançada (Taylor, 1948) e somente então aplicou-se nova pressão. Após o término do ensaio, as amostras foram levadas à estufa a 105°–110°C, até massa constante, para determinação da umidade gravimétrica, conforme Embrapa (1997).

Realizado o ensaio, a curva de compressão do solo foi obtida plotando-se a pressão aplicada no eixo das abscissas, em escala logarítmica, versus a

densidade do solo (Ds) correspondente no eixo das ordenadas, em escala decimal, conforme Dias Junior & Pierce (1996).

A partir das curvas de compressão foram obtidas as  $\sigma_p$ , determinadas de acordo com Dias Junior & Pierce (1995).

Inicialmente, foi realizada a análise exploratória dos dados por meio da Estatística Descritiva obtendo-se as seguintes medidas: média aritmética, mediana, variância amostral, desvio padrão, coeficiente de variação, valores máximo e mínimo, amplitude e coeficientes de assimetria e de curtose.

A análise da dependência espacial foi feita pela Geoestatística, com auxílio do software GS+ (Robertson, 1998), que realiza os cálculos das semivariâncias amostrais, cuja expressão pode ser encontrada em Vieira et al. (1983):

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

sendo  $n(h)$  número de pares amostrais  $[z(x_i); z(x_i + h)]$  separados pelo vetor  $h$  e  $z(x_i)$  e  $z(x_i + h)$ , valores numéricos observados do atributo analisado, para dois pontos  $x_i$  e  $x_i + h$  separados pelo vetor  $h$ . O semivariograma é representado pelo gráfico de  $\gamma(h)$  versus  $h$ . Após o ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de  $\gamma(h)$ , são definidos os parâmetros do modelo teórico para o semivariograma (efeito pepita,  $C_0$ ; alcance da dependência espacial,  $a$  e patamar,  $C_0+C$ ). O alcance estabelece o limite de dependência espacial entre as amostras, isto é, para distâncias iguais ou menores que o alcance, diz-se que os valores vizinhos de uma variável estão espacialmente correlacionados e podem ser utilizados para se estimar valores em qualquer ponto entre eles (Trangmar et al., 1985).

Foi calculada a razão de dependência espacial ( $RD$ ), que é a proporção em percentagem do efeito pepita ( $Co$ ) em relação ao patamar ( $Co+C$ ). De acordo com Cambardella et al. (1994), valores de  $RD < 25\%$  apresentam dependência espacial forte; de  $25\%$  a  $75\%$ , dependência espacial moderada e  $>75\%$ , dependência espacial fraca.

$$RD = \left( \frac{Co}{Co + C} \right) * 100$$

Em caso de dúvida entre mais de um modelo para o mesmo semivariograma, utilizou-se a técnica de validação conhecida como “jack-knifing”. Essa técnica consiste em retirar, individualmente, cada ponto medido da área estudada e o seu valor é estimado pelo modelo como se ele nunca existisse. Na elaboração dos mapas de distribuição espacial das variáveis, foi utilizado o programa Surfer 7.0 (Golden Software, 1999), com base nos parâmetros de semivariograma, obtidos com o programa GS+ (Robertson, 1998).

Após a escolha do semivariograma de melhor ajuste aos semivariogramas experimentais, realizou-se a krigagem dos dados. A krigagem atribui um peso para o valor de cada amostra, que é obtido por meio da minimização da variância da estimativa, assim, amostras distantes terão um peso menor que amostras localizadas mais próximas do ponto e vice-versa (Matheron, 1971). A magnitude do efeito pepita é importante na krigagem, pois, quanto maior for a diferença do efeito pepita em relação ao patamar do semivariograma, maior será a continuidade do fenômeno, menor a variância da estimativa e maior a confiança que se pode ter na estimativa (Isaaks & Srivastava, 1989).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 2 estão apresentados os dados da estatística descritiva da  $\sigma_p$  e U nos diferentes locais estudados. Tanto para  $\sigma_p$  quanto para U, verificou-se que os maiores coeficientes de variação e maiores amplitudes foram encontrados na EL, provavelmente devido à desestruturação do solo causada pelo revolvimento promovido pelo processo de subsolagem, realizado 14 meses antes da amostragem, que foi realizada no mês de janeiro de 2006. Os valores da média e mediana, para todas as variáveis, estão próximos, mostrando distribuições simétricas, o que pode ser confirmado pelos valores de assimetria próximos de zero. Com base nos limites de CV sugeridos por Warrick e Nielsen (1980), observa-se que todos os valores de CV foram considerados baixos, tanto para  $\sigma_p$  quanto para U ( $CV < 12\%$ ), com exceção da  $\sigma_p$  na EL, que foi considerada média ( $12 \leq CV \leq 60$ ). Essa baixa variação foi devido à época de coleta, com elevada precipitação pluviométrica, ocasionando maior homogeneidade na área.

TABELA 2 Resumo estatístico dos dados de pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) e umidade do solo (U)

Parâmetros estatísticos	EL		PS		LT	
	$\sigma_p$	U	$\sigma_p$	U	$\sigma_p$	U
Média	294,4	0,292	300,5	0,308	331,3	0,296
Mediana	297,4	0,294	299,5	0,309	332,1	0,297
Variância amostral	1630,1	0,00042	936,9	0,00021	1102,0	0,00022
Desvio padrão	40,37	0,020	30,61	0,014	33,20	0,015
CV (%)	13,7	6,8	10,2	4,5	10,0	5,1
Mínimo	202,1	0,23	206,8	0,26	255,8	0,25
Máximo	386,6	0,35	380,3	0,34	419,4	0,33
Amplitude	184,5	0,12	173,5	0,08	163,7	0,08
Assimetria	-0,30	-0,45	0,02	-0,30	-0,04	-0,27
Curtose	1,08	0,17	-0,15	0,68	-0,43	0,19

A análise Geoestatística, efetuada por meio do semivariograma, mostrou que todos os atributos do solo estudado apresentaram dependência espacial, uma vez que nenhum deles apresentou efeito pepita puro, o que determinaria uma distribuição aleatória dos seus dados. Todos os semivariogramas ajustaram-se ao modelo esférico, com valores  $R^2$  variando de 0,81 a 0,99, concordando com o resultado de várias pesquisas que indicam o modelo esférico como o de maior ocorrência para os atributos do solo (Trangmar et al., 1985; Salviano et al., 1998; Souza et al., 2004). Na análise do grau dependência espacial das variáveis estudadas, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994). A análise da relação  $Co/(Co+C)$  mostrou que os atributos estudados apresentaram dependência espacial moderada, tendendo à fraca. De acordo com Carvalho et al. (2003), a variabilidade espacial dos atributos do solo pode ser influenciada pelos seus fatores intrínsecos e pelos fatores extrínsecos, normalmente empreendidos pelas práticas de manejo do solo (tráfego de maquinário, manejo de plantas daninhas, dentre outros).

Usualmente, uma forte dependência espacial dos atributos do solo é atribuída aos fatores intrínsecos, ao passo que, aos extrínsecos, pode-se atribuir fraca dependência (Cambardella et al., 1994). É provável que a moderada dependência espacial encontrada nesse estudo seja decorrente das condições de homogeneização do ambiente que a ação antrópica, por meio do manejo adotado, proporcionou ao solo (Figura 4).

O alcance da dependência espacial apresentou os seguintes valores, em ordem crescente, para  $\sigma_p$ : LT de 23,1 m; EL de 32,3 m, e PS de 77 m. A PS apresentou um maior valor de alcance, apresentando, portanto, maior continuidade na distribuição espacial da  $\sigma_p$ . Esse fato pode ser explicado pela menor interferência antrópica na PS, já que não há tráfego nem influência direta do maquinário nesse local. Já para umidade do solo foi observada a seguinte ordem crescente: LT de 18,5 m; PS de 24,5 m e EL de 37,5 m (Tabela 3).

TABELA 3 Estimativa dos parâmetros do modelo teórico ajustado para pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) e umidade do solo (U)

Local	Modelo	Co	Co+C	A (m)	R <sup>2</sup>	RD (%)
<b>Pressão de preconsolidação (kPa)</b>						
EL	esf	1100	1562	32,3	0,82	70
PS	esf	635	858	77,0	0,81	74
LT	esf	643	1026	23,1	0,99	63
<b>Umidade do solo (kg kg<sup>-1</sup>)</b>						
EL	esf	0,000228	0,000382	37,5	0,94	60
PS	esf	0,000111	0,000183	24,5	0,97	61
LT	esf	0,000139	0,000204	18,5	0,86	68

EL – entrelinha; PS – projeção da saia; LT – linha de tráfego; Co – efeito pepita; Co+C – patamar; A – alcance; R<sup>2</sup> – coeficiente de determinação; RD – razão da dependência espacial [Co/(Co+C) 100]

O efeito pepita (Co) representa a variância não explicada ou ao acaso freqüentemente causada por erros de medições ou variações dos atributos que não podem ser detectados na escala de amostragem (Vieira, 2000). Porém, acredita-se que o que influenciou os altos valores de efeito pepita, em todas as situações estudadas, foram os fatores extrínsecos, tais como tráfego de maquinário na área nas diversas operações de manejo (Cambardella et al., 1994), já que a escala de amostragem foi intensiva, com distância mínima de amostragem de 0,5 metro, em cada um dos três locais estudados.

Para este trabalho, após verificação dos dados, foi considerada a existência de isotropia em toda a área de estudo, com mesma continuidade espacial em todas as direções. Desse modo, é importante verificar o comportamento espacial das variáveis nas diversas direções, pois a existência de tendências regionais nos dados pode estar associada à presença de eixos de anisotropia da variância, que resultariam em modelos distintos de estrutura da semivariância, de acordo com a direção tomada.

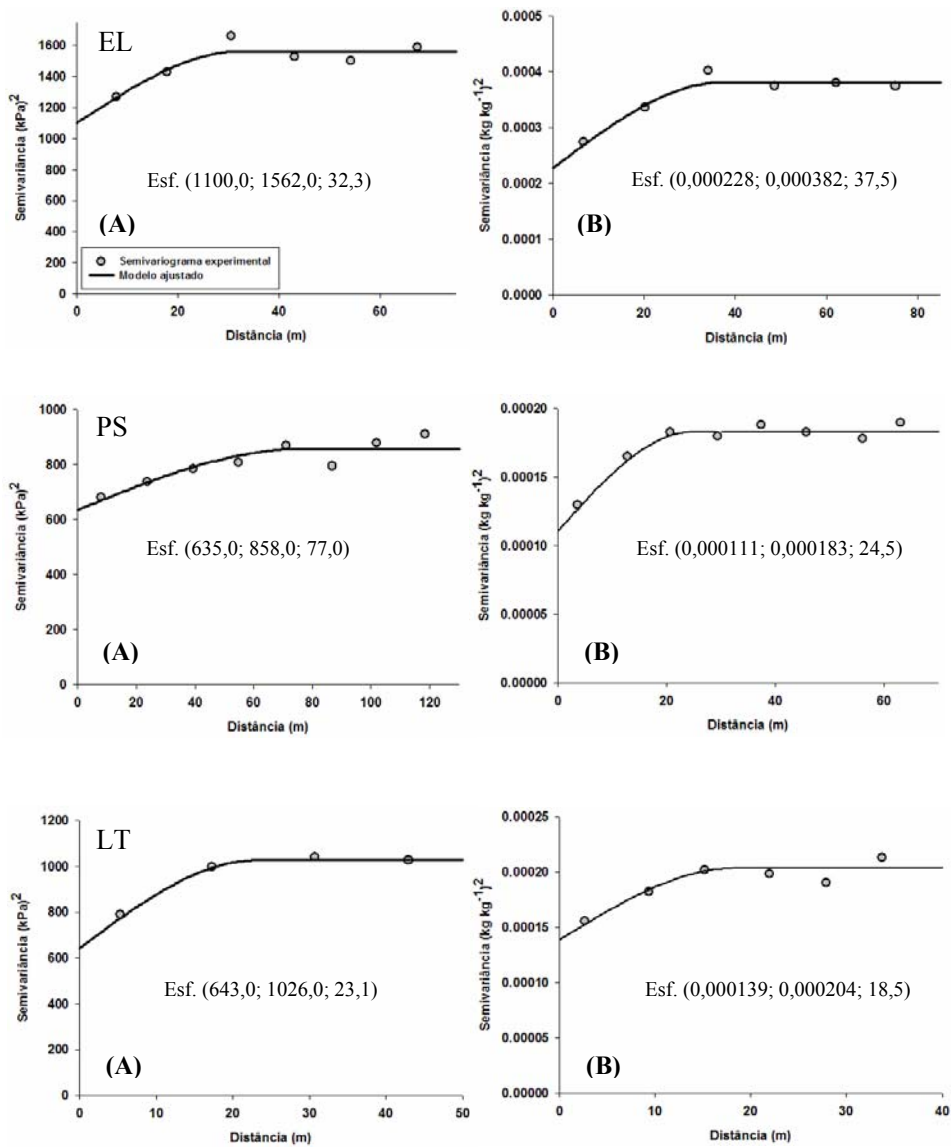


FIGURA 4 Semivariograma da pressão de preconsolidação (A) e umidade do solo (B), na EL – entrelinha; PS – projeção da saia e LT – linha de tráfego. Valores entre parênteses são: efeito pepita ( $C_0$ ), patamar ( $C_0+C$ ) e alcance ( $a$ ), respectivamente.



Os parâmetros dos modelos dos semivariogramas ajustados foram utilizados para estimar valores em locais não amostrados por meio da krigagem, obtendo-se, assim, os mapas de isolinhas. A obtenção das  $\sigma_p$  e da umidade do solo nos diferentes locais na lavoura cafeeira permitiu que fossem elaborados os mapas de isolinhas, representando a distribuição da capacidade de suporte de carga e umidade do solo por krigagem pontual, para o solo cultivado com cafeeiro nos diferentes locais estudados. Não foi verificada influência do relevo nos valores de umidade do solo, provavelmente devido à baixa declividade, em torno de 3%.

Na figura 5 observa-se a distribuição espacial do comportamento compressivo do solo e da umidade do solo na EL. A maior parte dos valores de  $\sigma_p$  se encontra na faixa de 285 a 325 kPa, enquanto que, para umidade do solo, a maior parte da área apresenta valores variando de 0,276 a 0,296 kg kg<sup>-1</sup>. Apesar da faixa de umidade variar pouco, pode-se observar sua influência no comportamento da  $\sigma_p$  no solo. Nos extremos da lavoura, tem-se valores mais baixos de umidade, variando de 0,256 a 0,266 kg kg<sup>-1</sup>. Nesses mesmos locais são observados maiores valores de  $\sigma_p$ , variando de 305 a 345 kPa.

De maneira geral, verifica-se a influência da intensidade de amostragem na conformação dos mapas de isolinhas, tanto para  $\sigma_p$  quanto para umidade do solo. Esse fato pode ser verificado com maior clareza na figura 5 b, em que a amostragem intensiva, através dos transectos no sentido transversal e longitudinal às linhas de plantio (Figura 1), influenciou na conformação das isolinhas na região central da lavoura. Esse comportamento é mais pronunciado quando há valores de alcance mais baixos, pois, quando ocorreram valores maiores de alcance, a intensidade de amostragem não ocasionou uma conformação característica no desenho das isolinhas, como pode ser observado na figura 6 a.

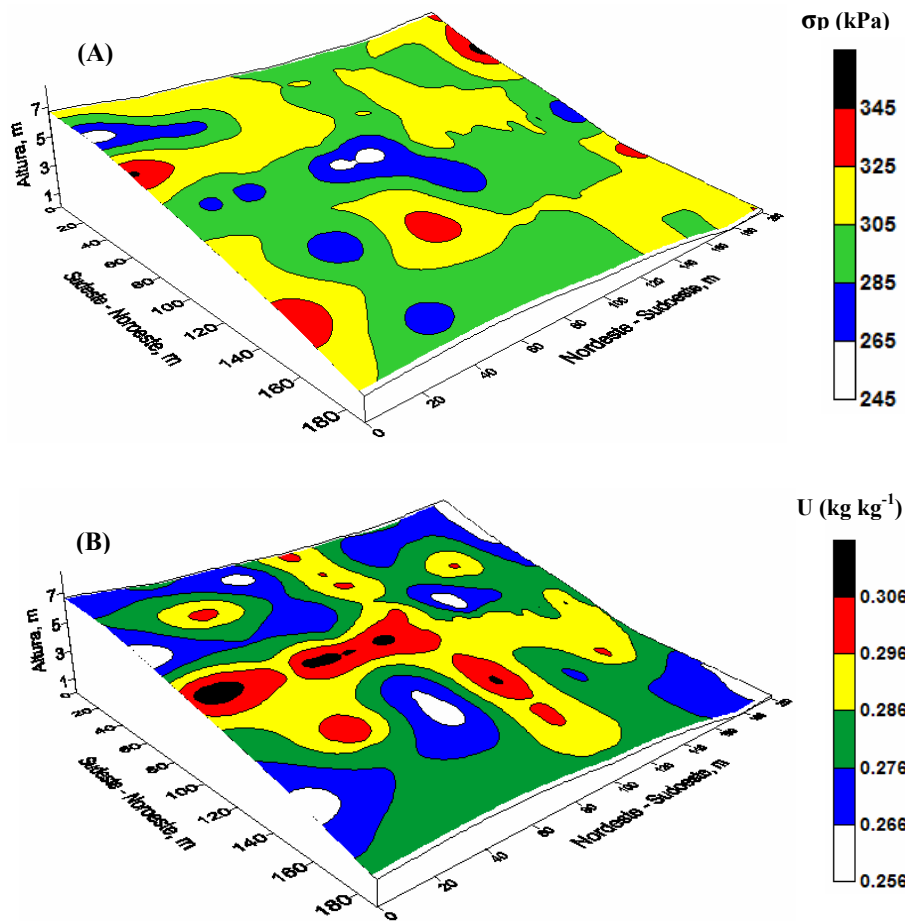


FIGURA 5 Mapa de isolinhas da pressão de preconsolidação (A) e umidade do solo (B) na entrelinha.

Na PS observou-se a maior diferença entre o comportamento da  $\sigma_p$  e umidade do solo, em termos de continuidade espacial. Devido à menor influência da ação antrópica nesse local da lavoura, a  $\sigma_p$  apresentou maior continuidade espacial, quando comparada com os demais locais avaliados. O

mesmo não foi verificado para a umidade do solo nesse local, provavelmente devido à maior sensibilidade da  $\sigma_p$  em resposta ao manejo diferenciado.

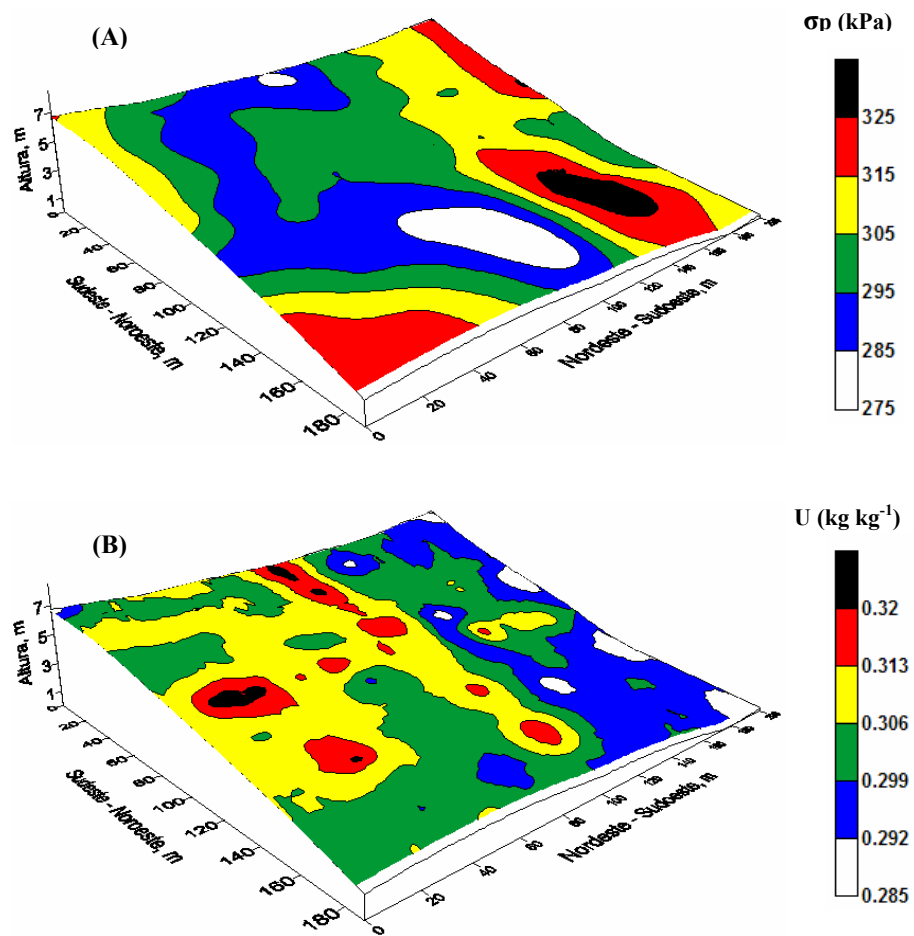


FIGURA 6 Mapa de isolinhas da pressão de preconsolidação (A) e da umidade do solo (B) na projeção da saia.

A LT (Figura 7) apresentou maiores valores de  $\sigma_p$  devido ao processo de compactação presente neste local, ocasionando maior degradação da estrutura do

solo. A intensidade da compactação e sua nocividade estão diretamente relacionadas à pressão de contato dos pneus e o número de passadas do implemento (Lhotský et al., 1991), situação encontrada na LT, que recebe diretamente todo o tráfego de maquinário.

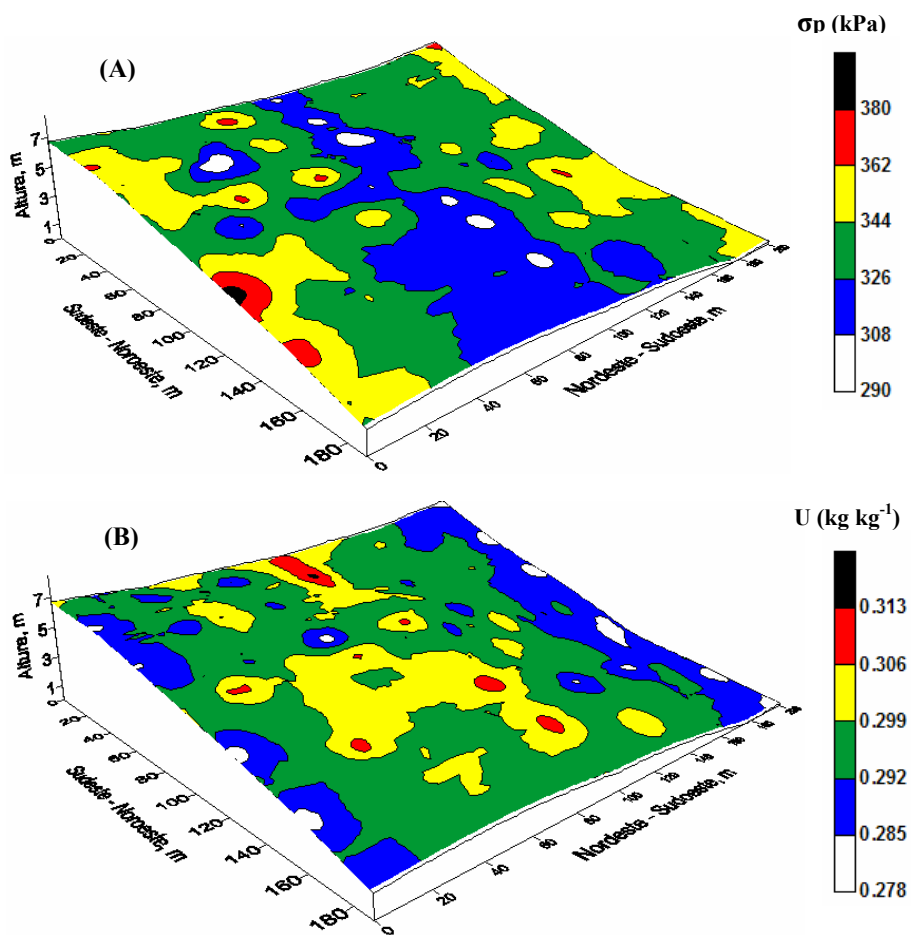


FIGURA 7 Mapa de isolinhas da pressão de preconsolidação (A) e da umidade do solo (B) na linha de tráfego.

Na figura 7 observam-se maiores valores de  $\sigma_p$  nas bordas da lavoura, com valores acima de 344 kPa, evidenciando maior grau de degradação estrutural, com maior fragilidade estrutural quando comparadas com a região central da lavoura. Essa situação ocorreu, provavelmente, devido às operações de manobra realizado pelo maquinário, devido ao espaço reduzido do carreador, principalmente à nordeste da área.

Silva et al. (2004) verificaram que o acúmulo de pressões provocadas pelo tráfego de máquinas ou pisoteio animal sobre o solo provoca locais de maior estado de compactação, principalmente nas áreas ditas de cabeceira, nas quais o tráfego de máquinas é mais intenso.

#### 4 CONCLUSÕES

A  $\sigma_p$  e umidade do solo apresentaram dependência espacial moderada para todos os locais avaliados.

Foi observado maior continuidade espacial da  $\sigma_p$ , com maior valor de alcance, na PS.

No local mais crítico em relação à compactação do solo, LT, as bordas da lavoura apresentaram maiores valores de  $\sigma_p$ , indicando maior grau de degradação estrutural.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO JUNIOR, C. F. **Modelos da capacidade de suporte de carga de um Latossolo submetido a diferentes sistemas de manejo de plantas daninhas em lavoura cafeeira**. 2007. 132 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

BOWLES, J. E. **Engineering properties of soils and their measurements**. 3.ed. New York: McGraw-Hill, 1986. 218 p.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, p. 1501-1511, 1994.

CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 695-703, 2003.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Segunda previsão de safra de café 2006/2007**. Disponível em:  
<<http://www.conab.gov.br/conabweb/>>. Acesso em: 16 mar. 2007.

CORÁ, J. E.; ARAUJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:1013-1021, 2004.

DEFOSSEZ, P.; RICHARD, G. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. **Soil & Tillage Research**, v. 67, p. 41-64, 2002.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, v. 8, p. 139-151, 1995.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 175-182, 1996.

DIAS JUNIOR, M. S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114p. Dissertation (Ph.D.) - Michigan State University, East Lansing.

DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P.; LASMAR JÚNIOR, E.; ARAUJO JUNIOR, C. F. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to *Eucalyptus* harvest operations. **Scientia Agricola**, v. 62, p. 248-255, 2005.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412 p.

FEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO ESTADO DE MINAS GERAIS - FAEMG. **Diagnóstico da cafeicultura em Minas Gerais**. Belo Horizonte, 1996. 52 p.

FLOWERS, M.; LAL, R. Axle load and tillage effect on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. **Soil & Tillage Research**, v. 48, p. 21-35, 1998.

GOLDEN SOFTWARE. **SURFER for Windows: release 7.0: contouring and 3 D surface mapping for scientist's engineers, user's guide**. New York, 1999. 619p.

GUIMARÃES, E. C. **Variabilidade espacial de atributos de um Latossolo Vermelho Escuro textura argilosa da região do cerrado, submetido ao plantio direto e ao plantio convencional**. 2000, 85 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; DIAS JUNIOR, M. S.; TORMENA, C. A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 11-18, 2001.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University, 1989. 600p.

KONDO, M. K. **Variabilidade espacial do comportamento compressivo do solo e mapas de trafegabilidade na cultura do cafeeiro irrigado**. 2003, 166p.



Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

LHOTSKÝ, J.; BERAN, P.; PARIS, P.; VARIGUSKÁ, L. Degradation of soil by increasing compression. **Soil & Tillage Research**, v. 19, p. 287-295, 1991.

MATHERON, G. **The theory of regionalized variables and its applications**. Fontainebleau, Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, 1971. 211 p.

MILLER, M. P.; SINGER, M. J.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills. **Soil Science Society of America Journal**, v. 52, p. 1133-1141, 1988.

OLIVEIRA M. S. de. **Planos amostrais para variáveis espaciais utilizando geoestatística**. 1991. 110 p. Tese (Mestrado em Estatística) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

RIBEIRO JÚNIOR, P. J. **Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo**. 1995, 99 p. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agronômica) - Escola Superior “Luis de Queiroz, Piracicaba, SP.

ROBERTSON, G. P. **GS: geostatistics for the environmental sciences** (version 5.1 for windows). Gamma Design Software, 1998. 152 p.

SÁ, M. A. C.; LIMA, J. M.; LAGE, G. Procedimento padrão para medida da potência liberada pelo aparelho ultra-som. Comunicação. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 24, p. 30-306, jan./mar. 2000.

SALVIANO, A. A. C.; VIEIRA, S. R.; SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* L. em área severamente erodida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 115-122, 1998.

SILVA, E. M.; MALVINO, S. S. A. B. Análise climática do município de Patrocínio (MG). **Caminhos da Geografia**, v. 10, p. 93-108, 2005.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, p. 399-406, 2004.

SILVA, A. R.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; ARAUJO JUNIOR, C. F. Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 207-216, 2006.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 937-944, 2004.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: J. Wiley, 1948. 700 p.

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

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: **Tópicos em ciência do solo**, v. 1, SBCS, Viçosa,. 2000. p. 1-54.

VIEIRA, S. R.; HATFIEL, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, v. 51, p. 1-75, 1983.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic, 1980. p. 319-344.