

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CÂMPUS DE BOTUCATU

**SUSTENTABILIDADE ESTRUTURAL DE UM SOLO NA REGIÃO DO
ALTO PARANAPANEMA/SP, SUBMETIDO A DOIS SISTEMAS DE
CULTIVO**

VIRGINIA MARIA FONTES CARDOSO

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp – Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Doutor em
Agronomia (Energia na agricultura)

BOTUCATU – SP
Janeiro - 2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**SUSTENTABILIDADE ESTRUTURAL DE UM SOLO NA REGIÃO DO
ALTO PARANAPANEMA/SP, SUBMETIDO A DOIS SISTEMAS DE
CULTIVO**

VIRGINIA MARIA FONTES CARDOSO

Orientador: Prof. Dr. Kleber Pereira Lanças

Co-Orientador: Reginaldo Barbosa da Silva

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp – Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Doutor em
Agronomia (Energia na agricultura)

BOTUCATU – SP
Janeiro – 2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO
UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Cardoso, Virgínia Maria Fontes, 1964-
C268s Sustentabilidade estrutural de um solo na região do Alto Paranapanema/SP, submetido a dois sistemas de cultivo / Virgínia Maria Fontes Cardoso. - Botucatu : [s.n.], 2007. xi, 121 f. : il. color., gráfs., tabs.

Tese (Doutorado) -Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2007
Orientador: Kleber Pereira Lanças
Co-orientador: Reginaldo Barbosa da Silva
Inclui bibliografia

1. Compactação. 2. Mecânica do solo. 3. Física do solo. 4. Solos - Manejo. 5. Solos - Estrutura. 6. Cultivos agrícolas. I. Lanças, Kleber Pereira. II. Silva, Reginaldo Barbosa da. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "SUSTENTABILIDADE ESTRUTURAL DE UM SOLO NA REGIÃO DO
ALTO PARANAPANEMA/SP, SUBMETIDO A DOIS SISTEMAS DE
CULTIVO"

ALUNA: VIRGINIA MARIA FONTES CARDOSO

ORIENTADOR: DR. KLEBER PEREIRA LANÇAS

Aprovado pela Comissão Examinadora




PROF. DR. KLEBER PEREIRA LANÇAS



PROF. DR. SAULO PHILIFE SEBASTIÃO GUERRA



PROFA. DRA. MARLENE CRISTINA ALVES



PROF. DR. ANTONIO GABRIEL FILHO



DR. EDMILSON RENATO DA SILVA RUIZ

Data da Realização: 26 de janeiro de 2007.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida que me permite poder realizar este trabalho, pela minha família e pelos amigos que incentivam e dão força e por todas as oportunidades concedidas.

À Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP – Campus Botucatu pela chance de realização do curso de Doutorado em Agronomia - área de concentração Energia na Agricultura.

Ao Prof. Dr. Kléber Pereira Lanças pela orientação, amizade, confiança e ensinamentos transmitidos.

Ao Prof. Dr. Reginaldo Barbosa da Silva pela valiosa colaboração, orientação e amizade.

A todos os Docentes e Funcionários do Departamento de Engenharia Rural pelos ensinamentos e cordialidade.

Aos colegas Flávio José de Sousa Pereira, Edmilson Renato Silva Ruiz e Elka Élice Vasco de Miranda pela amizade, atenção e ajuda na coleta dos dados.

Aos Técnicos Maury Torres da Silva, Gilberto Winckler, Ailton de Lima Lucas e Silvio Sabatini S. Scolastici pelas colaborações e amizade.

Ao colega Juan José Bonnin Acosta e Fernanda pela ajuda na realização dos ensaios de laboratório.

Às Secretárias do Departamento de Engenharia Rural, Rosângela Cristina Moreci e Rita de Cássia Miranda.

Às Secretárias da seção de pós-graduação: Marilene do Carmo Santos, Marlene Rezende e Jaqueline de Moura Gonçalves pela paciência, atenção e eficiência no atendimento prestado.

Aos Professores Dr. João Carlos Cury Saad e Dr. Saulo Philipe Sebastião Guerra pelas sugestões e contribuição na elaboração da Tese.

Aos colegas de curso companheiros de jornada e a todos que direta e indiretamente contribuíram para realização deste trabalho.

A Todos um muito obrigada.

SUMÁRIO

	Página
1 RESUMO	1
2 SUMMARY	3
3 INTRODUÇÃO	5
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
4.1 Estrutura do solo	8
4.2 Porosidade e densidade do solo	9
4.3 Estados e limites de consistencia	11
4.4 Compactação do solo	12
4.5 Compressibilidade do solo	16
4.6 Resistência do solo à penetração	21
4.7 Cargas dinâmicas no solo	22
4.8 Variabilidade espacial das propriedades do solo	26
4.9 Sistemas de plantio direto e convencional	29
4.10 Rotações de Culturas	32
5. MATERIAL E MÉTODOS	36
5.1 Caracterização das áreas experimentais	36
5.2 Caracterização dos solos	41
5.3 Amostragem	42
5.4 Épocas de amostragem	48
5.5 Propriedades físicas e químicas	49
5.6 Ensaio de compressibilidade	
– Determinação da pressão de preconsolidação (σ_p)	51
5.7 Ensaio de resistência à penetração	
- Determinação do índice de cone (IC)	53
5.8 Determinação da pressão de contato pneu/solo	54
5.8.1 Área de contato	55
5.8.2 Caracterização do parque de máquinas	57

5.9	Análise estatística dos dados amostrados	58
5.10	Análise geostatística dos dados amostrados	59
5.11	Sistematização e Análise dos dados amostrados	60
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
6.1	Estatística descritiva das propriedades físicas e mecânicas do solo	61
6.2	Geoestatística das propriedades físicas e mecânicas do solo	69
6.3	Mapeamento das propriedades físicas	73
6.3.1	Índices de Cone.....	73
6.3.2	Índices físicos	81
6.3.3	Pressão de preconsolidação do solo	88
6.4	Elaboração de modelo de Capacidade de Suporte de carga do solo (CSCS) e pressão de contato	94
7	CONCLUSÕES.....	100
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
	APÊNDICE	116

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Representação esquemática dos estados e limites de consistência do solo. LC: limite de contração; LP: Limite de plasticidade; LL: limite de liquidez.....	12
2. Curva de compressão do solo mostrando a curva de compressão secundária, reta de compressão virgem com suas regiões de deformações elásticas e plásticas, respectivamente, a posição da pressão de preconsolidação (σ_p), e o índice de compressão (m) (DIAS JUNIOR,1994).....	17
3. Exemplo de um semivariograma, mostrando os parâmetros envolvidos na equação da semivariância	28
4. Mapa do Brasil localizando o estado de São Paulo e a localização do Município de Paranapanema/SP.....	37
5. Mapa de localização do município de Paranapanema onde se encontra à área em estudo.....	38
6. Vista parcial Fazenda Buriti-Mirim, com detalhes das culturas sob sistema de irrigação com pivô central.....	38
7. Mapa de clima da região Brasileira.....	39
8. Unidade Móvel de Amostragem de Solo (UMAS) utilizada para o levantamento de dados georreferenciados.....	42
9. Penetrômetro hidráulico eletrônico, equipado com sistema DGPS, construído por Santos & Lanças (1998).....	43
10. Detalhe do processo de amostragem com o amostrador hidráulico-eletrônico automatizado com sistema de GPS.....	44
11. Distribuição dos pontos amostrais para índice de cone IC, área 1, Buriti-Mirim, ano 2002.....	45
12. Distribuição dos pontos amostrais para índice de cone IC, área 1, Buriti-Mirim, ano 2004.....	45
13. Distribuição dos pontos amostrais para índice de cone IC, área 2, Buriti-Mirim, ano 2004.....	46

14. Distribuição dos pontos amostrais para índice físico, área 1, Buriti-Mirim, ano 2002.....	48
15. Distribuição dos pontos amostrais para índice físico, área 2, Buriti-Mirim, ano 2004.....	48
16. À esquerda o consolidômetro utilizados para os ensaios de compressibilidade, à direita os acessórios necessários para realização do ensaio. Fonte: Silva et al. (2005a).....	52
17. Curva de compressão do solo e estimativas de σ_p , segundo os métodos de Dias Junior & Pierce (1996), para estimativa da pressão de preconsolidação. Fonte: Silva et al, 2005.....	53
18. Penetrômetro hidráulico-eletrônico.....	54
19. Caixa e quadro de madeira massa modelável (A); detalhe do pneu sendo baixado sobre a caixa (B); área de contato impressa na massa (C).....	56
20. Mapa de Isocompactação e distribuição espacial dos valores de índice de cone (IC, kPa) em diferentes camadas de solo, na área 1, na Fazenda Buriti-Mirim, no plantio convencional, no ano de 2002.....	76
21. Mapa de Isocompactação, distribuição espacial dos valores de índice de cone (IC, kPa) em diferentes camadas de solo, área 1, Fazenda Buriti-Mirim, plantio convencional (PC) e plantio direto rotacionado (PDR), ano de 2004.....	77
22. Mapa de isocompactação, distribuição espacial dos valores de índice de cone (IC, kPa) em diferentes camadas de solo, sob plantio direto rotacionado (PDR) e plantio convencional (PC), área 2, Fazenda Buriti-Mirim, 2004.....	80
23. Distribuição espacial dos valores de densidade do solo inicial (D_{si} , $Mg\ m^{-3}$) e na pressão de preconsolidação ($D_{s\sigma_p}$, $Mg\ m^{-3}$), nas profundidades SP e CMRM, plantio convencional, área 1, fazenda Buriti-Mirim, 2002.....	82
24. Distribuição espacial dos valores de porosidade do solo inicial (P_{si} , $m^3\ m^{-3}$) e da porosidade na pressão de preconsolidação ($P_{s\sigma_p}$, $m^3\ m^{-3}$) nas profundidades SP e CMRM, plantio convencional, área 1, fazenda Buriti-Mirim, 2002.....	83

25. Distribuição espacial dos valores de densidade (Mg m^{-3}) do solo inicial (D_{si}) e na pressão de preconsolidação ($D\sigma_p$), sob plantio direto (à esquerda) e plantio convencional (à direita), do Pivô 5 da Fazenda Buriti-Mirim.....	85
26. Distribuição espacial dos valores de porosidade do solo inicial (P_{si} , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e na pressão de preconsolidação ($P\sigma_p$, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), sob plantio direto (à esquerda) e plantio convencional (à direita), da área 2 da Fazenda Buriti-Mirim.....	86
27. Distribuição espacial dos valores de pressão de preconsolidação (σ_p , kPa), nas profundidades SP e CMRM, plantio convencional, área 1, fazenda Buriti-Mirim, 2002.....	89
28. Distribuição espacial dos valores do teor de água (U , kg kg^{-1}) no solo, nas profundidades SP e CMRM, plantio convencional, área 1, fazenda Buriti-Mirim, 2002.....	90
29. Distribuição espacial dos valores de pressão de preconsolidação (σ_p , kPa), sob plantio direto rotaconado (PDR) e plantio convencional (PC), área 2 da Fazenda Buriti-Mirim.....	92
30. Distribuição espacial dos valores do teor de água no solo (kg kg^{-1}), sob plantio direto (à esquerda) e plantio convencional (à direita), área 2, Fazenda Buriti-Mirim.....	93
31. Modelo de capacidade de suporte de carga para duas camadas de solo com seus respectivos limites e estados de consistência do solo, área 1.....	95
32. Modelos de capacidade de suporte de carga para duas camadas de solo. Linhas de referências indicam a pressão de contato dos rodados de dois pulverizadores, área 2.....	96

LISTA DE TABELA

Tabela	Página
1. Plano de plantio para o período de 2001 à 2004 – Fazenda Buriti-Mirim.....	40
2. Distribuição granulométrica do solo das áreas de estudo.....	41
3. Propriedades física e química dos solos das áreas 1 e 2: Diâmetro Médio Ponderado (DMP), Matéria Orgânica (MO), Densidade de Partículas (DP).....	50
4. Limites de Consistência, Limite de contração (LC), Limite de plasticidade (LP), Limite de liquidez (LL).....	50
5. Planilha eletrônica para estimativa da pressão de preconsolidação. Adaptada de Dias Junior & Pierce (1996).....	52
6. Máquinas e equipamentos utilizados para operações mecanizadas na Fazenda Buriti – Mirim, município de Paranapanema, SP.....	55
7. Dados da área de contato dos pneus.....	58
8. Análise de estatística descritiva: Umidade gravimétrica (U), pressão de preconsolidação (σ_p), Densidade inicial (Dsi) e na pressão de preconsolidação ($Ds\sigma_p$), Porosidade inicial (Psi) e na pressão de preconsolidação ($Ps\sigma_p$), na Área 1, Gleba 1, profundidade superficial (0-0,1 m), Plantio Convencional, 2002.....	62
9. Análise de estatística descritiva: Umidade gravimétrica (U), pressão de preconsolidação (σ_p), Densidade inicial (Dsi) e na pressão de preconsolidação ($Ds\sigma_p$), Porosidade inicial (Psi) e na pressão de preconsolidação ($Ps\sigma_p$), na Área 1, Gleba 1, profundidade CMRM, Plantio Convencional, 2002.....	62
10. Análise de estatística descritiva: Umidade gravimétrica (U), pressão de preconsolidação (σ_p), Densidade inicial (Dsi) e na pressão de preconsolidação ($Ds\sigma_p$), Porosidade inicial (Psi) e na pressão de preconsolidação ($Ps\sigma_p$), na Área1, Gleba 2, profundidade Superficial (0-0,1 m), Plantio Convencional, 2002.....	63
11. Análise de estatística descritiva: Umidade gravimétrica (U), pressão de preconsolidação (σ_p), Densidade inicial (Dsi) e na pressão de preconsolidação ($Ds\sigma_p$), Porosidade inicial (Psi) e na pressão de preconsolidação ($Ps\sigma_p$), na Área1, Gleba 2, profundidade CMRM, Plantio Convencional, 2002.....	63

12. Análise de estatística descritiva: Umidade gravimétrica (U), pressão de preconsolidação (σ_p), Densidade inicial (Dsi) e na pressão de preconsolidação ($D\sigma_p$), Porosidade inicial (Psi) e na pressão de preconsolidação ($P\sigma_p$), na Área 2, profundidade superficial (0-0,1 m), Plantio Direto, 2004.....	64
13. Análise de estatística descritiva: Umidade gravimétrica (U), pressão de preconsolidação (σ_p), Densidade inicial (Dsi) e na pressão de preconsolidação ($D\sigma_p$), Porosidade inicial (Psi) e na pressão de preconsolidação ($P\sigma_p$), na Área 2, profundidade superficial (0-0,1 m), Plantio Convencional, 2004.....	64
14. Análise de estatística descritiva: Umidade gravimétrica (U), pressão de preconsolidação (σ_p), Densidade inicial (Dsi) e na pressão de preconsolidação ($D\sigma_p$), Porosidade inicial (Psi) e na pressão de preconsolidação ($P\sigma_p$), na Área 2, profundidade CMRM, Plantio Direto, 2004.....	65
15. Análise de estatística descritiva: Umidade gravimétrica (U), pressão de preconsolidação (σ_p), Densidade inicial (Dsi) e na pressão de preconsolidação ($D\sigma_p$), Porosidade inicial (Psi) e na pressão de preconsolidação ($P\sigma_p$), na Área 2, profundidade CMRM, Plantio Convencional, 2004.....	65
16. Análise de estatística descritiva do índice de cone (IC, kPa), Área 1, Plantio Convencional, 2002.....	66
17. Análise de estatística descritiva do índice de cone (IC, kPa), Área 1, Plantio Direto, 2004.....	66
18. Análise de estatística descritiva do índice de cone (IC, kPa), Área 1, Plantio Convencional, 2004.....	67
19. Resultado da análise de estatística descritiva do índice de cone (IC, kPa), Área 2, Plantio Direto, 2004.....	67
20. Análise de estatística descritiva do índice de cone (IC, kPa), Área 2, Plantio Convencional, 2004.....	68
21. Análise geoestatística: Umidade gravimétrica (U, kg kg^{-1}), pressão de preconsolidação (σ_p , kPa), Densidade inicial (Dsi, Mg m^{-3}) e na pressão de preconsolidação ($D\sigma_p$, Mg m^{-3}), Porosidade inicial (Psi, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e na pressão de preconsolidação ($P\sigma_p$, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), gleba1, área 1, profundidade superficial (0-0,1 m).....	70

22. Análise geoestatística: Umidade gravimétrica (U , kg kg^{-1}), pressão de preconsolidação (σ_p , kPa), Densidade inicial (D_{si} , Mg m^{-3}) e na pressão de preconsolidação ($D_s\sigma_p$, Mg m^{-3}), Porosidade inicial (P_{si} , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e na pressão de preconsolidação ($P_s\sigma_p$, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), gleba 1, área 1, profundidade CMRM.....	70
23. Análise geoestatística: Umidade gravimétrica (U , kg kg^{-1}), pressão de preconsolidação (σ_p , kPa), Densidade inicial (D_{si} , Mg m^{-3}) e na pressão de preconsolidação ($D_s\sigma_p$, Mg m^{-3}), Porosidade inicial (P_{si} , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e na pressão de preconsolidação ($P_s\sigma_p$, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), gleba 2, área 1, profundidade superficial (0-0,1 m).....	70
24. Análise geoestatística: Umidade gravimétrica (U , kg kg^{-1}), pressão de preconsolidação (σ_p , kPa), Densidade inicial (D_{si} , Mg m^{-3}) e na pressão de preconsolidação ($D_s\sigma_p$, Mg m^{-3}), Porosidade inicial (P_{si} , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e na pressão de preconsolidação ($P_s\sigma_p$, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), gleba 2, área 1, profundidade CMRM.....	71
25. Análise geoestatística: Umidade gravimétrica (U , kg kg^{-1}), pressão de preconsolidação (σ_p , kPa), Densidade inicial (D_{si} , Mg m^{-3}) e na pressão de preconsolidação ($D_s\sigma_p$, Mg m^{-3}), Porosidade inicial (P_{si} , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e na pressão de preconsolidação ($P_s\sigma_p$, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), Área 2, profundidade superficial (0-0,1 m).....	71
26. Análise geoestatística: Umidade gravimétrica (U , kg kg^{-1}), pressão de preconsolidação (σ_p , kPa), Densidade inicial (D_{si} , Mg m^{-3}) e na pressão de preconsolidação ($D_s\sigma_p$, Mg m^{-3}), Porosidade inicial (P_{si} , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e na pressão de preconsolidação ($P_s\sigma_p$, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), Área 2, profundidade CMRM.....	71
27. Análise geoestatística da resistência à penetração (índice de cone – IC) na área 1, Buriti-Mirim, 2002.....	72
28. Análise geoestatística da resistência à penetração (índice de cone – IC) na área 1, Buriti-Mirim, 2004.....	72
29. Análise geoestatística da resistência à penetração (índice de cone – IC) na área 2, Buriti-Mirim, 2004.....	72

30. Média da resistência à penetração (IC, kPa) da área 1, comparação estatística entre os anos de 2002 e 2004 pelo Teste de Tukey, a probabilidade de 5%.....	78
31. Média da Resistência à penetração (IC, kPa), comparando os sistemas de cultivo (PD e PC), área 1, 2004, análise estatística pelo Teste de Tukey, a probabilidade de 5%.....	78
32. Média da Resistência à penetração (kPa), comparando os sistemas de cultivo (PDR e PC), área 2, 2004, análise estatística pelo Teste de Tukey, a probabilidade de 5%.....	79
33. Média da umidade (U, kg kg ⁻¹), pressão de preconsolidação (σ_p , kPa), densidade inicial (Dsi, Mg m ⁻³) e porosidade inicial (Psi, m ³ m ⁻³) considerando os sistemas de manejo (PDR e PC), área 2, 2004, análise estatística pelo Teste de Tukey, a probabilidade de 5%.....	81
34. Média da densidade do solo inicial (Dsi, Mg m ⁻³) e da porosidade inicial (Psi, m ³ m ⁻³) considerando os sistemas de manejo (PD e PC), Área 2, 2004, análise estatística pelo Teste de Tukey, a probabilidade de 5 %.....	87
35. Média da umidade (U, kg kg ⁻¹), pressão de preconsolidação (σ_p , kPa), comparando os sistemas de manejo (PD e PC), área 2, 2004, análise estatística pelo Teste de Tukey, a probabilidade de 5 %.....	93
36. Análise Estatística de comparação das equações do modelo de CSCS ($\sigma_p = 10^{(a+bU)}$) pelo teste de Snedecor & Cochran (1989).....	96
37. Valores de pressão de contato pneu/solo, corrigidos segundo a proposição de Silva et al. (2003), exercida no solo por parte das máquinas e equipamentos agrícolas das utilizados na fazenda Buriti-Mirim.....	97
38. Valores de Teor de água do solo para o tráfego de máquinas de maneira a garantir a CSCS (U, kg kg ⁻¹).....	99

1 RESUMO

Os solos agrícolas têm sofrido grande alteração na sua estrutura devida à compressão causada pelo tráfego de equipamentos pesados, muitas vezes com carga superior àquelas que eles podem suportar, principalmente quando se encontram em umidades acima do seu limite de plasticidade, e isto tem sido um fator determinante na obtenção da produtividade agrícola. O presente trabalho teve por objetivos estudar o impacto do manejo e da rotação de cultura sobre a sustentabilidade estrutural de solo localizado na Bacia do Alto Paranapanema, em áreas da fazenda Buriti Mirim, áreas 1 e 2, irrigadas com sistema de pivô central em Argissolo Acinzentado de textura franco arenosa. Dois sistemas de cultivo foram avaliados: Plantio Convencional e Direto. Os impactos foram conhecidos por meios da quantificação das Pressões de Contatos (PC) do parque de máquinas e de alterações estruturais avaliadas pela resistência do solo à penetração, medidas pelo Índice de Cone (IC), Pressão de Preconsolidação (σ_p), e outros índices físicos relativos a massa e volume do solo. Para isso, foram elaborados mapas e modelos matemáticos, para obter dados qualitativos e quantitativos do comportamento estrutural do solo. Obteve-se modelos de capacidade de suporte de carga do solo (CSCS) por meio do ajuste dos dados de σ_p , em função de U, utilizando-se do modelo exponencial ($\sigma_p = 10^{(a+bU)}$), proposto por Dias Junior. As avaliações foram realizadas nas camadas superficial (CS) do solo, de 0 a 0,10 m e subsuperficial ou camada de máxima resistência mecânica (CMRM), definida pelo IC. Os resultados permitiram concluir que o

impacto dos sistemas de cultivos alterou a estrutura dos solos agrícolas da Bacia do Alto Paranapanema, sendo que a rotação de cultura, após um período de 2 anos, não foi capaz de produzir reduções significativas nos valores de resistência do solo à penetração para minimizar os efeitos da compactação. As áreas cultivadas com plantio convencional apresentaram compactação mais intensa quando comparada às áreas cultivadas com plantio direto. Os mapas da variabilidade espacial das propriedades do solo foram importantes ferramentas para localização de áreas compactadas. Os modelos de CSCS foram capazes de identificar as camadas mais afetadas pelos sistemas de cultivo. Ao associar-se o modelo de compressibilidade e os limites de consistência às pressões de contato aplicadas ao solo pelas máquinas, pode-se prever as medidas a serem adotadas para a manutenção da estrutura dos solos agrícolas.

Palavras-chave: compactação do solo, índice de cone, pressão de preconsolidação.

STRUCTURAL SUSTAINABILITY OF A SOIL LOCATED AT “ALTO PARANAPANEMA” REGION SUBJECTED TO TWO CULTIVATION SYSTEMS.

Botucatu, 2007. 121p. Thesis (Doctorate in Agronomy / energy in agriculture, Universidade Estadual Paulista – UNESP).

AUTHOR: Virgínia Maria Fontes Cardoso

ADVISOR: Prof. Dr. Kleber Pereira Lanças

CO-ADVISOR: Prof. Dr. Reginaldo Barbosa da Silva

2 SUMMARY

Agricultural soils have undergone high alterations in its structure because of the necessary use of heavy equipment with a higher axle load mainly when it is found in humid conditions higher than its plasticity limit. This has been a limiting agricultural productivity factor. The present work evaluated management and crop rotation impact over structural sustainability of soils from “Alto Paranapanema” watershed in areas 1 and 2 at Buriti Mirim farm irrigated with a pivot central system in frank sandy texture Grayish Argisil. Two cultivation systems were evaluated: Convention Planting and Direct Planting. The impacts became known by means of Contact Pressure (CP) quantification of machinery and structural alterations evaluated by resistance to soil penetration measured by Cone Index (CI), Pre-consolidation Pressure (σ_p) and other physical indexes related to mass and volume of soil. Maps and mathematical models were done which allowed qualitative and quantitative evaluations of soil structural behavior. Soil load support capacity (SLSC) models were obtained by σ_p data adjustments according to U using exponential model ($\sigma_p = 10^{(a+bU)}$) proposed by Dias Junior. The evaluations were performed on the superficial soil layer (SP), i.e., from 0 to 0,10 m and sub superficially, or on the layer of maximum mechanical resistance (CMRM) defined by CI. The results concluded that management impact altered agricultural soils at “Alto Paranapanema” but culture rotation after 2 years did not produce significant reductions on soil resistance values to penetration to minimize compactation effects. The areas cultivated with conventional planting showed a more intense compactation when compared to direct planting areas. Spatial variability maps of soil properties were important tools to

localize compacted areas. CSCS models were able to identify the management system most affected layers. When one associates compressibility model and consistence limits to contact pressures applied on the soil by the machines, one may predict the measures to be adopted to maintain agricultural soils.

Key Words: soil compaction, cone index, preconsolidation pressure.

3 INTRODUÇÃO

A grande extensão das áreas agrícolas tem favorecido a implantação da mecanização na agricultura que vem sendo praticada de forma exaustiva, não levando em consideração a capacidade de suporte de carga do solo e desconsiderando a umidade ideal para o tráfego.

A região do Alto Paranapanema é constituída por várias propriedades agrícolas filiadas ao sindicato rural, altamente tecnificadas, com parque de máquinas comunitário, mão de obra qualificada e assistência técnica. São grandes áreas cultivadas com cultura anual e sistema de irrigação via pivô central, onde são feitos planejamentos de plantio utilizando-se dois tipos de cultivo: plantios convencional e direto rotacionado.

No plantio convencional o solo é submetido ao revolvimento com auxílio de arado e de grade.

No plantio direto rotacionado, a cultura é implantada sobre os restos da cultura anterior, feito com baixa mobilização e com revolvimento reduzido à abertura de um sulco para deposição da semente.

Nessa área o cultivo plantio direto é dito rotacionado, porque no período de três anos são realizadas operações de preparo do solo ao final da cultura do algodão para eliminação de soqueiras e subsolagem para revolver as camadas compactadas.

O tráfego contínuo de equipamentos pesados e o preparo dos solos da região do Alto Paranapanema tem sido motivo de preocupação e traz a tona à necessidade de

avaliar o comportamento da estrutura do solo. Sendo ela influenciada pelo seu uso e manejo em áreas irrigadas, onde, nem sempre, o solo é trafegado em condições adequadas de umidades, o que pode levar a compactação de camadas do solo.

Esse fato vem sendo considerado um fator determinante na obtenção de produtividade agrícola reduzida.

A suscetibilidade do solo a compactação está condicionada a capacidade do solo em resistir aos esforços solicitados pelos equipamentos agrícolas e esta capacidade é função da umidade. Pesquisadores têm demonstrado que a compactação aumenta a densidade do solo e a sua resistência mecânica, provocando conseqüente diminuição da porosidade e modificações na continuidade dos poros, dificultando a infiltração de água e o crescimento das raízes.

O solo é um recurso natural, não renovável em curto prazo, essencial a sobrevivência dos seres humanos e de todo o ecossistema terrestre e vem sendo explorado para satisfazer as necessidades humanas sem levar em consideração suas limitações. Contudo o uso do recurso solo tem-se tornado uma preocupação de interesse mundial.

Para estudar os efeitos indesejáveis da compactação, alguns autores vêm utilizando-se da pressão de pré-consolidação e a resistência à penetração para avaliar o comportamento compressível do solo.

A pressão de preconsolidação é uma medida da máxima pressão que o solo já esteve submetido e a resistência à penetração é medida pelo índice de cone, considerados importantes indicadores do quanto de carga o solo pode suportar sem que sofra compactação adicional.

São poucos os estudos que se propõem a determinar o nível de carga que um determinado solo, sob condições específicas de manejo, estaria apto a receber, sem sofrer compactação adicional em suas camadas.

A utilização de máquinas e implementos cada vez mais potentes e pesados na agricultura conduz a necessidade de criação ou adaptação de metodologia que visem mensurar as propriedades do solo que levem em conta sua estrutura.

Com base neste contexto, este trabalho teve como objetivos estudar o impacto de sistemas de cultivos e da rotação de culturas sobre a sustentabilidade estrutural de solo localizado na Bacia do Alto Paranapanema, por meio de índices físicos relativos a massa

e volume do solo, mecânicos avaliadas pela resistência do solo à penetração, medidas pelo o Índice de Cone (IC) e Pressão de Preconsolidação (σ_p) e dinâmicos do solo quantificação das Pressões de Contatos (PC) do parque de máquinas.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Estrutura do Solo

O solo é um sistema aberto, poroso, heterogêneo e dinâmico, constituído por três fases: a fase sólida que é constituída de um conjunto de partículas que são formadas por compostos orgânicos (M.O.) e inorgânicos (mineral) que formam a estrutura do solo deixando espaços vazios entre as partículas, onde se encontra a fase líquida e gasosa. As partículas, de maneira geral, se encontram livres para se deslocar entre si e em alguns casos, pequenas cimentações podem ocorrer entre elas (PINTO, 2002).

A matriz do solo é composta pela organização das partículas de areia, silte, argila, matéria orgânica que variam sua composição química, tamanho e forma; são constituídas de substância amorfa, particularmente as matérias orgânicas, que se associa aos grãos minerais que podem resultar em acoplamentos chamados agregados (BAIZE & JABIOL, 1995).

A natureza dispersa do solo promove atividades de interface que dão origem a muitos fenômenos como adsorção de água e elementos químicos, capilaridade, intercâmbio iônico, expansão e contração de argilas, como também a alternância de dispersão e floculação do solo (MUSY & SOUTER, 1991; PORTA et al., 1999; DON SCOTT, 2000).

O agregado não é uma partícula elementar, mas um aglomerado de partículas cuja coesão interna está assegurada pela presença de argila, compostos de ferro e

alumínio, matéria orgânica e água, sendo resultado da organização natural destes componentes. O tipo de união das partículas elementares do solo é uma de suas características físicas mais importantes e que podem ser modificadas pelos sistemas de manejos que provocam uma evolução rápida da estrutura. As características observadas na estrutura do solo dependem em grande parte do teor de água dos horizontes que é influenciado pelo clima (RUEDA, 1997).

A estrutura da matriz do solo determina as características geométricas do espaço poroso, onde a água do solo varia em composição, tempo e espaço. A proporção relativa das três fases no solo não é fixa, e é estabelecida por trocas contínuas que dependem do clima, vegetação e manejo (INGARAMO, 2003).

Segundo Kay (1990) a estrutura do solo pode ser caracterizada em função de três termos: arquitetura, estabilidade e resiliência (capacidade de se reestabelecer após a de deformação). A arquitetura descreve a organização das partículas sólidas e os espaços porosos existentes no solo em um dado momento; já a estabilidade estrutural representa a capacidade do solo em manter a arquitetura da fração sólida e seu espaço poroso quando são submetidas à ação de forças, ou seja, refere-se à resistência dos agregados a ação da água ou a deformação por ação de esforços mecânicos externos e a resiliência é a capacidade do solo de restabelecer sua organização primitiva quando são anuladas as forças que originaram a degradação.

Toda a carga ou tensão externa aplicada sobre uma unidade estrutural, origina uma modificação na geometria da mesma. A resistência que um elemento estrutural opõe aos deslizamentos de suas partículas tem sido primordial para caracterizar sua estabilidade (HARTGE et al., 1990).

4.2 Porosidade e Densidade do solo

A porosidade é uma rede de espaços inter-relacionados, que podem ser classificados como: porosidade residual que se refere aos poros desprovidos de comunicação com o sistema e com o exterior (ocluidos) e porosidade efetiva que são os poros que se

comunicam entre si. A porosidade efetiva se subdivide em duas partes: macroporosidade e microporosidade, onde o limite entre elas se situa entre 30 e 60 μm (PORTA et al., 1999).

As características do sistema poroso, tais como, porosidade total, distribuição do tamanho dos poros, continuidade e estabilidade do sistema poroso, são importantes para o desenvolvimento dos processos de infiltração, drenagem, aeração e partículas coloidais, retenção e armazenamento de água. A porosidade do solo permite o processo de reserva hídrica no solo e é de importância crucial para os cultivos, pois a água pode ser um fator limitante durante as etapas do seu desenvolvimento (CAMARGO, 1983).

O arranjo relativo das partículas primárias e agregados estabelece o espaço poroso do solo. Este espaço poroso tem uma grande importância nos processos biológicos, físicos e químicos que ocorrem dentro do solo (PORTA et al., 1999).

O espaço poroso é consequência do desenvolvimento da estrutura (DEXTER, 1988), e o estudo da porosidade vem sendo utilizado, freqüentemente, como método de análise indireta da estabilidade estrutural.

A densidade do solo é considerada uma das propriedades a medir para avaliar a qualidade estrutural de um solo, sendo utilizada como indicador de sua estrutura e dureza. Mudanças na densidade do solo refletem modificações na estrutura do solo, devido à relação que existe entre a densidade do solo e a porosidade total. Apesar da porosidade total não ser um indicativo da distribuição e tamanho de poros, ela pode ser uma propriedade que, juntamente com a densidade do solo, reflete os efeitos de compactação dos solos (DORAN et al., 1994).

Os valores de densidade do solo refletem a dureza e a porosidade do solo que podem afetar o crescimento das raízes e, quando há modificação da mesma, conseqüentemente alteram-se a resistência mecânica e a porosidade e muitas outras propriedades do solo. Numa situação em que a densidade aumenta, há tendência de aumento da resistência mecânica, bem como a porosidade tende a diminuir, formando uma nova estruturação dos constituintes do solo e estas modificações podem limitar o crescimento das raízes a valores críticos (CAMARGO, 1983).

Os valores críticos da densidade para o crescimento das raízes variam de acordo com a textura apresentada pelo mesmo. Para solos arenosos com cultura de girassol valores de densidade de $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$ limita o crescimento das raízes, enquanto que para solos

argilosos esse valor crítico fica em torno de 1,46 a 1,63 Mg m⁻³ (VEIHMEYER & HENDRICKSON, 1948; JONES, 1983).

Fernandez et al (1995) verificaram completa inibição do crescimento radicular da soja, em Latossolo Vermelho Escuro textura média, quando a densidade do solo apresentou valores a partir de 1,52 Mg m⁻³.

Para Rueda (1997) a variação espacial e temporal da densidade é consequência da consolidação natural do solo durante os processos de adensamento (umedecimento-secamento) ou da compactação diferencial induzida pela ação da maquinária agrícola.

4.3 Estados e Limites de Consistência

Baseando-se no comportamento dos solos finos (silte e argila) na presença de água, observou-se que, quando muito úmido, as partículas ficam em suspensão na água e se comportam como um líquido; quando perde parte de sua água, as partículas passam a deslizar umas sobre as outras e a água passa a funcionar como um lubrificante, o solo torna-se plástico; e quando mais seco, os grãos se aglutinam entre si formando torrões e tornam-se quebradiços, definindo, assim, limites de umidade que modificam o comportamento do solo.

As umidades correspondentes à mudança de estado de consistência do solo (Figura 1) são definidas como: limite de contração (LC), limite de plasticidade (LP) e limite de liquidez (LL) (Atterberg, 1911).

Portanto, a umidade do solo é a grande responsável pela deformação do solo quando os demais atributos permanecem constantes, pois quanto menor o teor de água do solo maior será sua capacidade de suporte de carga e menor a possibilidade de compactação, dentro de certos limites.

O conhecimento dos limites de consistência do solo é de grande valia para se ter uma idéia das condições de umidade que o solo deve estar no momento de realização das operações agrícolas, que devem ocorrer dentro da região de friabilidade, muito

embora não seja uma garantia de que o solo tenha capacidade de suporte de carga ideal para resistir aos esforços solicitados.

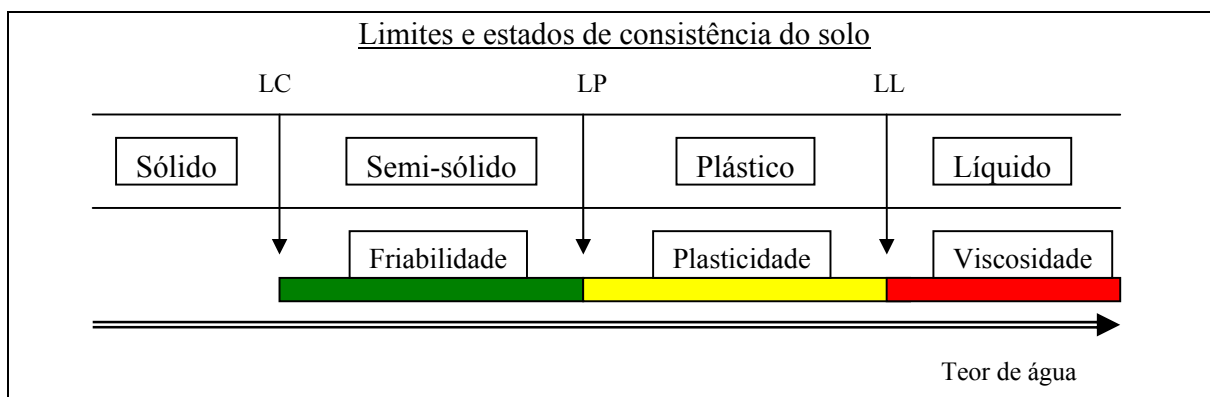


Figura 1 - Representação esquemática dos estados e limites de consistência do solo. LC: limite de contração; LP: Limite de plasticidade; LL: limite de liquidez.

A partir destes limites identificam-se os estados ou regiões de consistência importantes para o tráfego agrícola ou preparo do solo, são elas: região de friabilidade (RF) que representa a faixa de umidade entre o limite de contração e o limite de plasticidade, e a região de plasticidade (RP), que representa a faixa de umidade entre o limite plástico e o limite de liquidez (SILVA, 2002).

A RF é considerada, na falta de maiores informações, a faixa de umidade ideal para estar recebendo o tráfego de máquinas agrícolas, o que acontece para alguns solos, mas uma certeza só pode ser definida após ensaios que determinem a capacidade de suporte do solo.

4.4 Compactação do solo

Em mecânica dos solos compactação é um processo de densificação do solo por meio de equipamento mecânico tendo em vista aumentar o contato entre as partículas, reduzindo os vazios do solo, aumentando sua resistência e estabilidade, com a finalidade de

tornar os aterros mais homogêneos (VARGAS, 1977; PINTO, 2002; DUNN et al., 1941; CERNICA, 1982).

A compactação de solos agrícolas é um conceito complexo e um fenômeno de difícil descrição e mensuração. Consiste na alteração da estrutura do solo, geralmente causada por tráfego de máquinas e implementos agrícolas ou pela degradação causada pelas operações de preparo.

Na agricultura, segundo Koolen (1994) a compactação é referida sob o aspecto do decréscimo do volume e deformação do solo por causa da atuação de forças externas, entre elas a mais significativa é o tráfego de campo, que freqüentemente não é adequadamente adaptado ao tipo de solo, estrutura e teor de água.

Horn & Lebert (1994) e Dias Junior (2000) definem a compactação do solo como a compressão do solo não saturado, durante a qual existe um aumento de sua densidade com conseqüente redução de poros do solo. Quando o fenômeno de redução de volume ocorre com a expulsão de água pelos poros, o fenômeno passa a chamar-se adensamento. Em ambos os casos esta redução de volume acontece na maior parte dos casos, devido ao inadequado manejo do solo.

Desde o século XIX observa-se que o desenvolvimento da agricultura com relação ao preparo do solo vem acompanhado por processos de compactação do solo. Porém, nos últimos 30 anos, a mecanização avançou em tal escala e intensidade que os problemas relacionados à compactação tornaram-se de importância mundial (SOANE & VAN OUWERKERK, 1994).

Nas práticas de manejo convencional, onde há intensa mecanização, os problemas de compactação são acentuados e, nas culturas anuais, estes efeitos são mais evidenciados devido à intensiva mobilização do solo durante as operações de preparo (SILVA et al., 1986).

A produtividade agrícola fica prejudicada com os efeitos nocivos da compactação, porque esta proporciona condições desfavoráveis ao crescimento das plantas (NOVAK et al., 1992 e PEDROTTI et al., 1998), pois o desempenho das culturas estão condicionados às condições físicas e químicas do solo (ORTOLANI et al., 1982; NEGI et al., 1990).

A compactação, ao causar modificações na estrutura do solo, pode limitar adsorção do solo e a absorção de nutrientes pela planta, a infiltração e a distribuição de água, causando problemas no estabelecimento e crescimento das raízes. Estas limitações são devidas às alterações dos atributos físicos do solo como: aumento da densidade e resistência à penetração, diminuição da porosidade e modificações na continuidade dos poros (GREACEN & SANDS, 1980; FLOWERS & LAL, 1998), tendo como consequência um sistema radicular que se concentra na camada superficial do solo, diminuindo a área de contato solo-raiz e o resultado é menor disponibilidade de nutrientes (LANÇAS et al, 1990).

Experimentos conduzidos por Taylor e Gardiner (1963) mostraram que a penetração radicular diminuiu com o aumento da densidade do solo para um determinado potencial de água no solo e, por outro lado, para solo com mesma densidade, a penetração diminuiu com a diminuição da umidade, concluindo que a resistência mecânica do solo foi a grande responsável pelas alterações na penetração das raízes. Portanto, a diminuição no teor de água aumenta a resistência do solo e faz com que as raízes em expansão experimentem um impedimento mecânico cada vez maior.

A resistência do solo também pode limitar a produção vegetal, o que ocorre quando a diminuição do crescimento das raízes é de tal magnitude que o aprovisionamento em água do cultivo se reduz em relação ao nível ótimo.

Em relação ao crescimento e desenvolvimento da vegetação, a resistência mecânica do solo pode ser um fator favorável ou desfavorável o que depende de sua magnitude e sua distribuição espacial, assim como dos planejamentos agrícolas utilizados. Assim, o aumento da resistência mecânica devido ao secamento ou compactação pode ser favorável se melhora a capacidade de suporte de carga do solo e trafegabilidade, no entanto, pode provocar dificuldades para obter uma estrutura do solo adequada para planta.

O efeito da compactação pode ser reconhecido através de sintomas visuais na planta e no solo. Na planta os sintomas mais frequentes são: emergência lenta da plântula; plantas com tamanhos variados, tendo mais plantas pequenas do que o normal; plantas de colorido deficiente; sistema radicular raso; raízes mal formadas. No solo são: crosta, fendas nas marcas das rodas do trator, zonas compactadas de superfície, empocamento de água, erosão pela água excessiva, aumento da necessidade de potência para os cultivos,

presença de restos de resíduos não decompostos, meses após a incorporação. (ROBERTSON & ERICKSON, 1978).

O comportamento mecânico do solo frente à ação de um esforço externo depende da magnitude, distribuição e orientação da deformação interna induzida. Portanto, as características da relação tensão-deformação é função dos fatores intrínsecos: textura, densidade, agregação, continuidade do sistema poroso, teor de matéria orgânica, umidade e potencial hídrico; e dos fatores externos: intensidade da carga, superfície de contato, tempo de aplicação, etc. (RAGHAVAN et al., 1990; SNAKIN et al., 1996; ASSOULINE et al., 1997; DEFOSSEZ & RICHARDS, 2002).

A compactação do solo provoca um aumento da resistência mecânica já que origina um maior número de zonas de contato e uma ação cimentante mais firme entre os agregados.

De acordo com Hartge e Horn (1990), a resistência mecânica induzida por compactação depende não só da carga aplicada, mas também do tempo de aplicação, o que está de acordo com o feito já conhecido de que a relação tensão-deformação durante a compactação do solo depende do tempo de aplicação.

Enquanto a origem da variabilidade espacial da resistência mecânica “in situ” há que se ter em conta em primeiro lugar que o manejo do solo origina um ciclo anual durante o qual o solo alternativamente se compacta e se volta afogado. O principal objetivo do manejo é precisamente diminuir a compactação ao menos nos horizontes superficiais.

A distribuição dos rodados nas parcelas agrícolas e a umidade do solo durante o manejo é o principal fator responsável da heterogeneidade espacial da resistência mecânica (CAMPBELL & O’SULLIVAN, 1991).

Por outra parte, tanto as condições climáticas como as técnicas de manejo influem na distribuição da resistência mecânica dentro do perfil.

4.5 Compressibilidade do solo

Compressibilidade é a propriedade que certos materiais têm de mudarem de forma ou volume quando sujeito a forças externas (VARGA, 1977).

O solo é considerado um material compressivo e esta compressibilidade expressa, quantitativamente, a resposta do solo à compactação, quando um determinado esforço é aplicado (SOANE, 1990). A compressibilidade depende de propriedades físicas-mecânicas do solo, como textura, resistência individual dos grãos, densidade, estrutura, grau de saturação, permeabilidade e tempo de ação da carga (BARATA, 1984). A propriedade que mais influencia a compressibilidade é a textura (LARSON et al., 1980; HORN, 1988; HAKANSSON et al., 1988; MC BRIDE, 1989), sendo o tipo e o teor de argila quem mais interferem no comportamento compressível do solo (LARSON et al., 1980; HORN, 1988; MC BRIDE & WATSON, 1990).

A umidade do solo é considerada o fator de grande influência na compressibilidade do solo (SOANE & VAN OUWERKERK, 1994). Portanto, cuidados devem ser tomados quando se realiza a irrigação dos solos, pois um monitoramento inadequado do tráfego de máquinas quando o solo encontra-se com umidades excessivas poderá acelerar o processo de compressão do solo (BETTERIGE et al., 1999).

Para o entendimento do processo de compressão dos solos muitos autores se baseiam na curva tensão versus deformação que é representada graficamente pelo logaritmo da pressão aplicada e a deformação do solo traduzida pela densidade ou índice de vazios (CASAGRANDE, 1936) (Figura 2).

As pesquisas têm demonstrado que quando os solos não sofreram nenhuma pressão prévia, apresentam uma relação linear entre a pressão aplicada e a densidade do solo, ou seja, a curva de compressão é linear (LARSON & GUPTA, 1980; LARSON et al., 1980; CULLEY & LARSON, 1987; GUPTA & ALLMARAS, 1987; LEBERT & HORN, 1991; DIAS JUNIOR & PIERCE, 1995). Neste caso é conhecida como reta de compressão virgem, onde qualquer pressão aplicada resultará em deformações não recuperáveis. Já para solos que possuem um histórico de tensões, ou seja, já estiveram submetidos a cargas externas, estes apresentam relação curvilínea entre pressão aplicada e a densidade do solo (Figura 2), onde o ponto de inflexão da curva corresponde a pressão de preconsolidação (σ_p). Este ponto

divide a curva de compressão em duas regiões: a primeira região indica que quando for aplicada ao solo pressões menores que σ_p , resultará em deformações pequenas e recuperáveis (deformações elásticas) que formam a chamada curva de compressão secundária e, a segunda região indica que quando for aplicada ao solo pressões maiores que σ_p , isto resultará em deformações irreversíveis (deformações plásticas) que compõem a reta de compressão virgem (LEBERT & HORN, 1991; DIAS JUNIOR & PIERCE, 1995; SILVA et al., 2005).

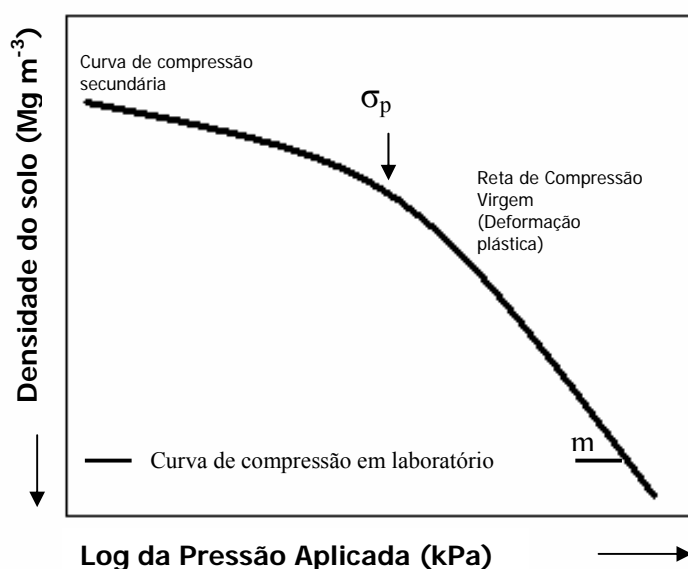


Figura 2 - Curva de compressão do solo mostrando a curva de compressão secundária, reta de compressão virgem com suas regiões de deformações elásticas e plásticas, respectivamente, a posição da pressão de pré-consolidação (σ_p), e o índice de compressão (m) (DIAS JUNIOR, 1994).

Terzaghi (1943) introduziu um índice para indicar a inclinação da reta virgem, denominado índice de compressão que é a razão entre a variação de densidade ou índice de vazios pelo incremento da pressão aplicada, e este é considerado um indicador da suscetibilidade do solo à compactação (LARSON et al., 1980; SILVA et al., 2000).

Índices de compressão elevados indicam que para variações pequenas na pressão aplicada provocam deformações consideráveis que modificam a relação solo-água-

ar, muito embora esses solos não necessariamente apresentem condições inadequadas para o crescimento das plantas (GUPTA & ALLMARES, 1987).

Variações no índice de compressão do solo podem ser atribuídas a diferenças no tipo de mineral argila presente no solo e o teor de matéria orgânica (LARSON et al., 1980).

Imhoff (2002) estudou o índice de compressão (IC) para Latossolos Vermelhos verificou que o mesmo foi significativamente relacionado com o teor de argila e a densidade do solo. Sua relação com a densidade foi negativa e linear em toda a faixa de amplitude de variação do teor de argila, aumentando linearmente com o teor de argila até um determinado valor onde passa a ser constante. Porém, o IC não foi afetado pelo teor de matéria orgânica. Já algumas pesquisas verificaram que solos de textura grossa foram menos susceptíveis à compressão do que solos de textura fina (HORN 1988; MC NABB & BOERSMA, 1993; HORN & LEBERT, 1994; MC BRIDE & JOOSSE, 1996).

Para solos brasileiros, pesquisas que analisam o índice de compressão demonstraram que este foi afetado pela densidade do solo, umidade e sistemas de manejo (KONDO & DIAS JUNIOR, 1999b; KONDO & DIAS JUNIOR, 1999c; SILVA et al 2000; SILVA et al., 2002; SILVA et al., 2002a).

Alguns estudos de compressibilidade dos solos têm dado ênfase à reta de compressão virgem que está ligada às deformações irrecuperáveis e não levam em consideração o histórico de tensão do solo causado por diferentes sistemas de manejos (DIAS JUNIOR & PIERCE, 1996).

Considerando a curva de compressão secundária, alguns autores assinalaram que esta indica as pressões submetidas ao solo no passado, refletindo a sua história de manejos (BAILEY et al., 1986; MC NABB & BOERSMA, 1993; DIAS JUNIOR, 1994; MC BRIDE & JOOSSE, 1996; ASSOULINE et al., 1997; OLIVEIRA, 2003). Portanto, a pressão de preconsolidação (σ_p) representa a máxima pressão que o solo já suportou no passado, conseqüentemente, a aplicação de pressões maiores que a pressão de preconsolidação devem ser evitadas nos sistemas de cultivos, de maneira a prevenir a ocorrência de uma compactação adicional ao solo (DIAS JUNIOR & PIERCE, 1995).

Portanto, a pressão de preconsolidação (σ_p) é uma estimativa da capacidade de suporte de carga do solo (LEBERT & HORN, 1991; DIAS JUNIOR &

PIERCE, 1996). Valores elevados de σ_p indicam condições favoráveis ao tráfego, porém inadequadas ao crescimento das raízes (DIAS JUNIOR & PIERCE, 1996; KONDO & DIAS JUNIOR, 1999a), pois apresentam dificuldades a elongação do sistema radicular (CANARACHE et al., 2000; MOSADDEGHI et al., 2003).

A pressão de preconsolidação é determinada graficamente por meio da curva de compressão do solo pelo método empírico proposto por Casagrande (1936) que é o mais difundido internacionalmente. Porém, outros métodos mais recentes são propostos e permitem definir com mais precisão a pressão de preconsolidação (σ_p). Dias Junior & Pierce (1995) propõem um método para determinar a pressão de preconsolidação fazendo-se uso de uma planilha eletrônica elaborada a partir de programas computacionais como Excel.

Dias Junior (1994) mostrou que o histórico de tensão e, principalmente, a variação do teor de água, afeta o comportamento compressivo do solo. O autor desenvolveu um modelo que descreve uma relação exponencial entre a pressão de preconsolidação e o teor de água. Este modelo é da forma: $\sigma_p = 10^{(a + b U)}$, onde σ_p é a pressão de preconsolidação; a e b são parâmetros ajustados e U é a umidade gravimétrica que permite determinar a máxima pressão que o solo pode suportar sem sofrer compactação adicional para determinados valores de umidade.

Salire et al. (1994) estudou a relação entre a pressão de preconsolidação (σ_p) e a densidade do solo e verificaram que existe uma relação linear e positiva, entre eles, concluindo que a pressão de preconsolidação pode ser usada como um indicador seguro para avaliar a capacidade de suporte de carga do solo.

Kondo (1998) testou o modelo proposto por Dias Junior (1994) para latossolos da região de Lavras e concluiu que as alterações nas propriedades físicas e mecânicas do solo, induzidas pelo manejo, afetaram o seu comportamento compressivo e sugere que o limite de plasticidade do solo (LP) pode ser usado como uma referência do teor de umidade máximo no qual as operações motomecanizadas possam ser realizadas.

Kondo & Dias Junior (1999b) estudaram a variação da pressão de preconsolidação em função de valores de umidades em Latossolos sob condições de cultura anual, mata e pastagem e reforçaram a idéia de que a pressão de preconsolidação seja um indicador da capacidade de suporte de carga de solos agrícolas.

Silva et al. (2000) verificou que a pressão de preconsolidação se relacionou linearmente com a umidade e densidade para um Latossolo Vermelho Escuro e um Podzólico Vermelho Amarelo.

Silva et al. (2002 a) estudando um Latossolo e um Argissolo sob os seguintes sistemas de manejo: Plantio Direto e Convencional verificaram que a pressão de preconsolidação variou com o sistema de manejo do solo, aumentando de forma exponencial com o aumento da densidade para um dado grau de saturação. Assinalando que, devido à variação nos resultados encontrados, haveria necessidade de estudos sobre a influência do estado de compactação e teor de água na pressão de preconsolidação para outros solos e sistemas de manejos.

Silva (2002) desenvolveu modelos de compressibilidade em função da pressão de preconsolidação do modelo proposto por Dias Junior (1994), sendo avaliadas três áreas sob diferentes intensidades de uso, em Latossolo Vermelho Distrófico, concluindo que a pressão de preconsolidação foi um bom parâmetro para avaliar a capacidade de suporte de carga do solo, podendo assim ser indicadora da sustentabilidade estrutural dos solos agrícolas.

Imhoff (2002) objetivando determinar a influência de atributos intrínsecos à susceptibilidade de um Latossolo à compactação verificou que a pressão de preconsolidação se mostrou significativamente relacionada com a densidade, umidade e teor de argila, não sendo afetada pelo teor de matéria orgânica e a compressibilidade dos Latossolos Vermelhos foi dependente da condição estrutural do solo, especificamente do seu estado de densidade inicial.

Lima (2004) relatou que o processo de compactação dos solos de regiões tropicais é influenciado pelo sistema de manejo aplicado devido às alterações que o mesmo induz as propriedades físicas do solo. O autor referiu que a intensidade do tráfego de máquinas influenciou a curva de compressão e a pressão de preconsolidação, sendo esses parâmetros de grande utilidade na avaliação da heterogeneidade da compactação para um Latossolo Vermelho Amarelo sob cultivo de laranja. Afirmou, também, que a resistência do solo à penetração foi indicada como uma propriedade física de grande potencialidade na estimativa da capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho Amarelo sob pomar de laranja. O mesmo autor em estudos do processo de compactação de um Argissolo vermelho sob sistema de pastejo rotacionado irrigado e não irrigado, concluiu que os

sucessivos ciclos de pastejo induziram aumento na pressão de preconsolidação evidenciando que a técnica da irrigação deve ser utilizada com cuidado para não provocar a degradação do solo.

Os indicadores da qualidade do solo referem-se aqueles atributos que identificam a capacidade do solo em sustentar a produtividade das culturas em longo prazo (CARTER et al., 1997).

Imhoff (2002) utilizou funções de pedotransferências para um modelo não linear, que incorpora a influência da densidade inicial na estimativa da densidade final do solo, demonstrou ser adequado para prever o comportamento compressivo de Latossolo Vermelho que possuem ampla variação textural e estrutural, quando submetidos a cargas externas.

4.6 Resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração é uma medida que permite avaliar o efeito do tráfego e de resistência dos solos à penetração das raízes. Trata-se de um indicador para prever a capacidade de suporte de carga do solo parcialmente saturado e, portanto, um atributo utilizado para estabelecer condições restritivas ao desenvolvimento radicular e à produtividade das culturas (CANARACHE et al., 2000; KIRBY & BENGOUGH, 2002; MOSODDEGHI et al., 2003).

Segundo Machado et al. (1999) a resistência à penetração (índice de cone) pode ser utilizada como uma propriedade adequada para a caracterização das condições físicas-mecânicas do solo e estimativas das interações solo-máquina (trafegabilidade, compactação e métodos de preparo do solo) e solo-raiz (impedimento mecânico, restrição ao crescimento).

A correlação da pressão de preconsolidação com a resistência do solo é uma medida útil para avaliar a capacidade de suporte de carga do solo, porque a resistência à penetração é de determinação rápida e requer equipamentos de baixo custo (LIPIEC & HATANO, 2003; NEVENS & REHEAL et al., 2003).

Uma correlação linear entre a pressão de preconsolidação e a resistência do solo à penetração foi obtida por Culley & Larson (1987) para um solo franco argiloso sob diferentes sistemas de manejos, mostrando que a resistência à penetração é um indicador útil para caracterizar a capacidade de suporte de carga do solo em condições de campo. Burguer et al. (1988) mostraram que a variação da capacidade de suporte de carga é comparável com a variação da resistência à penetração em profundidade.

Canarache et al. (2000) estudou a relação entre a resistência do solo à penetração e a pressão de preconsolidação em solos franco siltosos e argilo siltosos em experimento de campo em longo prazo, determinaram uma relação 10:1 entre estas propriedades, sendo esta relação confirmada por estudos feitos por Mosaddeghi et al. (2003) para solo franco argilo siltosos. Já Lima (2004) encontrou uma relação 17:1 para um latossolo vermelho amarelo, tal diferença foi atribuída à textura do solo.

Considerando que valores de resistência do solo à penetração superior a 2 MPa provocam limitações ao crescimento radicular e conhecendo a relação entre resistência à penetração e a pressão de preconsolidação poderá permitir estabelecimento de estimativa da capacidade de suporte de carga para evitar a degradação estrutural do solo.

Alguns autores avaliaram a camada de solo compactada em função da resistência a penetração. Silva et al. (1989) que obtiveram valores da ordem de 1,757 MPa como índice de compactação do solo, enquanto Fernandes & Lanças (1997) verificando os níveis de compactação do solo causado pelo tráfego de “Fowarder” em áreas florestais, determinaram valores máximos de resistência à penetração de 3,19 MPa, após a última passada da máquina.

A possibilidade de medir a compactação e as condições de trafegabilidade de solos por meio do uso de penetrômetros tem aumentado sua utilização e importância nos estudos de dinâmica dos solos (BALASTREIRE, 1987).

4.7 Interação Pneu/solo

A aplicação de cargas dinâmicas ao solo produz tensões tanto na interface pneu-solo como em profundidade.

As pressões de contato são obtidas da razão entre força e área durante a interação pneu-solo, o que significa relacionar o peso aplicado por uma máquina agrícola com a área de contato que o pneu imprime ao solo (SILVA & LANÇAS, 2005). Estes carregamentos são responsáveis pela distribuição de tensões que solicitam uma reação do solo, podendo provocar a compactação dos mesmos.

As reações dinâmicas do solo durante a tração ou movimentação mecânica no mesmo afetam o projeto e o uso das máquinas, onde a tração é definida como a força derivada do solo para puxar uma carga. Essa força é evidentemente exercida sobre o solo por um mecanismo de tração como uma roda, ou esteira. A resistência dinâmica do solo para prover a tração é suprida por meio de uma interação entre o elemento de tração e o solo (BALASTREIRE, 1987).

A área de contato pneu-solo tem grande influência na eficiência trativa dos tratores agrícolas e, quanto maior a área de contato, melhor o desempenho dos pneus, reduzindo a sua patinagem. Conhecer a interação pneu-solo de maneira a aumentar consideravelmente o desempenho dos pneus agrícolas em diferentes condições de solo, torna-se necessário para minimizar os custos e aumentar a produtividade.

O desempenho operacional de rodados pneumáticos dos tratores agrícolas depende: das cargas aplicadas aos rodados, do tipo e construção do pneu, pressão de inflação do pneu e do tipo e condições físicas do solo. A interação correta entre estas variáveis minimiza os efeitos negativos do tráfego agrícola, fornece um aumento potencial de tração, com uma melhoria na eficiência trativa, melhora a eficiência e o rendimento do trator agrícola, diminui o tempo de operação da máquina, o que aumenta a vida útil dos tratores e dos rodados agrícolas e diminui a compactação do solo (SANTOS FILHO & LANÇAS, 1998).

O nível de carga sobre o rodado motriz dos tratores agrícolas é um fator determinante que influencia o desempenho do trator e, conseqüentemente, o desgaste dos pneus (NAGAOKA, 2001). Esta carga é diretamente afetada pela força em decorrência da variação nos valores de transferência de massa, o que, segundo Balastreire (1990), em termos práticos, é a capacidade do trator de utilizar a própria massa em benefício da aderência dos pneus e de ganho de tração.

Lanças et al. (1995a) ensaiou pneus agrícolas e concluíram que a utilização de pneus radiais corretamente inflados, com valores de pressões mais baixas,

resultou em alta capacidade tratória, baixo consumo de combustível, alta produtividade operacional e menor efeito do tráfego na compactação do solo.

Estudos feitos por Lanças et al. (1996) mostraram que a utilização de baixa pressão nos pneus radiais do trator causou redução no consumo de combustível de 18,3 %, enquanto que a capacidade de campo cresceu 7,5 %, e houve um incremento no índice de cone no rastro do pneu do trator de 9,8 % em solo firme. Com alta pressão nos pneus esse índice aumentou em 70,3 %.

Lanças & Upadhyaya (1997) sugeriram medidas para minimizar e prevenir os efeitos nocivos da compactação, citando: aumento do diâmetro e largura dos pneus, rodados duplos ou triplos, menores pressões de inflação do pneu para a mesma carga, restrição de tráfego em áreas úmidas. Estas medidas permitiram melhor trafegabilidade nas áreas agrícolas.

A trafegabilidade é a medida da capacidade do solo em suportar o movimento de um veículo (DEFENSE MAPPING SCHOOL, 1986) e está diretamente relacionada com seu teor de água. A trafegabilidade é função da capacidade de suporte de carga e das forças de cisalhamento, atrito e adesão do solo (KNIGHT & FREITAG, 1962).

Porterfield & Carpenter (1986) estudando a pressão média de contato de um pneu em uma superfície rígida, concluíram que: o nível de compactação superficial depende da pressão de contato, enquanto que a compactação subsuperficial depende da área de contato, largura do pneu e da carga suportada pelo mesmo.

Mazetto et al. (2003) avaliaram as áreas de contato, deformações elásticas, compactação e o recalque no solo para três tipos de pneus; baixa pressão e alta flutuação - BPAF (500/60-26.5), radial (14.9R26) e diagonal (14.9-26), em ensaios realizados em tanque de solo. Os pneus foram inflados com as pressões ideais e submetidos às cargas radiais de 5000, 10000, 15000 e 20000 N. Os resultados relativos às áreas de contato e deformações elásticas mostraram valores maiores para o pneu BPAF. Os recalques do pneu BPAF no solo foram menores, quando comparados aos outros rodados pneumáticos, resultando em menor compactação do solo.

Os métodos utilizados para a determinação do tamanho e forma da área de contato do pneu em solo deformável são baseados, principalmente, no resultado de ensaios conduzidos em condições estáticas, simulando a condição de um pneu em movimento

(BLASZKIEWICS, 1990; GODBOLE et al., 1993). Estas condições são caracterizadas interrompendo o movimento de um pneu e demarcando os limites da área de contato, cujas medidas são tomadas após a retirada do pneu. Estas medições são, na realidade, estáticas, uma vez que ao parar o pneu, a área de contato se altera devido ao gradual desaparecimento da deflexão do pneu, à semelhança do que ocorre também no solo (CASTRO NETO, 2001).

Os modelos teóricos e empíricos, que tem sido utilizados para a determinação da área de contato de pneus sobre superfícies rígidas e deformáveis, foram avaliados por Sharma & Pandey (1996). Os autores verificaram que os conceitos da teoria da resistência dos materiais, para superfícies rígidas e deformáveis poderiam ser utilizados. As áreas de contato de pneus sobre tais superfícies poderiam ser determinadas até uma dada amplitude, visto que, modelos empíricos têm limitações e restrições, quando aplicadas aos ensaios de pneus. Os autores verificaram que, na área de contato pneu-superfície rígida, o contato teria um perfil elíptico, e um comportamento uniforme, com relação às tensões, em uma seção meridiana do pneu. Os resultados dos ensaios mostraram, que esses modelos podem ser utilizados, na determinação da área de contato, desde que, sejam consideradas restrições, como pequenas deformações e pequenos deslocamentos.

Afirmam Sharma & Pandey (1996) que as características de eficiência de um rodado dependem, em grande parte, não somente da pressão de contato, mas também do tamanho e da forma da área de contato. Concluem que, para um rodado pneumático, a aproximação elíptica é o melhor estimador para a área de contato pneu-superfície.

As pressões aplicadas à superfície do solo por um pneu de trator são aproximadamente iguais àquela de inflação desse pneu. Entretanto, em alguns pontos, como nas garras do pneu e nas laterais dos aros, ocorrem pressões localizadas de valor maior (MANTOVANI, 1984).

Munson et al. (1994) verificaram a influência da pressão de inflação dos pneus na compactação do solo. Neste experimento mediu-se a tensão no solo em várias profundidades por meio da instalação de transdutores, quando o solo foi submetido ao tráfego de um trator equipado com pneus radiais e três pressões de inflação (48; 106,5; 165 kPa), sem carga e com carga suficiente para provocar uma patinagem de 8 %. Ao final, o trator que utilizou pneus com pressão de inflação de 48 kPa causou menor tensão no solo do que aquele

com pressão de inflação de 106,5 kPa, o qual causou menores tensões do que com pressão de inflação de 165 kPa.

A utilização de pneus mais largos e com baixas pressões de inflação minimizam os efeitos da pressão no solo. A utilização de tratores esteiras provoca menores pressões ao solo, uma vez que a sua área de contato com o solo é sensivelmente maior. Porém, nem sempre as cargas estão distribuídas uniformemente ao longo da área de contato, pois nas esteiras a concentração de tensões abaixo da roda motriz é bem maior do que em outros pontos da esteira.

Portanto, verifica-se a importância de quantificar os carregamentos e pressões de contato que estão sendo aplicadas ao solo durante as operações de manejo. Estas aliadas ao conhecimento da capacidade de suporte de carga dos solos agrícolas, ou seja, a resistência interna do solo (pressão de preconsolidação), em função do teor de água, pode-se fazer o dimensionamento do parque de máquinas e, criar sistemas de controle de tráfego que preservem a estrutura do solo de maneira sustentável.

4.8 Variabilidade Espacial das Propriedades do Solo

O solo tem sua origem da decomposição das rochas e são dispostos pela natureza em depósitos heterogêneos, apresentando variação espacial de suas propriedades tanto vertical como horizontalmente. As variações das características do solo são devidas a forma do relevo, elementos geomórficos, processos de formação e manejo do solo (WILDING & DREES, 1983; UPCHURCH & EDMONDS, 1993). Para Russo & Bresler (1981) as propriedades dos solos não são aleatoriamente distribuídas no espaço, mas devido a um arranjo estrutural dentro de um certo domínio que corresponde à distância dentro da qual há interdependência dos valores medidos.

Em áreas agrícolas não há homogeneidade, havendo grandes variações nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, em toda sua extensão e, estas variações, acabam resultando em diferenças significativas de produção dentro da área.

Marques Jr & Corá (1998) registraram a importância de conhecer a variabilidade espacial das propriedades do solo que controlam a produtividade das culturas, sendo um fator indispensável na implantação da agricultura de precisão.

Como a produtividade dos cultivos varia espacialmente, saber quando e onde as variações nas propriedades do solo causam variações nas produtividades é um desafio que a agricultura de precisão procura vencer (MULLA & SCHEPERS, 1997).

Para o estudo da variabilidade espacial das propriedades do solo tem-se utilizado uma ferramenta de análise, conhecida como geoestatística (VIEIRA et al., 2000). A geoestatística vem sendo aplicada de forma crescente na avaliação da variabilidade espacial e permite a interpretação dos resultados com base na estrutura da sua variabilidade natural, considerando a existência de dependência espacial dentro do espaço de amostragem (CARVALHO, 1991). Uma das aplicações da geoestatística é conhecer parâmetros que caracterizam a estrutura de dependência espacial e utilizá-los em técnicas geoestatísticas de interpolação, para fins de mapeamento da variação espacial das propriedades do solo.

A estimativa dos parâmetros é obtida ajustando-se um modelo teórico a um semivariograma experimental (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989). Com a utilização desta ferramenta podem-se analisar adequadamente dados experimentais, podendo-se obter informações não perceptíveis nas análises estatísticas clássica (VIEIRA, 2000).

A maioria das propriedades do solo tem dependência espacial, o que significa dizer que pontos próximos têm valores de propriedades mais similares do que pontos separados por distâncias maiores (MULLA, 1987).

A geoestatística é baseada na teoria das variáveis regionalizadas, onde a variabilidade espacial é caracterizada por meio de autorrelação, semivariogramas, e métodos de interpolação (SILVA, 1989; VIEIRA et al., 1997), que definem o grau de dependência na área medida e o alcance de cada amostragem.

O semivariograma descreve a dependência entre as amostras em função da direção e distância de separação entre elas (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989) e basicamente, a relação entre coeficiente $\gamma(h)$ obtido do quadrado da diferença entre valores de uma variável regionalizada (semivariância) e a distância de separação entre as variáveis (h) (Figura 3).

O modelo de semivariograma ajustado começa com um valor baixo, denominado efeito pepita, C_0 , que mede a variação ao acaso; a medida que h cresce, $\gamma(h)$ cresce, até uma determinada distância “a”, denominada alcance ou distância em que a semivariância atinge o equilíbrio, representando a distância em que os pontos amostrais estão correlacionados (dependência espacial) e, a partir desta distância, os dados podem ser considerados independentes.

Para distâncias maiores que o alcance, a semivariância tende a estabilizar-se em torno de um valor denominado patamar, $C_0 + C$, onde C é o componente estrutural.

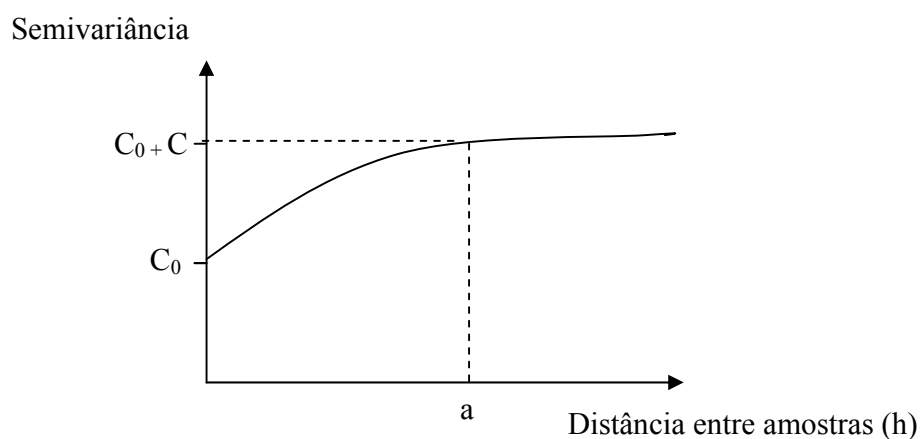


Figura 3 – Exemplo de um semivariograma, mostrando os parâmetros envolvidos na equação da semivariância.

A semivariância é estimada pela expressão:

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

onde: $\gamma(h)$ – semivariância;

n – número de observações separadas pela distância h ;

Z_i, Z_{i+h} – pares de amostras separadas pela distância h .

A análise dos semivariogramas para as propriedades medidas revela a maneira como os dados variam no espaço e, conseqüentemente, o efeito do uso do solo e as alterações promovidas no meio onde as plantas crescem (RUIZ, 2003).

Cambardella et al. (1994) classifica o grau de dependência espacial de um atributo amostrado, pela razão entre o efeito pepita (C_0) e o patamar ($C_0 + C$), sendo o grau de dependência espacial classificado como: forte - quando a variância apresentou efeito pepita menor ou igual a 25 % do patamar; moderado - quando a relação estiver entre 25 e 75 %; fraco - quando o efeito pepita for superior a 75 % do patamar. Então, quanto menor a relação entre efeito pepita e o patamar, menos o efeito pepita está influenciando a dependência espacial dos dados. O semivariograma ajuda a interpretar a variabilidade do fenômeno no espaço.

Existem vários modelos matemáticos para estimar os semivariogramas, e os mais aplicados ao estudo das propriedades do solo são: linear, esférico, exponencial e gaussiano. Pesquisas realizadas por SOUZA et al., 1996; SALVIANO et al., 1998 indicam que o modelo esférico é o mais adequado para descrever o comportamento de semivariogramas de atributos de solo e de plantas.

4.9 Sistemas de Plantio Direto e Convencional

As técnicas de cultivo vêm sofrendo uma evolução significativa no decorrer do tempo, de forma a garantir a sustentabilidade da agricultura.

O preparo do solo que foi considerado operação necessária para o revolvimento do solo, fornecendo melhores condições físicas, químicas e biológicas para germinação da semente e sustentação do crescimento ideal da planta, ultimamente vem sendo dispensado, com sucesso, em muitas regiões agrícolas do Brasil e do Mundo (LANÇAS et al., 2005).

O surgimento de novas técnicas e produtos agrícolas permitiram desenvolver sistemas de cultivo das culturas que dispensa quase que totalmente o preparo do solo.

Os solos submetidos ao manejo convencional são submetidos ao revolvimento pela ação da ferramenta de corte e utilização de máquinas e equipamentos, tais

como o arado de disco ou de aivecas, grades pesadas (grades aradoras), as enxadas rotativas e as grades leves (grades niveladoras). A finalidade é modificar as condições físicas do solo, erradicar as plantas indesejadas e a cobertura morta oriunda da cultura anterior. Esse revolvimento rompe os agregados e acaba por compactar o solo abaixo da camada preparada, além de deixá-lo descoberto (BERTOL et al., 2004).

No sistema de plantio direto a implantação da cultura é feita com baixa mobilização do solo e o revolvimento do solo é reduzido à abertura de um sulco para deposição da semente. Neste sistema a nova cultura é implantada sob os restos da cultura anterior, que é dessecada com a utilização de produtos químicos (defensivos agrícolas). Essa cobertura protege o solo contra o impacto das gotas de chuva evitando perdas de solo por erosão, inibindo a degradação e formação de camadas compactadas que dificultam a infiltração de água no solo (PEREIRA, 1997), e a menor mobilização do solo preserva os seus agregados (BERTOL et al, 2004).

O sistema de plantio direto proporciona menores valores de temperatura do solo e mantém maior volume e disponibilidade de água em comparação ao sistema convencional. A planta aproveita melhor o adubo devido ao maior acúmulo de matéria orgânica e a elevada concentração de nutrientes na camada superficial do solo (SÁ, 1993), reduzindo o uso de adubo.

O sistema plantio direto mostra-se mais eficiente que outros sistemas de cultivo, isto, porque mantém o C orgânico do solo em níveis adequados, proporcionando maior capacidade de produção dos solos agrícolas (BAYER et al., 2000; AMADO et al., 2001; BEUTLER et al., 2001).

No plantio convencional as perdas de solo por erosão tendem a elevar os custos de produção, aumentando a necessidade do uso de corretivos e fertilizantes, reduzindo o rendimento operacional dos equipamentos agrícolas.

O revolvimento do solo é uma técnica, necessária em muitos casos, para aliviar os efeitos de compactação de camadas do solo, mas, também, elimina as plantas espontâneas e rearranja as partículas, resultando numa maior aeração e infiltração de água no solo logo após o preparo e no início de crescimento e desenvolvimento das culturas (ALBUQUERQUE et al., 2005). O preparo que implica no revolvimento do solo acaba por reduzir a estabilidade dos agregados, principalmente, dos macroagregados (ALVARENGA et

al., 1986), o que foi mais evidente para solo arenosos de acordo com Albuquerque et al. (1996).

Segundo Bertol et al. (2001), no sistema de plantio direto, na maioria das vezes, a menor mobilização do solo por um longo período de tempo reduz o volume de macroporos e eleva a sua densidade.

Moraes & Benez (1996) estudou os efeitos de cinco sistemas de preparo do solo: subsolagem e enxada rotativa (SER), enxada rotativa (ER), aração e gradagem (AG), aração e semeadura (AS), plantio direto (PD) na resistência à penetração do solo na produção de milho, concluíram que os sistemas de preparo SER, AG e ER apresentaram maior resistência à penetração do solo a 0,15 m de profundidade em comparação ao PD e AS.

Centurion & Demattê (1985) avaliou a produtividade para diferentes sistemas de preparo do solo e concluíram que o sistema de plantio direto apresentou maior produtividade quando comparado ao sistema convencional.

Ruiz (2003) estudou a resistência à penetração de duas áreas sob plantio convencional e duas áreas sob plantio direto numa faixa de profundidade de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, concluíram que os maiores valores de resistência à penetração foram obtidos para o sistema de plantio direto, visto que as áreas estudadas no plantio convencional foram manejadas na profundidade de 0-0,30 m para implantação da cultura da soja.

Kondo (1998) avaliou a resistência do solo com base na pressão de preconsolidação, em latossolo, sob condição de cultura anual e diferentes usos, tendo evidenciado maiores resistências na camada de 0,27-0,30 m causadas pelas máquinas de preparo do solo, enquanto que para condição de pastagem as maiores resistências foram encontradas na camada superficial (0-0,03 m) devido ao pisoteio do gado.

Silva (2002) estudou a capacidade de carga de latossolos por meio da pressão de preconsolidação sob sistemas de plantio direto e convencional em duas profundidades: superficial (0-0,05 m) e profundidade média de trabalho (PMT, 0,24-0,27 m), concluiu que o solo sob sistema convencional apresentou, de maneira geral, maiores valores de pressão de preconsolidação na PMT, mostrando a ação mobilizadora dos implementos (vibrosolador, arado de aiveca, arado de disco e grade aradora) e evidenciando a compactação causada pelo plantio convencional. Para o plantio direto as operações usadas na

sua implantação (arado de aiveca e grade niveladora) reduziram a resistência do solo nesta profundidade.

Avaliando algumas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico, cultivado com mandioca, após dois anos de implantação em diferentes sistemas de preparo do solo, Tormena et al. (2002), constataram-se maiores valores de densidade do solo e menores valores de macroporosidade na camada de 0-0,10 m no plantio direto e preparo mínimo. Os sistemas de preparo mínimo e preparo convencional do solo proporcionam condições físicas menos restritivas ao crescimento das plantas, quando comparado com o plantio direto.

4.10 Rotações de Culturas

A rotação de culturas é um processo de cultivo que visa preservar o meio ambiente. Trata-se de uma técnica agrícola que consiste em alternar espécies vegetais por um determinado período de tempo numa mesma área agrícola. A cada novo plantio é feita uma troca de cultura, onde as necessidades de adubação sejam diferentes a cada ciclo, mantendo um estreito relacionamento entre as condições físicas do solo e o desenvolvimento da planta (Letey, 1985). A escolha das espécies vegetais deve ter um propósito comercial aliado à manutenção ou recuperação do solo, pois influi positivamente na melhoria dos recursos naturais.

A qualidade da estrutura do solo influi no crescimento de raízes, que promove o crescimento vegetal, de modo geral, as plantas, pela ação de suas raízes e parte aérea, pode recuperar solos degradados, sendo algumas espécies mais eficientes do que outras. Para Silva & Mielniczuk (1997) e Allison (1973) as raízes exercem grande influência na formação e estabilidade dos agregados do solo.

O uso contínuo da rotação de culturas, quando adotada e conduzida de forma adequada, permite preservar ou melhorar as condições físicas, químicas e biológicas do solo e auxilia no controle de plantas daninhas, doenças e pragas. Sua função é repor restos orgânicos e proteger o solo da ação dos agentes climáticos, ajudar a viabilização da semeadura direta e diversificar a produção agrícola (Kay, 1990).

As vantagens de se aplicar um sistema de rotação de culturas são: promover maior estabilidade da produção; melhorar a utilização da terra e da força de trabalho; melhorar a exploração de água e nutrientes; aumentar a eficiência no controle de ervas daninhas e na proteção do solo contra erosão e disponibilizar uma fonte alimentar e de renda.

O planejamento da rotação de culturas deve considerar as plantas comerciais e na medida do possível associar a espécies que produzam grande quantidade de biomassa e de rápido desenvolvimento que podem ser cultivadas isoladamente ou em consórcio com culturas comerciais de maneira a obter a máxima eficiência na melhoria da capacidade produtiva do solo.

Furlani et al. (2003) avaliando a resistência do solo à penetração em Nitossolo Vermelho, após três anos sob diferentes sistemas de preparo e combinados com quatro manejos de cobertura vegetal, verificaram que até 0,12 m de profundidade o sistema de semeadura direta apresentou maiores valores que os demais preparos do solo. A semeadura direta obteve o maior valor a 0,09 m de profundidade, a escarificação a 0,39 m e o preparo convencional a 0,33 m.

Borges et al. (2004) avaliando a resistência do solo à penetração submetido ao monocultivo do arroz irrigado, em três sistemas de preparo (convencional, cultivo mínimo e plantio direto) e à rotação de culturas com diferentes plantas de cobertura sob plantio direto, verificaram que a maior resistência à penetração, na camada superficial do solo ocorreu no sistema de monocultivo do arroz com preparo convencional e cultivo mínimo. Nos tratamentos com plantio direto os resultados de compactação foram semelhantes ao solo mantido sem cultivo. Todos os tratamentos apresentaram aumento da resistência à penetração a partir de 0,40 m de profundidade.

Bertol et al. (2004) avaliou as alterações físicas do solo, como densidade, porosidade, estabilidade dos agregados em água e teor de C orgânico, em um Cambissolo Húmico alumínico léptico sob preparo convencional e semeadura direta, ambos com rotação e sucessão de culturas por um período de seis anos e comparou-as com as propriedades encontradas num campo nativo. Conclui que as propriedades físicas do solo foram alteradas pelo manejo: na camada superficial, a densidade do solo foi maior na semeadura direta do que no preparo convencional e do que no campo nativo, enquanto na

camada subsuperficial, esta variável apresenta valores maiores no preparo convencional do que na semeadura direta e campo nativo. Todos os tratamentos e o campo nativo apresentaram volumes de macroporos abaixo daquele considerado ideal, cerca de 1/3 do volume total de poros (sugerido por Taylor & Aschcroft, 1972 – citado por Bertol et al., 2004), que seria um valor limitante ao desenvolvimento radicular, por reduzir a taxa de difusão dos gases no solo e por dificultar a drenagem do excesso de água das chuvas. Na camada subsuperficial, a semeadura direta reduz o volume de macroporos em relação ao preparo convencional e ao campo nativo, refletindo-se na redução do volume total de poros e no aumento do volume de microporos. O teor de C orgânico é maior na semeadura direta e no campo nativo do que no preparo convencional, em especial na superfície do solo e diminuiu com a profundidade em todos os sistemas de manejo. O diâmetro médio ponderado dos agregados foi influenciado pelo teor de C orgânico, o qual foi menor no preparo convencional do que na semeadura direta, em relação ao campo nativo, demonstrando que o preparo convencional implica maior degradação do solo que a semeadura direta, em relação ao campo nativo. O sistema de cultivo, compreendido como rotação e sucessão de culturas, não influencia, em geral, as propriedades físicas do solo, tanto na semeadura direta como no preparo convencional.

Genro Junior et al. (2004) avaliou a resistência à penetração, umidade, densidade de um Latossolo Vermelho distroférico típico, manejado sob semeadura direta, com quatro seqüências de culturas: sucessão soja/trigo, milho/aveia/milho + guandu/trigo/soja/trigo, guandu/trigo/soja/trigo/soja/aveia e crotolária/trigo/soja/aveia/milho/trigo. Verificou-se que em todos os sistemas de culturas o maior estado de compactação ocorreu na camada em torno de 0,1 m de profundidade. Durante o ciclo das culturas, os valores de resistência à penetração restritivos ao crescimento das plantas (2 MPa) foram atingidos na camada de cerca de 0,03 a 0,23 m de profundidade, quando o teor de água do solo variou de 0,14 a 0,28 kg kg⁻¹. As plantas de cobertura de estação quente que possuem sistema radicular abundante e formador de poros biológico não produziram efeitos de redução da resistência à penetração não foi observado.

Wohlenberg et al. (2004) avaliou a evolução da estabilidade e a distribuição do tamanho dos agregados de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico em seu estado natural com gramíneas, leguminosas, pousio invernal e solo descoberto, para determinar a influência de sistema de cultura, cobertura do solo e teor de matéria orgânica

sobre a sua agregação. Observou-se uma ação direta das culturas na formação e estabilização dos agregados, as maiores estabilidades ocorreram em sistemas de cultivo que aportavam matéria orgânica e cobriam o solo durante todo o ano. A seqüência de culturas com sucessão de gramíneas com leguminosas apresentaram maior agregação.

Albuquerque et al. (2005) estudou a estabilidade dos agregados de um Latossolo Vermelho distroférico cultivados com preparo reduzido (PR) e preparo convencional (PC) sob cinco sistemas de culturas: milho+guandu anão, milho+mucuna cinza, milho+feijão-de-porco, milho+soja preta e milho isolado, concluíram que o uso do solo degradou as propriedades físicas do solo quando comparado ao sistema com mata nativa, reduzindo o teor de C orgânico (CO) e a estabilidade dos agregados. As plantas de cobertura de verão apesar de aumentar o teor de CO, não modificaram a estabilidade de agregados e o grau de flocculação, quando comparadas às do sistema milho isolado. Segundo o autor a recuperação de solos degradados por meio do uso de plantas de cobertura foi mais efetiva quando associadas ao preparo reduzido, evidenciando a importância de sistemas de manejo com baixo revolvimento e alto aporte de resíduos vegetais para aumentar o CO do solo.

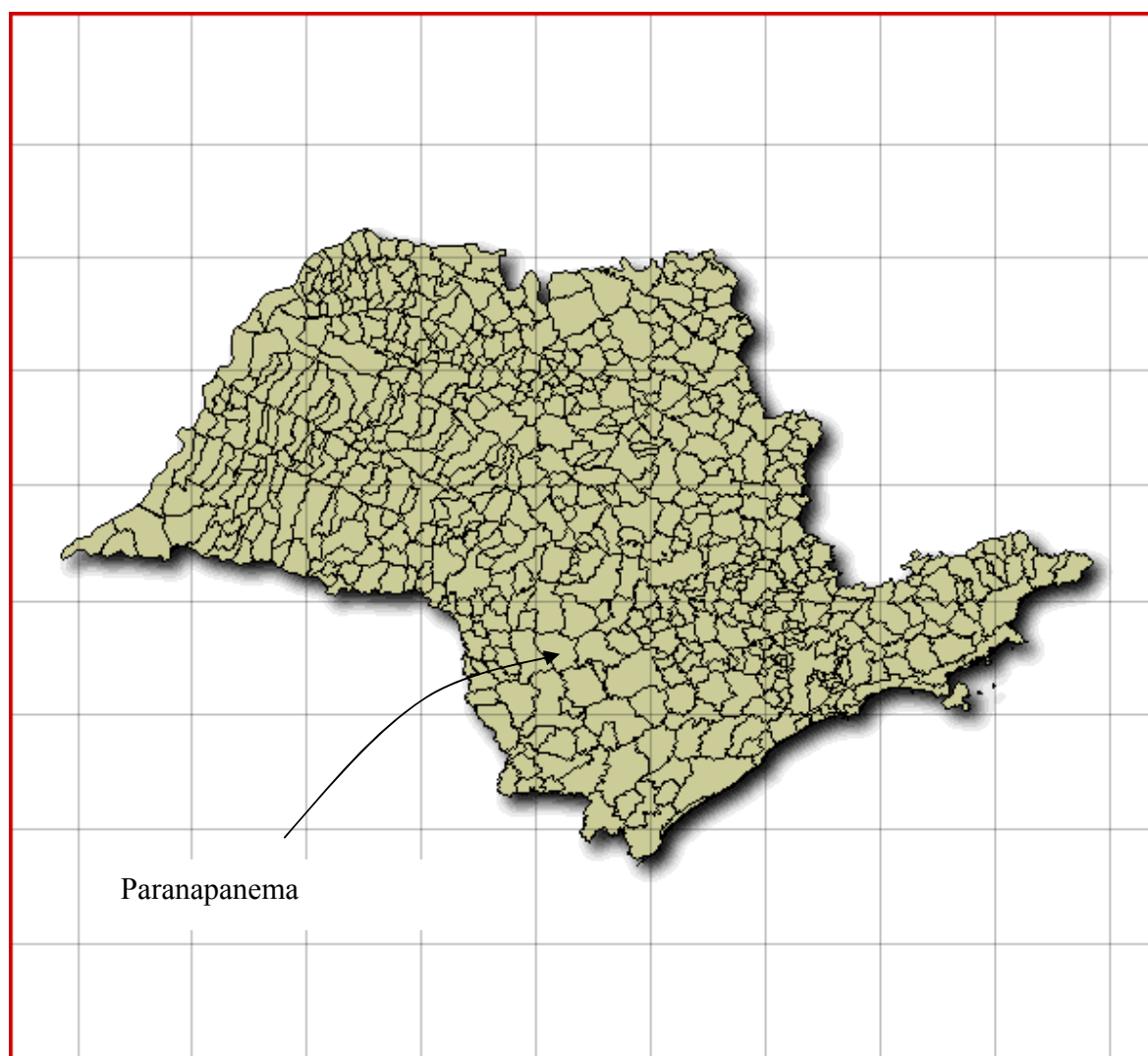
Neto et al. (2006) avaliou os efeitos de dois sistemas de manejo: plantio direto seguido anualmente de um preparo com arado (P1) e plantio direto contínuo (P2), e de rotação de culturas: milheto-feijão-milheto-feijão-arroz-feijão-milheto-feijão-milheto-feijão (R1); milheto-feijão-soja-feijão-arroz-feijão-milheto-feijão-soja-feijão (R2); milheto-feijão-milho-feijão-arroz-feijão-milheto-feijão-soja-feijão (R3) e soja-feijão-milho-feijão-arroz-feijão-soja-feijão-milho-feijão (R4); sobre a densidade, a microporosidade, a macroporosidade e a porosidade total de um Latossolo Vermelho na região dos cerrados. Os sistemas de manejo do solo e de rotação de culturas afetaram as propriedades físicas do solo, como densidade, macroporosidade e a porosidade total do solo. Os sistemas de rotação de culturas que incluem mais cultivos de milheto propiciam menores valores de densidade do solo e maiores valores de macroporosidade e porosidade total para profundidade de 0,1-0,2 m.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Caracterização das Áreas Experimentais

O experimento foi conduzido em uma área rural localizada no distrito de Holambra II, município de Paranapanema/SP, distante 256 km da cidade de São Paulo (Figura 4 e 5), denominada fazenda Buriti-Mirim, pertencente à bacia hidrográfica do Alto Paranapanema, cujas coordenadas geográficas são: Latitude 23° 30' 33'' S, Longitude 48° 37' 28'' W e altitude 578,69. Tratam-se de área de produção comercial que se utilizam culturas anuais irrigadas com pivô central (Figura 6). A fazenda foi dividida em duas áreas: área 1 de 70 ha e área 2 de 35 ha, compreendendo dois pivôs centrais. Estas áreas foram divididas em duas partes, onde foram realizados tratamentos diferentes de condução das culturas. Em uma das partes o plantio foi realizado com preparo convencional: arado e grade, e na outra metade com plantio sem revolvimento do solo, mas a cada três anos, após a implantação da cultura do algodão, o solo era mobilizado para eliminação da soqueira do algodão e realizado uma subsolagem para eliminação das camadas compactadas, denominou-se esse tratamento como Plantio Direto Rotacionado.

O clima da região é do tipo mesotérmico úmido com verão quente, Cfa, segundo classificação de Köppen (Figura 7), no inverno com temperatura média inferior de 18°C, com temperaturas médias anuais entre 18°C e 22°C e amplitude térmica anual entre 7°C e 9°C e a precipitação pluvial anual normal varia entre 1000 a 1500 mm.



Capital: São Paulo

Número de Municípios: 645



Figura 4 – Mapa do Brasil localizando o estado de São Paulo e a localização do município de Paranapanema/SP.



Figura 5 – Mapa de localização do município de Paranapanema onde se encontra a área em estudo.



Figura 6 - Vista parcial da Fazenda Buriti-Mirim, com detalhes das culturas sob sistema de irrigação com pivô central.

O relevo regional é plano e suave ondulado com declividade média de $0,06 \text{ m m}^{-1}$, situado no planalto da Bacia do Paraná. A região do Paranapanema/SP é caracterizada por apresentar distribuição de rochas básicas e ácidas da formação Bauru, ao

longo do rio Paranapanema afloram os arenitos da formação Bauru, que constituem os principais sedimentos pré-vulcânicos das áreas estudadas.

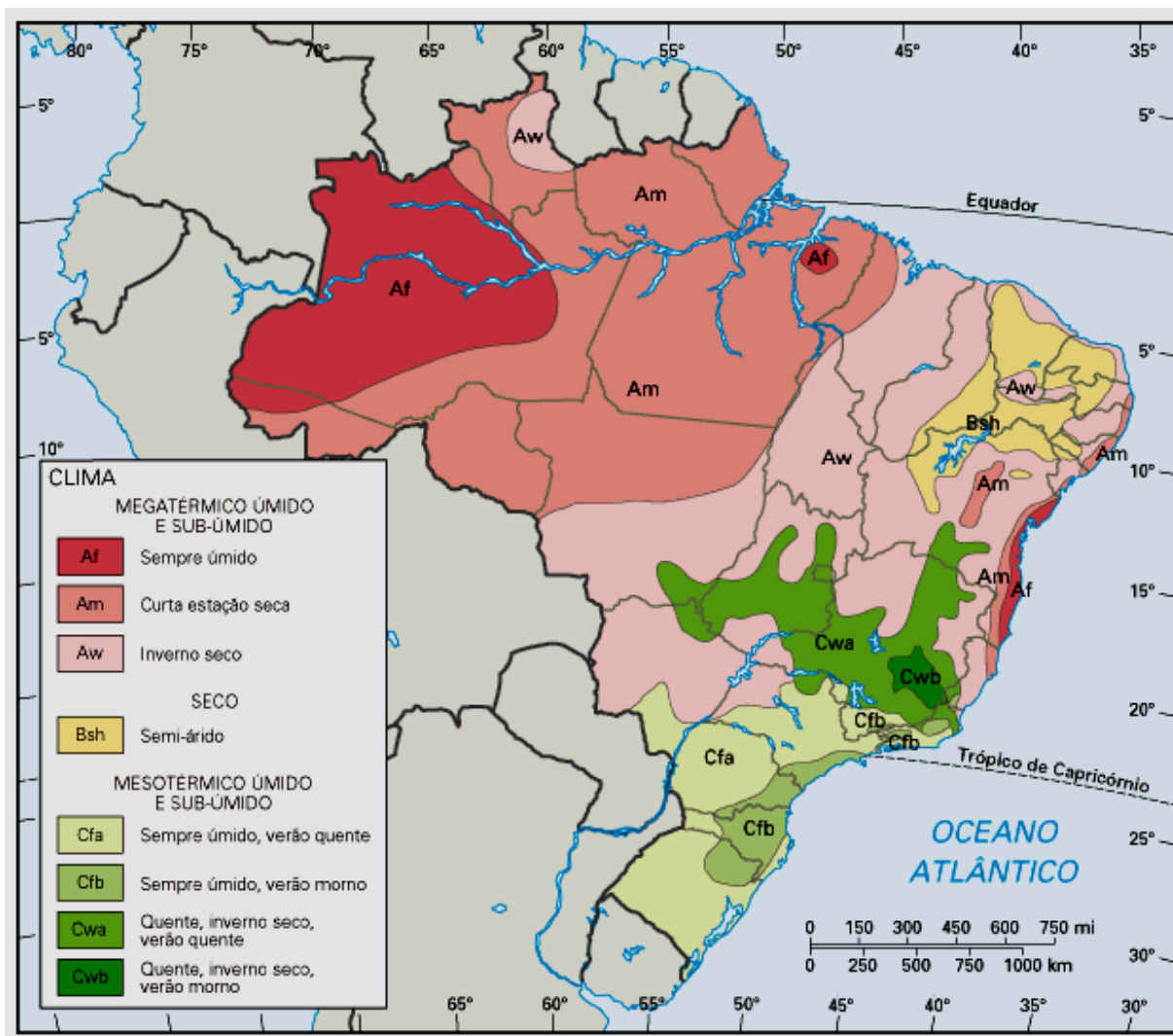


Figura 7 – Mapa de clima da região Brasileira

A área 1 foi numa etapa inicial (primeiro semestre de 2001) cultivada na sua totalidade com trigo e, no segundo semestre de 2001, esta área foi dividida em duas glebas: gleba 1 (G1) e gleba 2 (G2), que compreenderam áreas de 33 ha e 37 ha, respectivamente.

As áreas em estudos receberam uma programação de plantio que foi composta por uma determinada sucessão de culturas, como mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Plano de plantio para o período de 2001 a 2004 – Fazenda Buriti-Mirim

Área	2001	2002	2003	2004
1 – G1	Trigo-algodão	Aveia-feijão	Crotalária/trigo-algodão	Trigo
1 – G2	Trigo-feijão	Algodão-milho	Feijão/trigo-algodão	Trigo
2	Feijão/aveia-milho	Feijão-milho/algodão	Trigo-milho	Feijão

A G1 a implantação da sucessão de culturas iniciou-se na primeira quinzena de outubro/2001 com o plantio de algodão sob preparo convencional (PC), arado e grade. Após a colheita do algodão foi realizada uma subsolagem e eliminação da soqueira do algodão para na segunda quinzena de abril/2002 entrar com o cultivo da aveia, na primeira quinzena de agosto/2002 o cultivo foi feijão, na primeira quinzena de dezembro/2002 plantou-se Crotalária/trigo, na primeira quinzena de outubro/2003, novamente, foi plantado o algodão, seguindo o mesmo procedimento citado acima após colheita e na primeira quinzena de abril/2004 foi realizado o cultivo de trigo, todos os cultivos foram realizados sob o sistema de plantio convencional (arado e grade).

A G2 a implantação da sucessão de culturas iniciou-se na segunda quinzena de agosto/2001 com o plantio de feijão, na segunda quinzena de dezembro/2001 foi realizado o plantio de algodão, após a colheita foi realizada subsolagem e eliminação de soqueiras, na primeira quinzena de agosto/2002 foi realizado o cultivo de milho, na primeira quinzena de dezembro/2002 plantou-se Feijão/trigo, na primeira quinzena de outubro/2003, novamente foi realizado o cultivo de algodão que após a colheita, realizou-se subsolagem e eliminação de soqueiras, e na primeira quinzena de abril/2004 cultivou-se o trigo, todos os cultivos foram realizados sob o sistema de plantio convencional (arado e grade).

A área 2 recebeu uma programação de plantio que se iniciou com a seguinte sucessão de culturas, no primeiro semestre de 2001 foi plantado feijão/aveia, na primeira quinzena de agosto/2001 foi cultivado o milho comercial, na segunda quinzena de janeiro/2002 o cultivo foi o feijão, na primeira quinzena de setembro/2002 plantou-se

milho/algodão, após a colheita do algodão a área recebeu operações de preparo com subsolador e eliminação de soqueiras, na primeira quinzena de abril/2003 foi realizado o cultivo de trigo, na segunda quinzena de setembro/2003 foi plantado o milho/semente e na segunda quinzena de fevereiro/2004 foi cultivado o feijão, o a área foi dividida em dois sistemas de cultivo convencional (arado e grade) e direto rotacionado (revolvimento do solo reduzido à abertura de um sulco para deposição da semente, com operações de preparo após a colheita do algodão, com subsolagem e eliminação de soqueira).

5.2 Caracterização do Solo

O solo da área em estudo foi classificado como Argissolo Acinzentado, textura franco arenosa (EMBRAPA, 1999).

A distribuição granulométrica do solo foi realizada utilizando o método do densímetro proposto pela EMBRAPA (1997) e a média dos valores obtidos estão apresentados na Tabela 2, para este ensaio foram coletadas 20 amostras deformadas em duas profundidades: 0-0,15 e 0,15-0,30.

Tabela 2 – Distribuição granulométrica do solo das áreas de estudo.

	Distribuição Granulométrica		
	Argila g kg ⁻¹	Silte g kg ⁻¹	Areia g kg ⁻¹
Área 1	151,0	127,7	721,4
Área 2	190,0	138,0	674,0

5.3 Amostragem

A coleta de dados no campo foi realizada com a Unidade Móvel de amostragem de solo (UMAS). Trata-se de uma carreta fechada (Figura 8) de um eixo que pode ser transportada por rodovias, tracionada por caminhonete ou carro, nas propriedades agrícolas, deve ser tracionada por trator com engate na barra de tração e sistema de acionamento hidráulico para movimentação dos órgãos ativos dos equipamentos que a compõem.



Figura 8 - Unidade Móvel de Amostragem de Solo (UMAS) utilizada para o levantamento de dados georreferenciados.

Na carreta foi instalados dois equipamentos: um penetrômetro hidráulico-eletrônico (Lanças & Santos, 1998) (Figura 9), utilizado para a determinação da resistência do solo à penetração, medida pelo índice de cone (IC); e um sistema hidráulico-mecânico de retirada de amostras indeformadas do solo, em anéis padrões, de dimensões: altura 0,025 m e diâmetro de 0,069 m (Figura 10).

A carreta estava equipada com um sistema para localização geográfica (GPS Ag 132 Trimble), com sinal de correção DGPS (Omnistar), possibilitando o georreferenciamento dos dados obtidos.

A navegação no campo foi feita por meio do programa SST FieldRover II (SST Development Group, Inc.), executado por meio de um computador de mão iPaq conectado ao receptor GPS.



Figura 9 - Penetrômetro hidráulico eletrônico, equipado com sistema DGPS, construído por Santos & Lanças (1998).

O sistema conta ainda com uma barra de luz com a finalidade de guiar o operador a se manter numa direção em linha reta e um sensor de roda que possibilita um sinal sonoro informando desta forma o ponto amostral previamente selecionado.

Os dados de resistência do solo à penetração, índice de cone (IC) foram obtidas em campo em grade amostral que pode ser visualizada na figura 11 a 13, nas profundidades de 0-0,05 m, 0-0,1 m, 0,1-0,2 m, 0,2-0,3 m, 0,3-0,4 m e maiores que 0,4 m, para as duas áreas estudadas.



Figura 10 - Detalhe do processo de amostragem com o amostrador hidráulico-eletrônico automatizado com sistema de GPS.

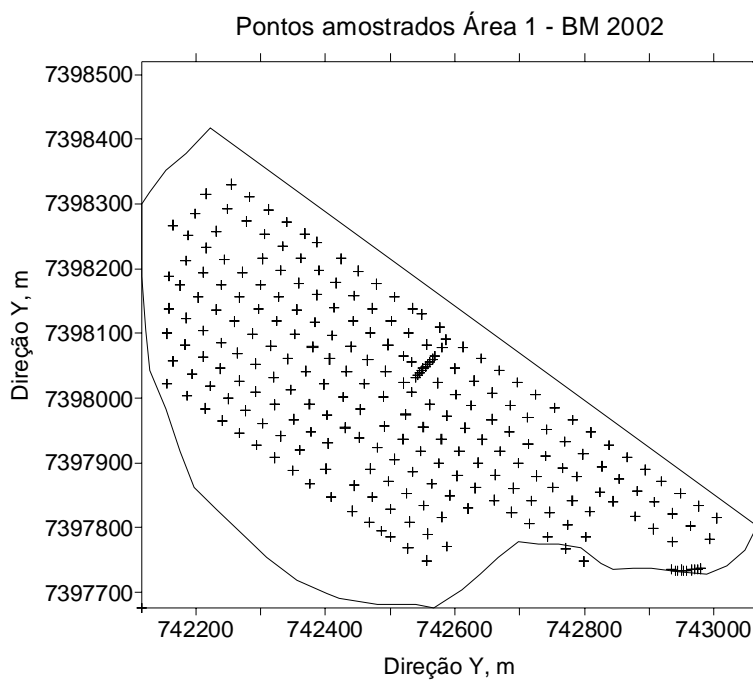


Figura 11 – Distribuição dos pontos amostrais para índice de cone IC, área 1, Buriti-Mirim, ano 2002.

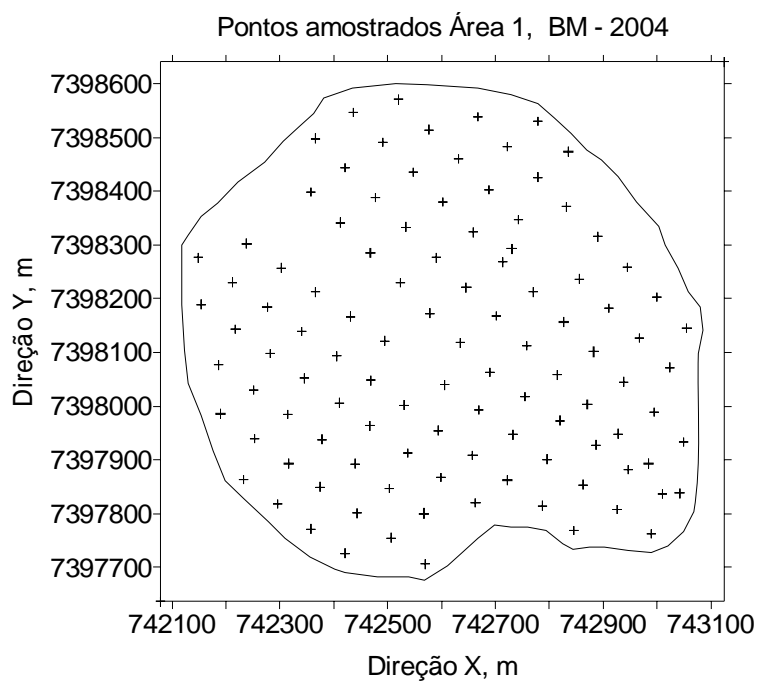


Figura 12 – Distribuição dos pontos amostrais para índice de cone IC, área 1, ano 2004.

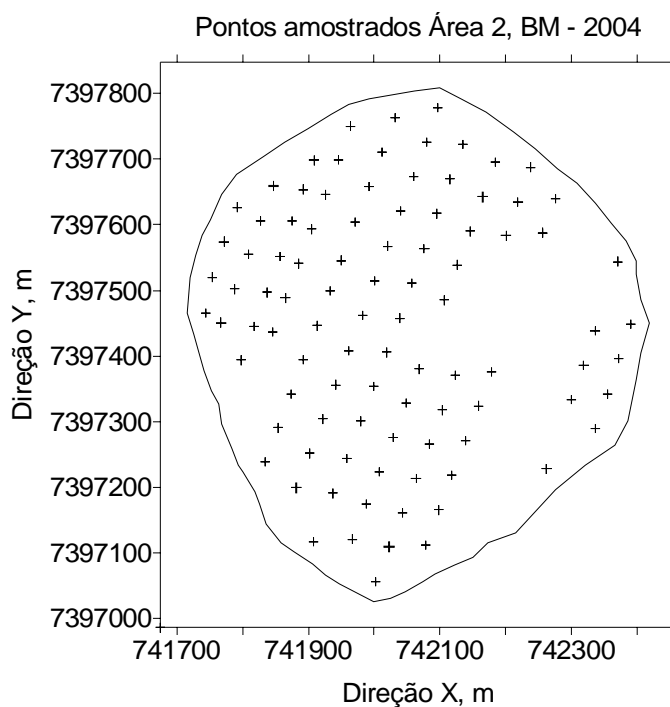


Figura 13 – Distribuição dos pontos amostrais para índice de cone IC, área 2, Buriti-Mirim, ano 2004.

Nas áreas em estudo foram coletadas amostras indeformadas para determinação de propriedades do solo, como: densidade, porosidade total, pressão de preconsolidação e umidade e, também, amostras deformadas para determinação de caracterizações físicas do solo, como: distribuição granulométrica, densidade de partículas e limites de consistência.

Duas profundidades foram consideradas: uma superficial (SP, 0-0,1 m) e outra subsuperficial, cuja profundidade de amostragem foi definido por meio de resultados de ensaio de resistência à penetração, identificando a camada de máxima resistência mecânica (CMRM), com o auxílio de um penetrômetro hidráulico-eletrônico com sistema de posicionamento global, desenvolvido por Lanças & Santos (1998).

As amostras retiradas da área foram coletadas de forma aleatória, a distribuição dos pontos pode ser vista na figuras 14 e 15, para as duas áreas de estudo e para as duas profundidades.

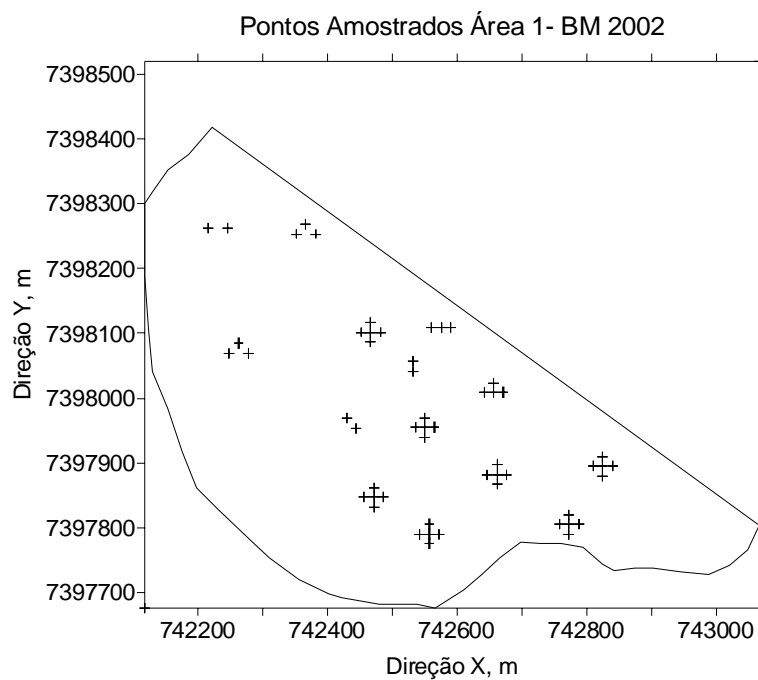


Figura 14 - Distribuição dos pontos amostrais para índice físico, área 1, Buriti-Mirim, ano 2002.

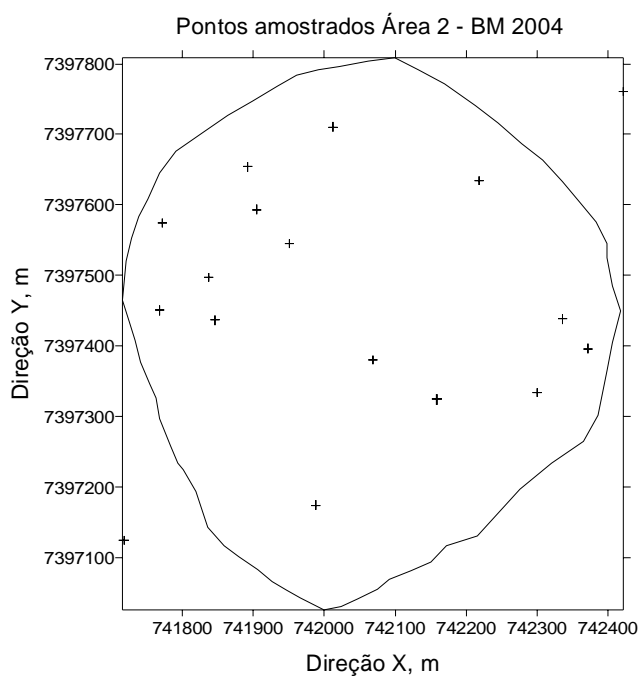


Figura 15 - Distribuição dos pontos amostrais para índice físico, área 2, Buriti-Mirim, ano 2004.

As amostras indeformadas foram protegidas com papel filme e parafinadas com a finalidade de manter a umidade de campo, e em seguida foram encaminhadas ao laboratório para os ensaios de compressibilidade, enquanto as amostras deformadas foram retiradas do excesso de solo do anel, secas ao ar, destorroadas e passadas na peneira de 2mm.

Dois procedimentos foram aplicados às amostras

1º Procedimento: para obter o modelo matemático de capacidade de suporte de carga do solo proposto por Dias Junior (1994) foram 15 anéis (amostras indeformadas), para cada profundidade, ensaiadas em cinco umidades diferentes (5 kg kg^{-1} , 10 kg kg^{-1} , 15 kg kg^{-1} , 20 kg kg^{-1} e saturado), com três repetições, definidas com base nos limites de consistência do solo, segundo recomendação de Silva (2002).

Para obter os níveis de umidade desejada, as amostras foram saturadas por capilaridade com água destilada e deixadas para secar ao ar até atingirem a umidade pré estabelecida e então, submetida ao ensaio de compressibilidade.

2º Procedimento: para a elaboração dos mapas de Densidade do solo, Porosidade, Pressão de Preconsolidação e Umidade gravimétrica, as amostras foram ensaiadas na umidade de campo, então, após o preparo da amostra, estas foram para o ensaio de compressibilidade.

Ao final dos ensaios os anéis foram conduzidos à estufa a $105-110 \text{ }^\circ\text{C}$, por 24 h, para determinação da umidade do solo correspondente.

5.4 Épocas de Amostragem

Na área 1, ano de 2002, foi feita a coleta de amostras deformadas e indeformadas para os ensaios de compressibilidade e realizados os ensaios de resistência à penetração no campo. As amostragens e ensaios foram efetuados na primeira quinzena de abril, ao término da colheita do algodão e antes do preparo para a semeadura de aveia sob sistema convencional. No ano de 2004, foi feito novo ensaio de resistência à penetração no

campo, na primeira quinzena de julho, sob dois sistemas de plantio: Convencional e Direto rotacionado.

Na área 2, ano de 2004, foi realizada a coleta de amostras deformadas e indeformadas para ensaios de compressibilidade e realizados os ensaios de resistência à penetração no campo. As amostragens e ensaios foram efetuados na primeira quinzena de julho, sob dois sistemas: Convencional e Direto rotacionado.

5.5 Propriedades Físicas e Químicas

Para o reconhecimento físico e químico do solo foram realizados os seguintes ensaios: densidade do solo (D_s), a porosidade total (P_s) e umidade gravimétrica (U), seguindo a metodologia da EMBRAPA (1997). A densidade da partícula (D_p) e a matéria orgânica (MO), Tabela 6.

A Densidade inicial do solo (D_{si}) mediu o estado natural do solo e conseqüentemente o histórico de manejo.

A porosidade inicial (P_i) indicou o valor relativo de espaços vazios do solo antes de receber o carregamento em condições controladas de laboratório, os valores são obtidos de amostras indeformadas que mantém o estado natural do solo e sua história de manejo e fornecem informações importantes sobre o estado de aeração do solo.

Foram determinadas a Densidade do solo na pressão de préconsolidação ($D_{s\sigma_p}$) e a porosidade total também na pressão de préconsolidação ($P_{s\sigma_p}$). Os valores foram calculados após as amostras indeformadas receberem pressões equivalentes à pressão de préconsolidação, seguindo a mesma metodologia de determinação de D_s e P_s (EMBRAPA, 1997).

A Densidade do solo na pressão de préconsolidação ($D_{s\sigma_p}$) representa o grau de compactação máxima (crítica) que o solo pode atingir, sem que haja comprometimento de sua estrutura.

A porosidade do solo na pressão de preconsolidação ($P_s\sigma_p$) foi um indicativo do quanto de espaços vazios o solo pode atingir sem que o solo não seja comprometido do ponto de vista estrutural;

A pressão de preconsolidação (σ_p) representa a máxima pressão que o solo já esteve submetido;

Umidade do solo atual que é uma importante propriedade que governa o comportamento mecânico do solo, quando as demais propriedades são constantes.

O diâmetro médio ponderado (DMP) foi determinado segundo a metodologia de Kemper & Chepil (1965), Tabela 3. Para realização dos ensaios de DMP, MO e DP foram coletadas 20 amostras deformadas em duas profundidades: 0-0,15 m e 0,15-0,30 m.

Tabela 3 – Propriedades física e química dos solos das áreas 1 e 2: Diâmetro Médio Ponderado (DMP), Matéria Orgânica (MO), Densidade de Partículas (DP).

	DMP (mm)	MO (gdm ⁻³)	DP (Mg m ⁻³)
Área 1	3,06	140	2,67
Área 2	2,48	70	2,68

A área 1 situa-se numa posição mais baixa do relevo, quando comparada à área 2, caracterizando-se como uma área de recebimento de sedimentos, o que justifica o maior teor de matéria orgânica.

Os limites de consistência, liquidez (LL) e plasticidade (LP) foram determinados conforme a metodologia de Sower (1965); o limite de contração (LC) foi determinado utilizando o método do limite de contração modificada de Dias Junior e Miranda (1998), os valores médios estão apresentados na Tabela 4. Foram coletadas 20 amostras deformadas em duas profundidades: 0-0,15m e 0,15-0,30 m

Tabela 4 - Limites de Consistência, Limite de contração (LC), Limite de plasticidade (LP), Limite de liquidez (LL).

	LC (kg kg ⁻¹)	LP (kg kg ⁻¹)	LL (kg kg ⁻¹)
Área 1	10,70	13,69	19,98
Área 2	8,10	14,46	21,39

5.6 Ensaio de Compressibilidade – Determinação da Pressão de Preconsolidação (σ_p)

Para obtenção de σ_p foram realizados ensaios de compressibilidade que permitiram obter a curva de compressão do solo.

Em laboratório, as amostras indeformadas foram submetidas aos ensaios uniaxiais usando um consolidômetro desenvolvido por Silva et al. (2005a) (Figura 16). Foram aplicados os seguintes níveis de pressão: 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa, até que 90 % da deformação máxima na amostra fosse obtida (Taylor, 1971). Com as informações de densidade do solo relacionadas com o logaritmo dos níveis de pressão aplicada à amostra, traçou-se a curva de compressão do solo e a partir dela foi determinada a pressão de preconsolidação (σ_p). Esta representa a máxima pressão que o solo já esteve submetido, ou seja, a máxima pressão que o solo pode suportar sem que sofra compactação adicional.

A pressão de preconsolidação foi determinada segundo o método proposto por Dias Junior & Pierce (1996). O mesmo utiliza planilha eletrônica para estimar a pressão de preconsolidação, representada na Tabela 5. Sua determinação pode ser feita segundo dois métodos, o primeiro (M1) pressupõe que as amostras sejam consolidadas a teores de água com pressões abaixo de 100 kPa e, o outro (M3) pressupõe que as amostras sejam consolidadas a pressões acima de 100 kPa. A Figura 17 mostra a curva de compressão do solo e ilustra como foi feita a determinação da pressão de preconsolidação segundo os dois métodos citados.

Com os valores de pressões de preconsolidação em função da umidade foram ajustadas ao modelo de capacidade de suporte de carga do solo proposto por Dias Junior (1994).

$$\sigma_p = 10^{(a + bU)} \quad (2)$$

Onde: σ_p é a pressão de preconsolidação;

a e b são parâmetros de ajuste da curva;

U é o teor de água gravimétrico.

O modelo foi aplicado para as profundidades: superficial (0-0,1 m) e camada de máxima resistência mecânica (CMRM).

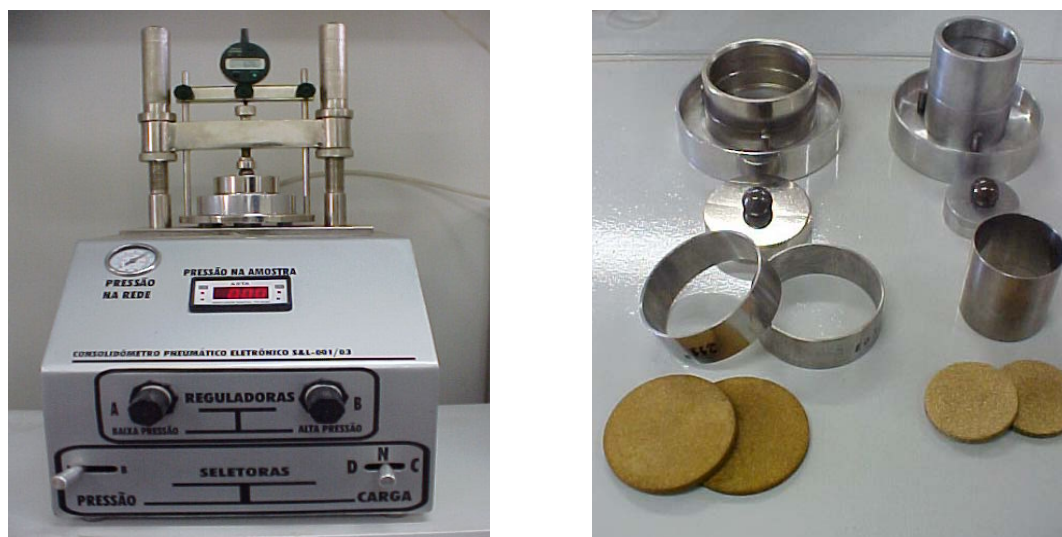


Figura 16 - À esquerda o consolidômetro utilizado para os ensaios de compressibilidade, à direita os acessórios necessários para realização do ensaio. Fonte: Silva et al. (2005a).

Tabela 5 - Planilha eletrônica para estimativa da pressão de preconsolidação. Adaptada de Dias Junior & Pierce (1996).

Caracterização da amostra								
Poten./Umid	0.05	KPa/kg kg ⁻¹						
Método=	3							
Profundidade	10	cm		Dsi=	1.29 kg dm ⁻³			
Anel N°=	3			Hs=	1.17 cm			
Repetição=	1			Hi=	2.502 cm			
Anel+TFSA=	211.27	g		Ø=	6.879 cm			
Anel+TFSE=	206.9	g		Ui=	0.04 kg kg ⁻¹			
Massa do Anel=	86.61	g		ei=	1.14			
Dp=	2.77	kg dm ⁻³						
Pressão (kPa)	Leitura (mm)	Leitura (cm)	Delta H (cm)	Delta E	Indice Vazios	Altura (cm)	Volume dm ³	Ds kg dm ⁻³
					1.1413	2.5020	0.0930	1.2936
25	0.38	0.0380	0.0380	0.0325	1.1088	2.4640	0.0916	1.3136
50	0.58	0.0580	0.0200	0.0171	1.0917	2.4440	0.0908	1.3243
100	1.03	0.1030	0.0450	0.0385	1.0532	2.3990	0.0892	1.3491
200	1.68	0.1680	0.0650	0.0556	0.9975	2.3340	0.0867	1.3867
400	2.63	0.2630	0.0950	0.0813	0.9162	2.2390	0.0832	1.4456
800	3.77	0.3770	0.1140	0.0976	0.8187	2.1250	0.0790	1.5231
1600	5.02	0.5020	0.1250	0.1070	0.7117	2.0000	0.0743	1.6183

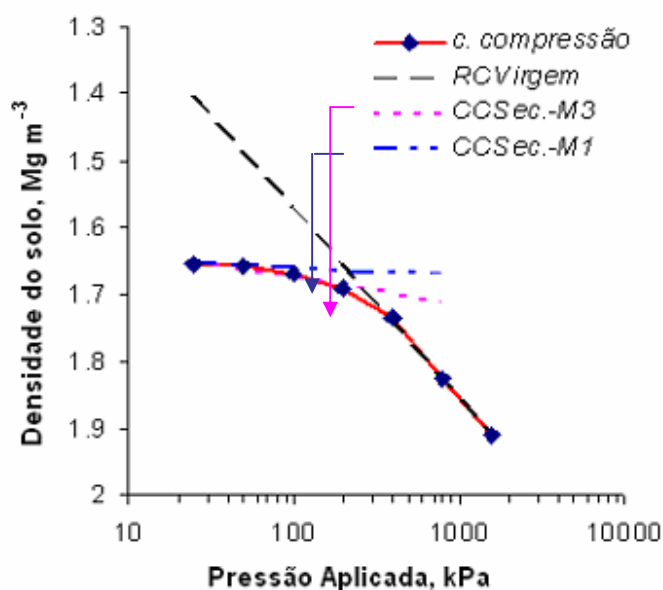


Figura 17 - Curva de compressão do solo e estimativas de σ_p , segundo os métodos de Dias Junior & Pierce (1996), para estimativa da pressão de preconsolidação.

5.7 Ensaio de Resistência à Penetração – Determinação do Índice de Cone (IC)

A determinação do índice de cone foi obtida em campo, até uma profundidade de 0,4 m, sendo sua medida registrada a cada 0,1 m, com a utilização do penetrômetro hidráulico-eletrônico.

O equipamento é constituído de um cilindro hidráulico, uma haste com cone na ponta a qual obedeceu as características estruturais e operacionais definidas pela norma ASAE S313.3 (1999). A haste vai conectada a uma célula de carga com capacidade de 5000 N e a um sensor de profundidade do tipo potenciométrico linear, ambos ligados a um sistema de aquisição e armazenamento de dados composto por um Microllogger CR23X, da Campbell Cientific (Figura 18).



Figura 18 - Penetrômetro hidráulico-eletrônico

5.8 Determinação da pressão de contato pneu/solo

Foram realizados levantamentos das informações técnicas das máquinas, equipamentos e operações mecanizadas realizadas na fazenda Buriti-Mirim, Holambra II, distrito de Paranapanema (Tabela 6). O parque de máquina foi caracterizado, e informações como o preparo do solo, plantio, tratos culturais e colheita, bem como as dimensões e pesos de cada trator e equipamento permitiram quantificar as pressões de contato aplicadas ao solo, estes dados foram retirados do relatório de fim de curso, realizado por Bernardus Hendrikus Johannes Hakvoort.

Tabela 6 - Máquinas e equipamentos utilizados para operações mecanizadas na Fazenda Buriti – Mirim, município de Paranapanema, SP.

Operações Mecanizadas	Máquina Equipamento/Implemento	
Subsolagem	Trator Massey Ferguson 292	-
Semeadura	Trator John Deere 7505	Semeadora John Deere 9211 9 linhas de soja
Semeadura	Trator Massey Ferguson 299	Semeadora Jumil 2980 18 linhas
Aplicação de herbicida	-	Uniport Jacto 2000 litros 4x2 (10 entradas na área)
Aplicação de Uréia e KCl	Massey Ferguson 275 4x2	Tornado 1300 Stara (capacidade 1000 kg)
Colheita	Colhedora John Deere 9930	(2 entradas na área)

A pressão de contato foi determinada pela relação entre a força aplicada pela máquina e a área de contato pneu/solo.

$$P = Wd / A \quad (3)$$

Onde: P= pressão ou tensão de contato em kPa

Wd= carga dinâmica sobre os rodados em Pa

A= área de contato dos rodados em m²

5.8.1 Área de contato

Para determinação da área de contato de um pneu agrícola foi realizada a impressão dos pneus das máquinas em superfície rígida, utilizando-se a metodologia da massa modelável. Para tanto, uma caixa de madeira foi utilizada com a finalidade de acondicionar a massa modelável e o quadro de madeira, facilitando o manuseio e o processo de prensagem do pneu sobre a referida massa.

O quadro de madeira foi construído na dimensão de 0,84 x 0,90 m, perfazendo áreas de 0,756 m² e com altura padronizada de 0,05 m. A altura do quadro de

madeira refere-se à profundidade padronizada das garras da maioria dos pneus agrícolas, representando, fielmente, o comportamento das características físicas do mesmo.

O quadro de madeira, apresentando dimensões conhecidas, tem a finalidade também de corrigir as possíveis distorções focais provocadas pela máquina fotográfica digital. Para que não ocorresse aderência da massa sobre a superfície do pneu foi colocada sobre a caixa de madeira uma capa plástica isolante.

Para a impressão do pneu na superfície da massa de modelagem utilizou-se um equipamento de levante hidráulico (“macaco”) e calços de madeira, que foi colocado sob o eixo ou chassi do trator para suspê-lo, para que a caixa de madeira com o quadro e a massa modelável fosse ajustada sob o pneu, para então abaixar o pneu e deixar a área de contato impressa na massa modelável (Figura 12).

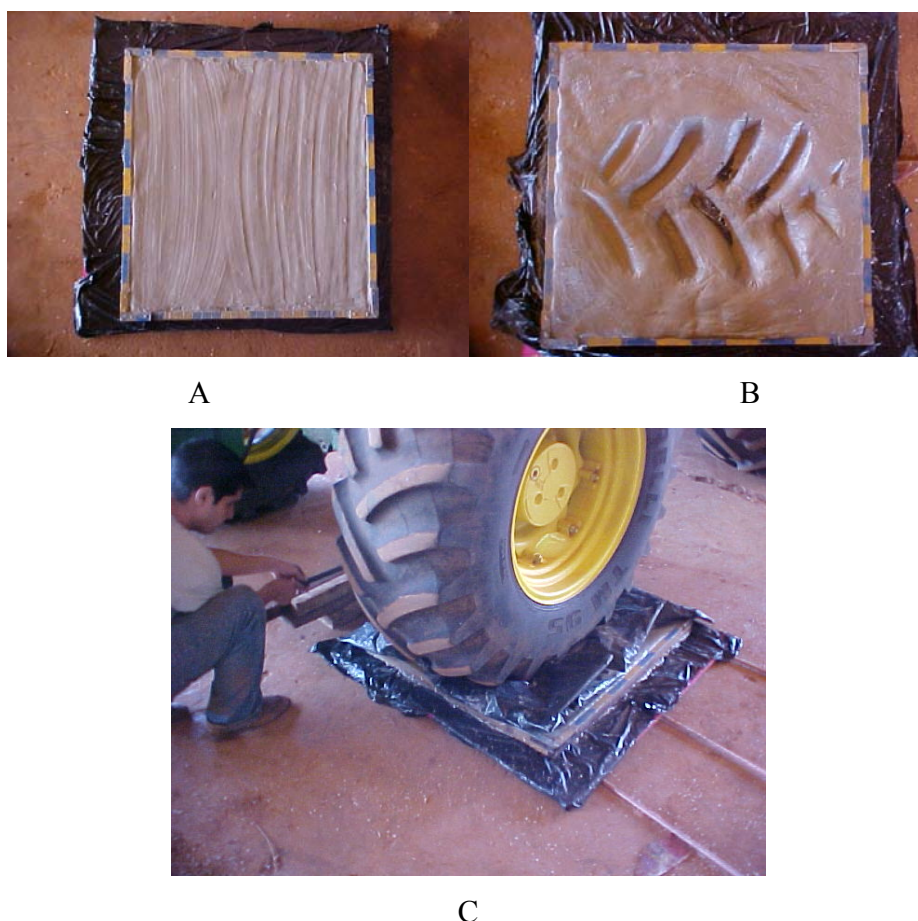


Figura 19 - Caixa e quadro de madeira massa modelável (A); detalhe do pneu sendo baixado sobre a caixa (B); área de contato impressa na massa (C).

Posteriormente, levantou-se o trator para a retirada da caixa com a impressão da área de contato do rodado na referida massa, criando a impressão deixada pelo próprio peso da máquina, com a respectiva pressão de inflação do pneu. Utilizou-se uma câmera digital, para registrar a área de contato contida no quadro e que foi posteriormente, planimetrada e determinada a sua área no programa computacional TURBOCAD R.4, sendo que as áreas foram ajustadas empregando-se a seguinte relação (MAZETTO & LANÇAS, 2000):

$$A_{rp} = A_{rq} \cdot A_{pf} / A_{qf} \quad (4)$$

Onde:

A_{rp} - área real do pneu (cm²)

A_{rq} - área real do quadro de madeira colocado em torno da área de contato (cm²)

A_{pf} - área do pneu na foto (cm²), obtida por meio do programa computacional TURBOCAD R.4

A_{qf} - área do quadro na foto (cm²), também obtida pelo programa computacional TURBOCAD R.4

5.8.2 Caracterização do parque de máquinas

A pressão de inflação dos rodados pneumáticos foi aferida por um medidor de pressão para até 380 kPa.

As características de dimensões das máquinas agrícolas e de seus pneus foram apresentadas no Apêndice 1 e 2. Apresentação das máquinas agrícolas utilizadas na fazenda Buriti-Mirim e áreas de contato do pneu na massa modelável encontram-se no apêndice 3.

Com o conhecimento das características dimensionais das máquinas e do pneu foi possível calcular a área de contato pneu/solo com o auxílio do programa computacional TURBOCAD R.4. Os resultados foram apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Dados da área de contato dos pneus.

Tratores	Peso (kg)			Área Pneu (cm ²)	
	Dianteiro	Traseiro	Total	Dianteiro	Traseiro
John Deere 7505 4x2 TODA	2950	4580	7530	3559,20	4950,99
Massey Ferguson 275 4x2 TODA	1875	2415	4290	1704,03	2086,13
Pulverizador Max Sistem	3050	4160	7210**	2240,15	2926,33
Pulverizador Autopropelido Uniport Jacto 2000 litros	3530	4600	8130**	2039,73	2304,22
Colhedora de grãos John Deere 1175 4x2	8370	2690	11060	5402,42	2228,70

* Área de contato obtida pelo programa computacional TURBOCAD R4 - ** com 2000 l de água.

5.9 Análise estatística dos dados amostrados

A análise estatística dos dados foi realizada para a verificação do comportamento das propriedades físicas do solo: umidade (U), densidade inicial do solo (Dsi), porosidade inicial do solo (Psi), densidade do solo na pressão de preconsolidação ($Ds\sigma_p$), porosidade do solo na pressão de preconsolidação ($Ps\sigma_p$), e da propriedade mecânica, pressão de preconsolidação (σ_p) e resistência do solo à penetração, quanto às medidas estatísticas de posição: média, mediana, valores de máximo e mínimo, e quartil inferior e superior; de dispersão: desvio padrão e coeficiente de variação; de assimetria: coeficiente de assimetria; e de curtose: coeficiente de curtose; antes de submetê-los à análise geoestatística. O programa Excel foi utilizado para as análises estatísticas.

O cálculo dos quartis da distribuição dos valores das variáveis mensuradas auxiliou na identificação dos dados discrepantes da distribuição normal. Para aprimorar a distribuição dos dados à curva normal, procedeu-se a retirada dos valores periféricos ou discrepantes que foi realizado pelo critério dos limites inferior e superior de uma distribuição normal (LIBARDI et al., 1996; GONÇALVES et al., 1999). Os critério de eliminação dos dados foram obtidos das equações que definem os limites inferior e superior:

$$AI = QS - QI \quad (5)$$

$$LS = QS + (1,5 * AI) \quad (6)$$

$$LI = QI - (1,5 * AI) \quad (7)$$

Sendo que :

AI é a Amplitude Interquartil;

LS é o Limite Superior;

LI é o Limite Inferior;

QS e QI são os Quartis Superior e Inferior.

Assim, os valores usados para a análise final das informações foram aqueles que se inseriram dentro desses limites:

$$LI \leq \text{valor} \leq LS \quad (8)$$

A retirada dos dados periféricos possibilitou o ajuste do modelo teórico ao semivariograma experimental, reduzindo o efeito da tendência devido a pontos não representativos do universo amostral.

5.10 Análise geoestatística dos dados amostrados

Para análise geoestatística foi utilizado o programa computacional GS+ (2000). A partir dos dados mapeados foram obtidos os variogramas experimentais, e a estes foram ajustados os variogramas teóricos. O GS+ realiza a escolha do melhor modelo do variograma teórico baseando-se na minimização das soma dos quadrados dos resíduos. Os modelos de variogramas avaliados foram exponencial, esférico, gaussiano e linear.

Com o ajuste dos variogramas teóricos foi possível definir os processos de interpolação dos dados para a confecção dos mapas, quando o modelo de variograma foi linear a interpolação foi realizada pelo processo do inverso da distância e para os demais modelos foi realizada pelo processo de krigagem.

Para a confecção dos mapas foi utilizado o programa computacional Surfer.

Avaliou-se o grau de dependência espacial por meio do calculo da relação entre o efeito pepita e o patamar (C_0/C_0+C) para cada modelo ajustado

(CAMBARDELLA et al., 1994). O grau de dependência espacial pode ser classificado em: forte, quando o variograma apresentar efeito pepita menor ou igual a 25 % do patamar; moderado, quando a relação estiver entre 25 e 75 %; fraco, quando o efeito pepita for superior a 75 % do patamar. Portanto, quanto menor a relação (C_0/C_0+C), menos o efeito pepita está influenciando a dependência espacial dos dados.

5.11 Sistematização e Análise dos resultados

Os modelos de capacidade de carga foram traçados com o auxílio do aplicativo Sigma Plot 4.0 para cada área de estudo nas duas profundidades consideradas: superficial e camada de máxima resistência mecânica. A diferença estatística entre equações ajustadas ao modelo de capacidade de suporte de carga proposto por Dias Junior (1994) foi verificada utilizando o procedimento estatístico proposto por Snedecor & Cochran (1989).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Estatística Descritiva das propriedades físicas e mecânicas do solo

As Tabelas 8 a 20 apresentam os resultados da análise estatística descritiva, média, mediana, valores máximo e mínimo, desvio padrão, coeficiente de assimetria, curtose e variação, das propriedades físicas e mecânicas do solo para áreas estudadas. As Tabelas de 8 a 15 mostram: umidade gravimétrica (U), densidade inicial do solo (D_{si}), porosidade inicial do solo (P_{si}), densidade do solo na pressão de preconsolidação ($D_{s\sigma_p}$), porosidade do solo na pressão de preconsolidação ($P_{s\sigma_p}$) e pressão de preconsolidação (σ_p) e as Tabelas 16 a 20 mostram a resistência do solo à penetração, medida pelo índice de cone (IC) para as áreas e profundidades estudadas.

Pela análise estatística descritiva, as medidas de posição, média e mediana são medidas que permitem avaliar se a distribuição é simetria. A variação entre a média e a mediana indica assimetria na distribuição dos dados. Em situações onde a distribuição dos valores é considerada normal os valores da média e mediana tendem a ser igual, o que ocorreu para maioria dos atributos estudados. Outros índices que confirmam esta situação foram os coeficientes de assimetria e curtose, onde valores próximos de zero sugerem uma distribuição normal para os dados (LIBARDI et al., 1996), assim como o teste de Kolmogorov-Smirnov (CAMPOS, 1983).

Tabela 8 – Análise de estatística descritiva: Umidade gravimétrica (U), pressão de preconsolidação (σ_p), Densidade inicial (Dsi) e na pressão de preconsolidação ($Ds\sigma_p$), Porosidade inicial (Psi) e na pressão de preconsolidação ($Ps\sigma_p$), na Área 1, Gleba 1, profundidade superficial (0-0,1 m), Plantio Convencional, 2002.

Atributos						
Estatística	U	σ_p	Dsi	Psi	$Ds\sigma_p$	$Ps\sigma_p$
Descritiva	(kg kg ⁻¹)	(kPa)	(Mg m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)	(Mg m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)
Nº Amostras	20	20	20	20	20	20
Média	9,0	341	1,38	48,35	1,46	44,84
Mediana	8,0	348	1,39	47,97	1,47	44,19
Valor Máximo	13,0	516	1,56	54,36	1,64	51,23
Valor Mínimo	8,0	167	1,22	41,51	1,28	37,10
Desvio Padrão	1,96	90,76	0,08	2,88	0,08	3,05
Coef. Assimetria	1,66	-0,12	-0,11	0,08	-0,24	0,02
Coef. Curtose	0,90	-0,40	1,17	1,23	-0,02	0,05
Coef. Variação (%)	22	27	6	6	5	7
KS*	0,486	0,131	0,200	0,186	0,103	0,128
Valor Crítico a 1 %	0,364	0,364	0,364	0,364	0,364	0,364

* Valor estatístico Kolmogorov-Smirnov, avalia a distribuição normal do dados, o valor KS deve ser menor que o valor crítico tabelado.

Tabela 9 – Análise de estatística descritiva: Umidade gravimétrica (U), pressão de preconsolidação (σ_p), Densidade inicial (Dsi) e na pressão de preconsolidação ($Ds\sigma_p$), Porosidade inicial (Psi) e na pressão de preconsolidação ($Ps\sigma_p$), na Área 1, Gleba 1, profundidade CMRM, Plantio Convencional, 2002.

Atributos						
Estatística	U	σ_p	Dsi	Psi	$Ds\sigma_p$	$Ps\sigma_p$
Descritiva	(kg kg ⁻¹)	(kPa)	(Mg m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)	(Mg m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)
Nº Amostras	34	34	34	34	34	34
Média	8,9	366	1,40	47,66	1,42	46,08
Mediana	8,0	363	1,40	47,60	1,42	46,14
Valor Máximo	16,0	536	1,64	56,33	1,65	54,08
Valor Mínimo	8,0	223	1,17	38,76	1,19	37,67
Desvio Padrão	2,17	77,94	0,09	3,52	0,10	3,35
Coef. Assimetria	2,28	0,43	0,14	-0,09	0,05	-0,18
Coef. Curtose	4,17	-0,44	1,16	1,09	0,71	0,79
Coef. Variação (%)	24	21	6	7	7	7
KS*	0,491	0,194	0,135	0,119	0,115	0,119
Valor Crítico a 1 %	0,280	0,280	0,280	0,280	0,280	0,280

* Valor estatístico Kolmogorov-Smirnov, avalia a distribuição normal dos dados, o valor KS deve ser menor que o valor crítico tabelado.

Tabela 10 – Análise de estatística descritiva: Umidade gravimétrica (U), pressão de preconsolidação (σ_p), Densidade inicial (Dsi) e na pressão de preconsolidação ($Ds\sigma_p$), Porosidade inicial (Psi) e na pressão de preconsolidação ($Ps\sigma_p$), na Área1, Gleba 2, profundidade Superficial (0-0,1 m), Plantio Convencional, 2002.

Atributos						
Estatística	U	σ_p	Dsi	Psi	$Ds\sigma_p$	$Ps\sigma_p$
Descritiva	(kg kg ⁻¹)	(kPa)	(Mg m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)	(Mg m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)
Nº Amostras	34	34	34	34	34	34
Média	8,9	356	1,41	47,07	1,50	43,25
Mediana	8,0	352	1,42	47,04	1,49	43,25
Valor Máximo	14,0	523	1,65	53,84	1,77	50,82
Valor Mínimo	8,0	224	1,23	38,38	1,29	33,21
Desvio Padrão	1,61	71,18	0,10	3,63	0,10	3,70
Coef. Assimetria	2,19	0,45	0,10	-0,12	0,32	-0,40
Coef. Curtose	4,55	0,24	-0,21	-0,27	0,57	0,55
Coef. Variação (%)	18	20	7	8	7	9
KS*	0,355	0,143	0,080	0,066	0,112	0,095
Valor Crítico a 1 %	0,280	0,280	0,280	0,280	0,280	0,280

* Valor estatístico Kolmogorov-Smirnov, avalia a distribuição normal dos dados, o valor KS deve ser menor que o valor crítico tabelado.

Tabela 11 – Análise de estatística descritiva: Umidade gravimétrica (U), pressão de preconsolidação (σ_p), Densidade inicial (Dsi) e na pressão de preconsolidação ($Ds\sigma_p$), Porosidade inicial (Psi) e na pressão de preconsolidação ($Ps\sigma_p$), na Área1, Gleba 2, profundidade CMRM, Plantio Convencional, 2002.

Atributos						
Estatística	U	σ_p	Dsi	Psi	$Ds\sigma_p$	$Ps\sigma_p$
Descritiva	(kg kg ⁻¹)	(kPa)	(Mg m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)	(Mg m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)
Nº Amostras	20	20	20	20	20	20
Média	10,3	348	1,39	47,98	1,41	46,37
Mediana	8,0	338	1,40	47,67	1,41	46,30
Valor Máximo	17,0	565	1,51	52,29	1,52	51,30
Valor Mínimo	8,0	191	1,27	43,45	1,29	42,75
Desvio Padrão	3,08	88,67	0,06	2,36	0,06	2,37
Coef. Assimetria	1,04	0,49	-0,32	0,32	-0,44	0,53
Coef. Curtose	-0,34	1,01	-0,19	-0,19	-0,41	-0,47
Coef. Variação (%)	30	25	5	5	5	5
KS*	0,317	0,151	0,131	0,121	0,145	0,151
Valor Crítico a 1 %	0,364	0,364	0,364	0,364	0,364	0,364

* Valor estatístico Kolmogorov-Smirnov, avalia a distribuição normal do dados, o valor KS deve ser menor que o valor crítico tabelado.

Tabela 12 – Análise de estatística descritiva: Umidade gravimétrica (U), pressão de preconsolidação (σ_p), Densidade inicial (Dsi) e na pressão de preconsolidação ($Ds\sigma_p$), Porosidade inicial (Psi) e na pressão de preconsolidação ($Ps\sigma_p$), na Área 2, profundidade superficial (0-0,1 m), Plantio Direto, 2004.

Atributos						
Estatística	U	σ_p	Dsi	Psi	$Ds\sigma_p$	$Ps\sigma_p$
Descritiva	(kg kg ⁻¹)	(kPa)	(Mg m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)	(Mg m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)
Nº Amostras	8	8	8	8	8	8
Média	14,6	372	1,61	39,56	1,74	34,60
Mediana	14,0	407	1,61	39,73	1,75	34,29
Valor Máximo	21,0	469	1,71	42,96	1,81	38,88
Valor Mínimo	13,0	218	1,52	35,88	1,62	32,42
Desvio Padrão	3,20	87,64	0,08	3,01	0,06	1,93
Coef. Assimetria	1,14	-0,80	0,02	-0,04	-1,65	1,72
Coef. Curtose	0,73	-0,54	-2,42	-2,38	4,12	4,03
Coef. Variação (%)	22	24	5	8	3	6
KS*	0,879	0,499	0,870	0,739	0,610	0,986
Valor Crítico a 1 %	0,576	0,576	0,576	0,576	0,576	0,576

* Valor estatístico Kolmogorov-Smirnov, avalia a distribuição normal dos dados, o valor KS deve ser menor que o valor crítico tabelado.

Tabela 13 – Análise de estatística descritiva: Umidade gravimétrica (U), pressão de preconsolidação (σ_p), Densidade inicial (Dsi) e na pressão de preconsolidação ($Ds\sigma_p$), Porosidade inicial (Psi) e na pressão de preconsolidação ($Ps\sigma_p$), na Área 2, profundidade superficial (0-0,1 m), Plantio Convencional, 2004.

Atributos						
Estatística	U	σ_p	Dsi	Psi	$Ds\sigma_p$	$Ps\sigma_p$
Descritiva	(kg kg ⁻¹)	(kPa)	(Mg m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)	(Mg m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)
Nº Amostras	7	7	7	7	7	7
Média	12,6	420	1,69	36,64	1,83	32,57
Mediana	13,0	425	1,71	35,85	1,83	31,73
Valor Máximo	17,0	496	1,76	41,52	2,02	33,05
Valor Mínimo	9,0	354	1,56	34,17	1,79	30,70
Desvio Padrão	2,44	54,48	0,06	2,31	0,08	1,43
Coef. Assimetria	0,60	0,06	-1,91	1,88	2,23	1,10
Coef. Curtose	1,89	-1,73	4,68	4,54	5,43	1,16
Coef. Variação (%)	19	13	4	6	4	4
KS*	0,822	0,586	0,691	0,703	0,680	0,720
Valor Crítico a 1 %	0,616	0,616	0,616	0,616	0,616	0,616

* Valor estatístico Kolmogorov-Smirnov, avalia a distribuição normal dos dados, o valor KS deve ser menor que o valor crítico tabelado.

Tabela 14 – Análise de estatística descritiva: Umidade gravimétrica (U), pressão de preconsolidação (σ_p), Densidade inicial (Dsi) e na pressão de preconsolidação ($Ds\sigma_p$), Porosidade inicial (Psi) e na pressão de preconsolidação ($Ps\sigma_p$), na Área 2, profundidade CMRM, Plantio Direto, 2004.

Atributos						
Estatística	U	σ_p	Dsi	Psi	$Ds\sigma_p$	$Ps\sigma_p$
Descritiva	(kg kg ⁻¹)	(kPa)	(Mg m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)	(Mg m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)
Nº Amostras	8	8	8	8	8	8
Média	14,5	378	1,65	38,34	1,78	32,91
Mediana	14,0	408	1,62	39,42	1,79	32,46
Valor Máximo	18,0	536	1,82	43,32	1,90	37,81
Valor Mínimo	12,0	192	1,51	31,76	1,64	28,90
Desvio Padrão	2,14	124,95	0,10	3,89	0,09	3,23
Coef. Assimetria	0,56	-0,35	0,53	-0,56	-0,28	0,29
Coef. Curtose	-1,15	-1,18	-0,59	-0,69	-1,30	-1,49
Coef. Variação (%)	15	33	6	10	5	10
KS*	0,891	0,642	0,794	0,773	0,684	0,849
Valor Crítico a 1 %	0,576	0,576	0,576	0,576	0,576	0,576

* Valor estatístico Kolmogorov-Smirnov, avalia a distribuição normal dos dados, o valor calculado deve ser menor que o valor crítico tabelado.

Tabela 15 – Análise de estatística descritiva: Umidade gravimétrica (U), pressão de preconsolidação (σ_p), Densidade inicial (Dsi) e na pressão de preconsolidação ($Ds\sigma_p$), Porosidade inicial (Psi) e na pressão de preconsolidação ($Ps\sigma_p$), na Área 2, profundidade CMRM, Plantio Convencional, 2004.

Atributos						
Estatística	U	σ_p	Dsi	Psi	$Ds\sigma_p$	$Ps\sigma_p$
Descritiva	(kg kg ⁻¹)	(kPa)	(Mg m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)	(Mg m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)
Nº Amostras	7	7	7	7	7	7
Média	15,4	256	1,70	36,24	1,81	32,12
Mediana	15,0	284	1,71	35,89	1,81	31,41
Valor Máximo	22,0	364	1,76	38,80	1,93	36,97
Valor Mínimo	9,0	100	1,63	34,14	1,69	27,59
Desvio Padrão	4,43	102,58	0,05	1,72	0,08	2,89
Coef. Assimetria	0,26	-0,82	-0,46	0,48	-0,06	0,33
Coef. Curtose	-0,60	-0,99	-0,89	-0,91	1,23	1,28
Coef. Variação (%)	29	40	3	5	4	9
KS*	0,788	0,574	0,655	0,863	0,504	0,810
Valor Crítico a 1 %	0,616	0,616	0,616	0,616	0,616	0,616

* Valor estatístico Kolmogorov-Smirnov, avalia a distribuição normal dos dados, o valor calculado deve ser menor que o valor crítico tabelado.

Tabela 16 – Análise de estatística descritiva do índice de cone (IC, kPa), Área 1, Plantio Convencional, 2002.

Estatística Descritiva	Profundidades				
	0-0,1 (m)	0,1-0,2 (m)	0,2-0,3 (m)	0,3-0,4 (m)	>0,4 (m)
Nº Amostras	235	240	240	238	138
Média	1611	3566	3393	2455	1851
Mediana	1483	3112	2985	2054	1777
Valor Máximo	6601	15044	17998	14133	4431
Valor Mínimo	273	340	779	845	236
Desvio Padrão	857,60	2004,06	2261,01	1498,04	751,03
Coef. Assimetria	2,28	3,05	3,54	3,82	0,90
Coef. Curtose	9,43	12,72	16,96	22,06	1,14
Coef. Variação (%)	53	56	67	61	41
KS*	0,127	0,188	0,191	0,179	0,115
Valor Crítico a 1 %	0,106	0,105	0,105	0,106	0,139

* Valor estatístico Kolmogorov-Smirnov, avalia a distribuição normal dos dados, o valor KS deve ser menor que o valor crítico tabelado.

Tabela 17 – Análise de estatística descritiva do índice de cone (IC, kPa), Área 1, Plantio Direto, 2004.

Estatística Descritiva	Profundidades				
	0-0,1 (m)	0,1-0,2 (m)	0,2-0,3 (m)	0,3-0,4 (m)	>0,4 (m)
Nº Amostras	56	56	56	56	53
Média	1133	1685	1800	1592	1338
Mediana	1053	1716	1761	1548	1294
Valor Máximo	2609	3050	3624	4476	2632
Valor Mínimo	589	637	719	833	495
Desvio Padrão	422,32	472,56	559,61	545,36	363,52
Coef. Assimetria	1,63	0,29	0,52	2,83	0,83
Coef. Curtose	3,50	0,59	0,85	13,59	2,65
Coef. Variação (%)	37	28	31	34	27
KS*	0,147	0,070	0,069	0,173	0,094
Valor Crítico a 1 %	0,218	0,218	0,218	0,218	0,224

* Valor estatístico Kolmogorov-Smirnov, avalia a distribuição normal dos dados, o valor KS deve ser menor que o valor crítico tabelado.

Dentro deste contexto, observou-se que os dados da Área 1 (Tabelas 8 a 11), apresentaram distribuição normal dos dados, exceto para umidade gravimétrica, onde os valores foram discrepantes a uma distribuição normal. Porém, quando os dados foram transformados em log, indicaram uma proximidade à distribuição lognormal. A normalidade

para a variável densidade do solo também foi verificada por Souza et al. (2001) e Carvalho et al. (2003).

Tabela 18 – Análise de estatística descritiva do índice de cone (IC, kPa), Área 1, Plantio Convencional, 2004.

Estatística Descritiva	Profundidades				
	0-0,1 (m)	0,1-0,2 (m)	0,2-0,3 (m)	0,3-0,4 (m)	>0,4 (m)
Nº Amostras	52	52	52	52	52
Média	1968	3143	2337	1629	1328
Mediana	1919	2942	2198	1594	1276
Valor Máximo	3257	5759	4140	4266	2978
Valor Mínimo	1001	1483	1196	681	836
Desvio Padrão	589,27	1037,12	725,48	540,64	348,14
Coef. Assimetria	0,34	0,67	0,87	2,47	2,45
Coef. Curtose	-0,66	-0,22	0,35	10,67	9,66
Coef. Variação (%)	30	33	31	33	26
KS*	0,079	0,105	0,120	0,173	0,168
Valor Crítico a 1 %	0,226	0,226	0,226	0,226	0,226

* Valor estatístico Kolmogorov-Smirnov, avalia a distribuição normal dos dados, o valor KS deve ser menor que o valor crítico tabelado.

Tabela 19 – Resultado da análise de estatística descritiva do índice de cone (IC, kPa), Área 2, Plantio Direto, 2004.

Estatística Descritiva	Profundidades				
	0-0,1 (m)	0,1-0,2 (m)	0,2-0,3 (m)	0,3-0,4 (m)	>0,4 (m)
Nº Amostras	58	58	58	58	55
Média	1482	1859	1699	1463	1306
Mediana	1401	1702	1612	1450	1270
Valor Máximo	2924	4056	2821	2316	2376
Valor Mínimo	593	769	753	803	724
Desvio Padrão	560,00	719,86	533,40	355,59	350,93
Coef. Assimetria	0,87	1,35	0,37	0,38	0,73
Coef. Curtose	0,56	2,11	-0,53	-0,48	0,89
Coef. Variação (%)	38	39	31	24	27
KS*	0,157	0,186	0,163	0,146	0,088
Valor Crítico a 1 %	0,214	0,214	0,214	0,214	0,220

* Valor estatístico Kolmogorov-Smirnov, avalia a distribuição normal dos dados, o valor KS deve ser menor que o valor crítico tabelado.

Para Área 2 (Tabelas 12 a 15), a maioria dos dados apresentaram valores discrepantes à distribuição normal, indicando proximidade para a distribuição lognormal.

Analisando os valores de IC (Tabelas 16 a 20) observou-se que apresentaram, de maneira geral, distribuição normal dos dados, exceto para área 1, plantio convencional, ano 2002 e Área 2, plantio convencional, ano 2004, onde os valores foram nitidamente discrepantes aos exibidos por uma distribuição normal, mas indicaram proximidade para a distribuição lognormal.

Observou-se que os dados de σ_p e IC apresentaram grande variabilidade quando comparados os limites superior e inferior, assim como os valores do desvio padrão.

O coeficiente de variação (CV) permitiu avaliar em termos relativos o grau de concentração em torno da média, fornecendo uma idéia de precisão dos dados. A princípio considera-se que quanto menor o CV, mais homogêneos, são os dados.

Tabela 20 – Análise de estatística descritiva do índice de cone (IC, kPa), Área 2, Plantio Convencional, 2004.

Estatística Descritiva	Profundidades				
	0-0,1 (m)	0,1-0,2 (m)	0,2-0,3 (m)	0,3-0,4 (m)	>0,4 (m)
Nº Amostras	39	39	39	36	29
Média	1536	2238	1868	1526	1414
Mediana	1488	2272	1850	1484	1417
Valor Máximo	2487	3371	2642	3090	2672
Valor Mínimo	794	1240	745	777	644
Desvio Padrão	445,97	540,74	515,39	439,51	406,27
Coef. Assimetria	0,45	0,15	0,33	1,17	1,03
Coef. Curtose	-0,49	-0,45	0,64	3,28	2,57
Coef. Variação (%)	29	24	28	29	29
KS*	1,085	1,064	1,071	1,102	0,225
Valor Crítico a 1 %	0,261	0,261	0,261	0,272	0,303

* Valor estatístico Kolmogorov-Smirnov, avalia a distribuição normal dos dados, o valor KS deve ser menor que o valor crítico tabelado.

Os valores de coeficiente de variação (CV) para os parâmetros: U , σ_p , D_{si} , Ψ_i , $D_{s\sigma_p}$ e $\Psi_{s\sigma_p}$ mostraram que os valores médios são bastante representativos, pois apresentaram CV inferiores a 50 % (Fonseca & Martins, 1986) para todas as variáveis estudadas. Os maiores valores de CV foram para U , σ_p e IC.

Para o ano de 2002, Área 1, pode-se observar pela Tabela 27 que os valores de coeficiente de variação (CV) para o IC foram em sua maioria superiores a 50%, indicando uma grande variabilidade dos dados. Para as demais áreas e período o CV esteve entorno de 30 %, indicando que os dados se concentraram próximos da média.

O CV permitiu caracterizar D_{si} , Ψ_i , $D_{s\sigma_p}$ e $\Psi_{s\sigma_p}$ como de baixa variação ($CV < 10 \%$), U e σ_p de alta variação ($20 \% < CV < 30\%$) e de alta a muito alta variação ($CV > 30 \%$) para valores de IC, segundo a classificação proposta por Gomes (1985) para ensaios agrícolas.

Adotando-se o critério de classificação para o CV proposto por Warrick & Nielsen (1980), os valores revelaram-se baixos ($CV < 12 \%$) para D_{si} , Ψ_i , $D_{s\sigma_p}$ e $\Psi_{s\sigma_p}$, médio ($12 \% < CV < 24\%$) a altos ($CV > 24 \%$) para U e σ_p e altos para IC.

Valores de CV: baixo para a densidade concorda com estudos de Souza (1992), Machado (1994), Souza et al. (1997), Cavalcante (1999), Souza et al. (2001) Gonçalves et al. (2001), Carvalho et al. (2003) e Souza et al. (2004); baixos para porosidade total corroboram com os resultados obtidos por Machado (1994), Cavalcante (1999), Souza et al. (2001) e Carvalho et al. (2003); e altos para resistência do solo à penetração, medidas pelo IC, concordam com resultados obtidos por Souza et al. (2001) e Souza et al. 2004.

6.2 Geoestatística das propriedades físicas e mecânicas do solo

As Tabelas 21 a 29 mostram os resultados das análises geoestatísticas para os atributos dos solos referentes às glebas 1 e 2 e área da fazenda Buriti Mirim, nas duas profundidades de estudo, superficial (SP) e camada de máxima resistência mecânica (CMRM).

Tabela 21 – Análise geoestatística: Umidade gravimétrica (U , kg kg^{-1}), pressão de preconsolidação (σ_p , kPa), Densidade inicial (D_{si} , Mg m^{-3}) e na pressão de preconsolidação ($Ds\sigma_p$, Mg m^{-3}), Porosidade inicial (P_{si} , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e na pressão de preconsolidação ($Ps\sigma_p$, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), gleba 1, área 1, profundidade superficial (0-0,1 m).

Atributos	Modelo	C_0 ¹	C_0+C ²	A ³ (m)	C_0/C_0+C (%)
U	Esférico	0,01	5,648	264,60	0,18
σ_p	Exponencial	10,00	8730,00	29,10	0,11
D_{si}	Esférico	0,0027	0,0082	382,00	32,93
P_{si}	Esférico	3,57	11,37	372,40	31,40
$Ds\sigma_p$	Exponencial	0,0024	0,0078	75,50	30,77
$Ps\sigma_p$	Exponencial	4,09	10,94	81,20	37,39

¹ Efeito pepita, ² Patamar, ³ Alcance.

Tabela 22 – Análise geoestatística: Umidade gravimétrica (U , kg kg^{-1}), pressão de preconsolidação (σ_p , kPa), Densidade inicial (D_{si} , Mg m^{-3}) e na pressão de preconsolidação ($Ds\sigma_p$, Mg m^{-3}), Porosidade inicial (P_{si} , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e na pressão de preconsolidação ($Ps\sigma_p$, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), gleba 1, área 1, profundidade CMRM.

Atributos	Modelo	C_0 ¹	C_0+C ²	A ³ (m)	C_0/C_0+C (%)
U	Esférico	0,01	8,76	355,20	0,11
σ_p	Esférico	1680,00	9062,00	442,80	18,54
D_{si}	Esférico	0,00001	0,00992	43,50	0,10
P_{si}	Esférico	0,19	13,89	44,20	1,36
$Ds\sigma_p$	Esférico	0,0003	0,0101	42,30	2,97
$Ps\sigma_p$	Esférico	0,01	12,28	35,80	0,08

¹ Efeito pepita, ² Patamar, ³ Alcance.

Tabela 23 – Análise geoestatística: Umidade gravimétrica (U , kg kg^{-1}), pressão de preconsolidação (σ_p , kPa), Densidade inicial (D_{si} , Mg m^{-3}) e na pressão de preconsolidação ($Ds\sigma_p$, Mg m^{-3}), Porosidade inicial (P_{si} , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e na pressão de preconsolidação ($Ps\sigma_p$, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), gleba 2, área 1, profundidade superficial (0-0,1 m).

Atributos	Modelo	C_0 ¹	C_0+C ²	A ³ (m)	C_0/C_0+C (%)
U	Esférico	0,001	2,617	21,30	0,04
σ_p	Esférico	460,00	5094,00	31,60	9,03
D_{si}	Esférico	0,0036	0,0196	710,90	18,37
P_{si}	Esférico	4,87	27,36	710,90	17,80
$Ds\sigma_p$	Esférico	0,0032	0,0195	665,30	16,41
$Ps\sigma_p$	Esférico	4,34	28,46	680,20	15,25

¹ Efeito pepita, ² Patamar, ³ Alcance.

Tabela 24 – Análise geoestatística: Umidade gravimétrica (U , kg kg^{-1}), pressão de preconsolidação (σ_p , kPa), Densidade inicial (D_{si} , Mg m^{-3}) e na pressão de preconsolidação ($Ds\sigma_p$, Mg m^{-3}), Porosidade inicial (P_{si} , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e na pressão de preconsolidação ($Ps\sigma_p$, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), gleba 2, área 1, profundidade CMRM.

Atributos	Modelo	C_0 ¹	C_0+C ²	A ³ (m)	C_0/C_0+C (%)
U	Esférico	0,01	11,40	95,00	0,09
σ_p	Exponencial	2820,00	7245,00	71,00	38,92
D_{si}	Esférico	0,00001	0,0045	30,90	0,22
P_{si}	Esférico	0,01	6,42	31,10	0,16
$Ds\sigma_p$	Esférico	0,00001	0,0044	30,90	0,23
$Ps\sigma_p$	Esférico	0,01	6,19	30,50	0,16

¹ Efeito pepita, ² Patamar, ³ Alcance.

Tabela 25 – Análise geoestatística: Umidade gravimétrica (U , kg kg^{-1}), pressão de preconsolidação (σ_p , kPa), Densidade inicial (D_{si} , Mg m^{-3}) e na pressão de preconsolidação ($Ds\sigma_p$, Mg m^{-3}), Porosidade inicial (P_{si} , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e na pressão de preconsolidação ($Ps\sigma_p$, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), Área 2, profundidade superficial (0-0,1 m).

Atributos	Modelo	C_0 ¹	C_0+C ²	A ³ (m)	C_0/C_0+C (%)
U	Ef. Pepita Puro	—	—	—	—
σ_p	Esférico	10,00	5279,00	153,00	0,19
D_{si}	Ef. Pepita Puro	—	—	—	—
P_{si}	Ef. Pepita Puro	—	—	—	—
$Ds\sigma_p$	Esférico	0,0014	0,0110	576,00	1,27
$Ps\sigma_p$	Esférico	0,0100	3,7980	138,00	0,26

¹ Efeito pepita, ² Patamar, ³ Alcance.

Tabela 26 – Análise geoestatística: Umidade gravimétrica (U , kg kg^{-1}), pressão de preconsolidação (σ_p , kPa), Densidade inicial (D_{si} , Mg m^{-3}) e na pressão de preconsolidação ($Ds\sigma_p$, Mg m^{-3}), Porosidade inicial (P_{si} , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e na pressão de preconsolidação ($Ps\sigma_p$, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), Área 2, profundidade CMRM.

Atributos	Modelo	C_0 ¹	C_0+C ²	A ³ (m)	C_0/C_0+C (%)
U	Esférico	0,01	8,94	243,00	0,11
σ_p	Esférico	10,00	19690,00	206,00	0,05
D_{si}	Esférico	0,0000	0,0023	103,00	0,00
P_{si}	Ef. Pepita Puro	—	—	—	—
$Ds\sigma_p$	Ef. Pepita Puro	—	—	—	—
$Ps\sigma_p$	Ef. Pepita Puro	—	—	—	—

¹ Efeito pepita, ² Patamar, ³ Alcance.

Tabela 27 – Análise geoestatística da resistência à penetração (índice de cone – IC) na área 1, Buriti-Mirim, 2002.

Profundidade (m)	Modelo	C_0 ¹	C_0+C ²	A ³ (m)	C_0/C_0+C (%)
0-0,1	Ef. Pepita Puro	—	—	—	—
0,1-0,2	Ef. Pepita Puro	—	—	—	—
0,2-0,3	Ef. Pepita Puro	—	—	—	—
0,3-0,4	Ef. Pepita Puro	—	—	—	—
> 0,4	Esférico	109000,0	569000,0	75,00	19,16

¹ Efeito pepita, ² Patamar, ³ Alcance.

Tabela 28 – Análise geoestatística da resistência à penetração (índice de cone – IC) na área 1, Buriti-Mirim, 2004.

Profundidade (m)	Modelo	C_0 ¹	C_0+C ²	A ³ (m)	C_0/C_0+C (%)
0-0,1	Esférico	179000,0	581900,0	849,0	30,76
0,1-0,2	Esférico	404000,0	1885000,0	1098,0	21,43
0,2-0,3	Esférico	88000,0	491600,0	74,00	17,90
0,3-0,4	Exponencial	23300,0	302900,0	87,00	7,69
> 0,4	Exponencial	19700,0	126800,0	81,00	15,54

¹ Efeito pepita, ² Patamar, ³ Alcance.

Tabela 29 – Análise geoestatística da resistência à penetração (índice de cone – IC) na área 2, Buriti-Mirim, 2004.

Profundidade (m)	Modelo	C_0 ¹	C_0+C ²	A ³ (m)	C_0/C_0+C (%)
0-0,1	Esférico	33100,0	269300,0	81,0	12,29
0,1-0,2	Exponencial	136000,0	479200,0	63,0	28,38
0,2-0,3	Esférico	59500,0	286800,0	105,0	20,75
0,3-0,4	Exponencial	101200,0	222800,0	511,0	45,42
> 0,4	Exponencial	34600,0	160200,0	124,0	21,16

¹ Efeito pepita, ² Patamar, ³ Alcance.

Observou-se que o grau de dependência espacial das variáveis estudadas foram considerados forte ($C_0/C_0+C < 25$ %) para maioria dos atributos, apresentando dependência espacial moderada ($25\% < C_0/C_0+C < 75$ %) para gleba 1 referente

aos seguintes atributos: D_{si} , P_{si} , $Ds\sigma_p$, $Ps\sigma_p$, na profundidade SP e na gleba 2 para σ_p , na profundidade CMRM.

Para o estudo da variabilidade espacial da área 2, os valores obtidos de teor de água U, D_{si} , P_{si} , na profundidade SP e P_{si} , $Ds\sigma_p$, $Ps\sigma_p$, na profundidade CMRM verificaram-se baixa dependência espacial ($C_0/C_0+C > 75 \%$), apresentando efeito pepita puro, o que indica ausência de dependência espacial entre os pontos amostrados.

Considerando-se os valores de IC observou-se que para área 1, 2002, a dependência espacial dos dados foi baixa ($C_0/C_0+C > 75 \%$), apresentando para a maioria das profundidades efeito pepita puro (ausência de dependência espacial). Para o ano de 2004, área 1 e 2, o comportamento foi outro, a dependência espacial dos dados foi forte ($C_0/C_0+C < 25 \%$) para quase todas as profundidades, exceção à profundidade 0-0,10 m para gleba 1, área 1 e para profundidade 0,10-0,20 m e 0,30-0,40 m para área 2, que apresentam uma dependência espacial moderada ($25\% < C_0/C_0+C < 75 \%$) dos dados.

Os modelos dos variogramas que apresentaram efeito pepita pequeno mostraram que toda a variabilidade espacial está sendo descrita adequadamente pelo modelo ajustado.

O modelo que se mostrou mais adequado para explicar a estrutura da variabilidade espacial dos atributos mapeados foi o esférico, corroborando com resultados de Souza et al (1996) e Salviano et al (1998).

6.3 Mapeamento das Propriedades Físicas do Solo

6.3.1 Índice de Cone

O mapa de resistência à penetração do solo na área 1 no ano 2002 apresentado na Figura 20 mostra a variabilidade espacial do índice de cone (IC) em função do espaço e profundidade, onde pode-se verificar as camadas de maior resistência mecânica do solo (CMRM).

As CMRM foram encontradas a profundidade de 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m, indicando a existência de camadas compactadas nesta profundidade.

Como esta área foi cultivada em sistema de preparo convencional (arado e grade), esta compactação pode ser atribuída à técnica de preparo do solo, onde as máquinas utilizadas acabaram por transferir seu peso ao subsolo, na profundidade média de trabalho. As variações na profundidade indicaram alterações do “pé de grade ou pé de arado”, devido a problemas de regulagem dos equipamentos de preparo do solo na profundidade efetiva de trabalho.

Estes resultados corroboraram com Silva et al (2004), Silva (2002) e Kondo (1998) que constataram maior resistência mecânica do solo na profundidade média de trabalho para solos cultivados em sistema de preparo convencional, isto devido à influência das ferramentas de preparo do solo.

Em julho de 2004, na primeira quinzena, após a rotação de culturas, nova determinação de resistência à penetração foi realizada e os resultados estão apresentados no mapa da distribuição espacial do índice de cone, Figura 21.

Nesta etapa pode-se constatar que os valores de índice de cone continuaram maiores na profundidade média de trabalho, nas camadas 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m, igualmente como aconteceu em 2002 (Figura 20).

Porém, em 2004 onde a umidade do solo encontrava-se entorno de $13,0 \text{ kg kg}^{-1}$, os valores de índice de cone (IC) foram inferiores aos do ano de 2002, onde a umidade se encontrava em torno de $12,6 \text{ kg kg}^{-1}$, sugerindo que a rotação de cultura tenha influenciado na diminuição dos valores de resistência à penetração.

Nos dados de 2004, foi avaliada a influência do cultivo do solo (plantio convencional e direto) no efeito de compactação das camadas de solo. Na Figura 21 pôde-se observar que tanto para o plantio convencional (PC) como para o plantio direto rotacionado (PDR) as camadas que apresentaram maiores valores de índice de cone (IC) estavam na profundidade média de trabalho (0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m), o que justificou as camadas mais consolidadas na profundidade citada. Mas quando se compararam os dois tipos de cultivo, observou-se que a área de PC apresentou valores de IC mais elevados quando comparado à área de PDR, mostrando que as camadas mais consolidadas encontraram-se na profundidade média de trabalho.

De acordo com Silva et al. (1999a) a rotação de cultura tem tendência a reduzir a resistência à penetração no solo.

Wohlenberg et al. (2004) estudando um argissolo de textura arenosa, concluiu que a seqüência de cultura influenciou diferenciadamente na agregação do solo, dependendo da época do ano e tempo de estabelecimento dos sistemas de culturas e, observou ação direta da cultura na formação e estabilidade de agregados, sendo a estabilidade maior em sistemas de cultivo que aportava material orgânico e cobriam o solo durante todo o ano.

Genro Junior et al. (2004) estudando um Latossolo Vermelho distroférico, observou que o efeito de plantas de cobertura de estação quente com sistema radicular abundante, formador de poros biológicos na redução da resistência do solo à penetração não foi observado durante o tempo de estudo (ano agrícola 1998/1999).

Bertol et al. (2004) estudando um Cambissolo Húmico aluminico léptico, no período de maio de 1995 a abril de 2001, constatou que os sistemas de cultivo não influenciaram as propriedades físicas do solo.

Castro Filho et al (2002) constatou que a rotação de cultura não influenciou o índice de estabilidade dos agregados e que melhoras na agregação foram atribuídas ao aumento do teor de carbono orgânico.

Da análise estatística de comparação das médias dos valores de índice de cone, Tabela 30, pode-se observar que houve diferenças significativas em quase todas as profundidades, sendo que para a camada de 0,1-0,2 m (CMRM) as diferenças não foram significativas, embora a média de IC seja menor para 2004, indicando que para esta camada a rotação de cultura teve pouca influência.

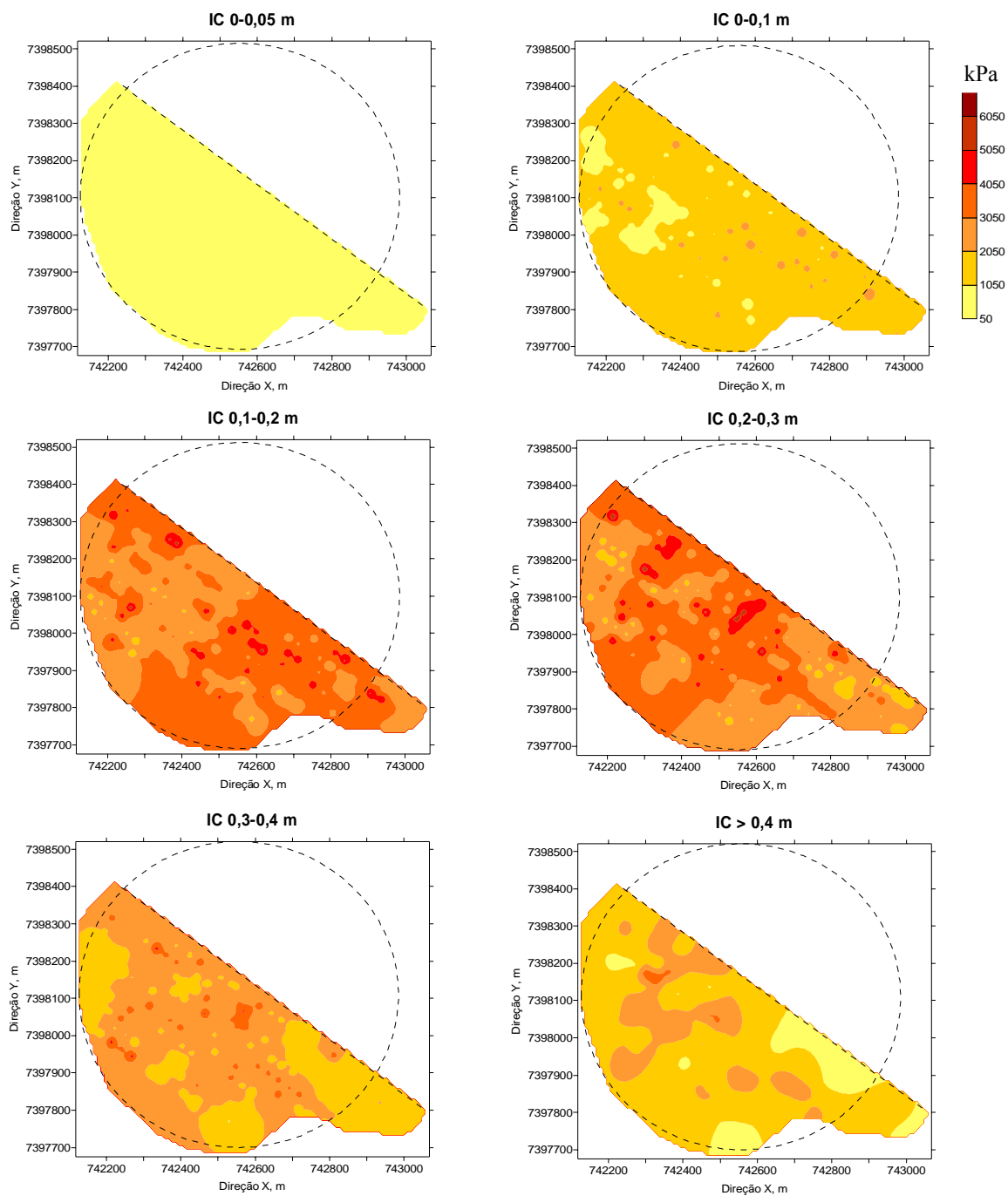


Figura 20 – Mapa de Isocompactação e distribuição espacial dos valores de índice de cone (IC, kPa) em diferentes camadas de solo, na área 1, na Fazenda Buriti-Mirim, no plantio convencional, no ano de 2002.

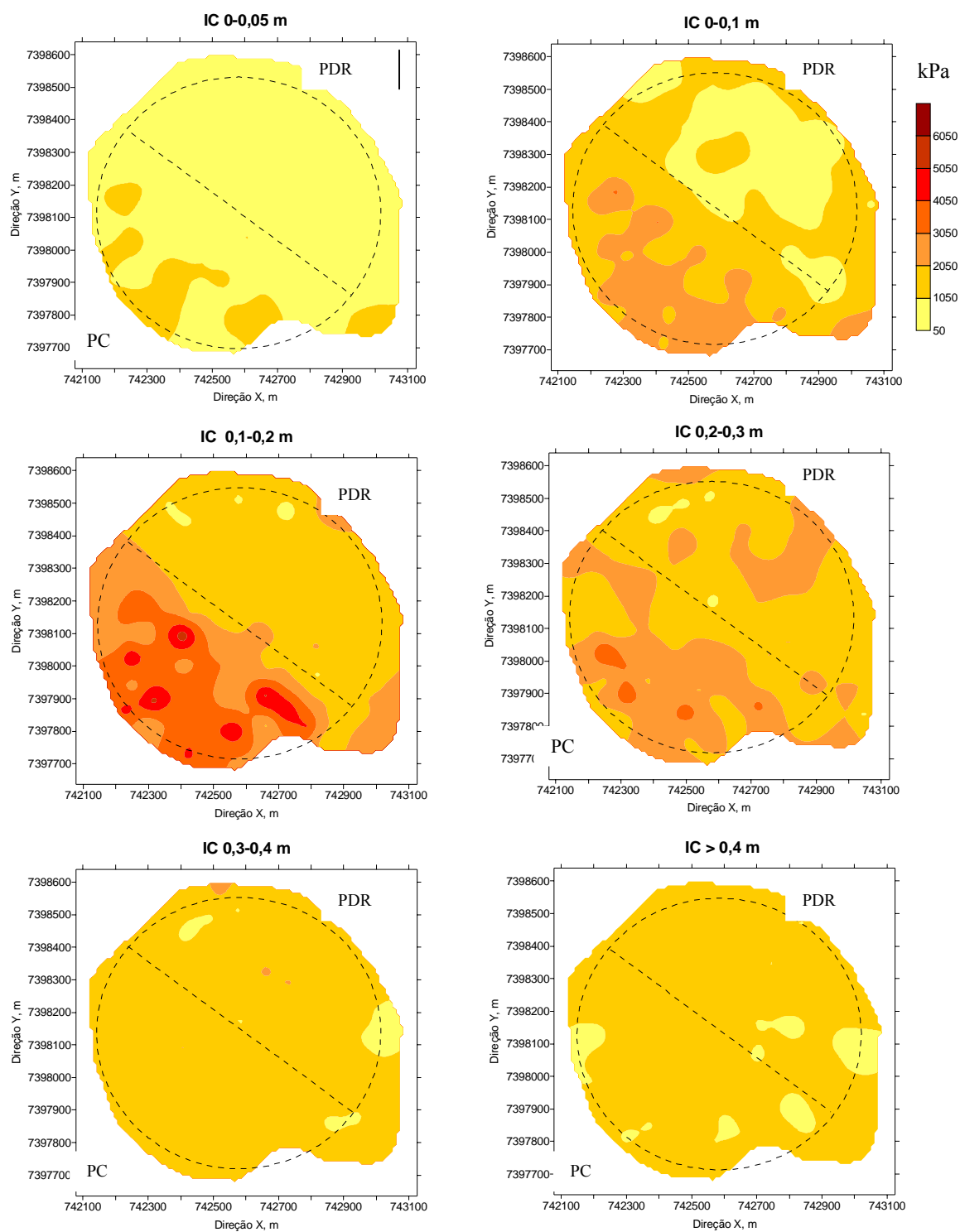


Figura 21 - Mapa de Isocompactação, distribuição espacial dos valores de índice de cone (IC, kPa) em diferentes camadas de solo, área 1, Fazenda Buriti-Mirim, plantio convencional (PC) e plantio direto rotacionado (PDR), ano de 2004.

Tabela 30 – Média da resistência à penetração (IC, kPa) da área 1, comparação estatística entre os anos de 2002 e 2004 pelo Teste de Tukey, a probabilidade de 5%.

Plantio Convencional		
Profundidade (m)	2002 (U=12,6 kg kg ⁻¹)	2004 (U=13,0 kg kg ⁻¹)
0-0,1	1571,8 ± 882,12 a*	1962,4 ± 585,08 b*
0,1 – 0,2	3566,1 ± 2004,1 a	3126,1 ± 1034,4 a
0,2 – 0,3	3393,3 ± 2261,0 a	2330,2 ± 719,87 b
0,3 – 0,4	2454,9 ± 1498,1 a	1622,8 ± 537,15 b
> 0,4	1851,5 ± 751,03 a	1324,7 ± 345,46 b

* médias seguidas com letras iguais nas linhas não apresentam diferenças significativas entre si.

Comparando os valores do ano de 2002 com o ano de 2004, na área cultivada sob plantio convencional, observou-se que a área 1 manteve as características da distribuição espacial do índice de cone nas diversas camadas estudadas.

Da análise estatística de comparação das médias de IC, Tabela 31, ficou evidenciado diferenças significativas de IC para a profundidade de 0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m, quando comparados os dois sistemas de cultivo, mostrando que o PDR apresentou menores valores de IC.

Tabela 31 – Média da Resistência à penetração (IC, kPa), comparando os sistemas de cultivo (PD e PC), área 1, 2004, análise estatística pelo Teste de Tukey, a probabilidade de 5%.

Sistemas de Cultivo		
Profundidade (m)	PC	PD
0-0,1	1962,4 ± 585,08 a*	1123,4 ± 420,24 b*
0,1 – 0,2	3126,1 ± 1034,4 a	1675,4 ± 470,69 b
0,2 – 0,3	2330,2 ± 719,87 a	1796,0 ± 563,95 b
0,3 – 0,4	1622,8 ± 537,15 a	1597,4 ± 548,96 a
> 0,4	1324,7 ± 345,46 a	1341,0 ± 356,06 a

* médias seguidas com letras iguais nas linhas não apresentam diferenças significativas entre si.

Observando o mapa de resistência à penetração, área 2, Figura 22, que mostra a variabilidade espacial do índice de cone (IC) em função do espaço e profundidade,

verificou-se que a camada de maior resistência mecânica (CMRM) encontrou-se na profundidade de 0,1 a 0,2 m, mostrando maior consolidação do solo nesta camada, mais próxima à superfície.

O plantio convencional provocou maiores IC na CMRM (0,1 a 0,2 m). O mesmo comportamento foi observado para os valores de IC da área 1, no ano 2004, que concordam com resultados de Aase & Pikul (1994). Segundo esses autores os solos cultivados sob plantio direto, geralmente, apresentaram valores de resistência à penetração menores, quando comparados àqueles cultivados sob plantio convencional, exceções são feitas às camadas mais superficiais que corresponderam aos primeiros centímetros.

Para a área 2, observou-se que quando comparadas às médias de IC, para os dois tipos de plantio, é na CMRM (0,1-0,2 m) que ocorreram diferenças significativas e, para as outras profundidades, apesar dos valores serem menores para o PDR, estatisticamente as diferenças não foram significativas, Tabela 32.

Tabela 32 – Média da Resistência à penetração (kPa), comparando os sistemas de cultivo (PDR e PC), área 2, 2004, análise estatística pelo Teste de Tukey, a probabilidade de 5%.

Profundidade (m)	Sistemas de Cultivo	
	PC	PD
0-0,1	1536,0 ± 445,96 a*	1482,2 ± 559,96 a*
0,1 – 0,2	2237,7 ± 540,75 a	1858,6 ± 719,84 b
0,2 – 0,3	1868,4 ± 515,44 a	1698,5 ± 533,45 a
0,3 – 0,4	1526,4 ± 439,43 a	1463,2 ± 355,57 a
> 0,4	1414,0 ± 406,32 a	1306,2 ± 350,94 a

* médias seguidas com letras iguais nas linhas não apresentam diferenças significativas entre si.

Nesta área foram avaliadas as propriedades como: densidade do solo, porosidade, pressão de preconsolidação e umidade, para os dois tipos de plantio, por meio da análise estatística de comparação das médias destas propriedades, Tabela 33. Concluiu-se que não houve diferenças significativas para a maioria dos atributos e profundidades, mostrando que apenas para profundidade de 0,2-0,4 m que a densidade do solo apresentou diferenças significativas, sendo que para o PDR a densidade foi menor do que no PC, nesta profundidade.

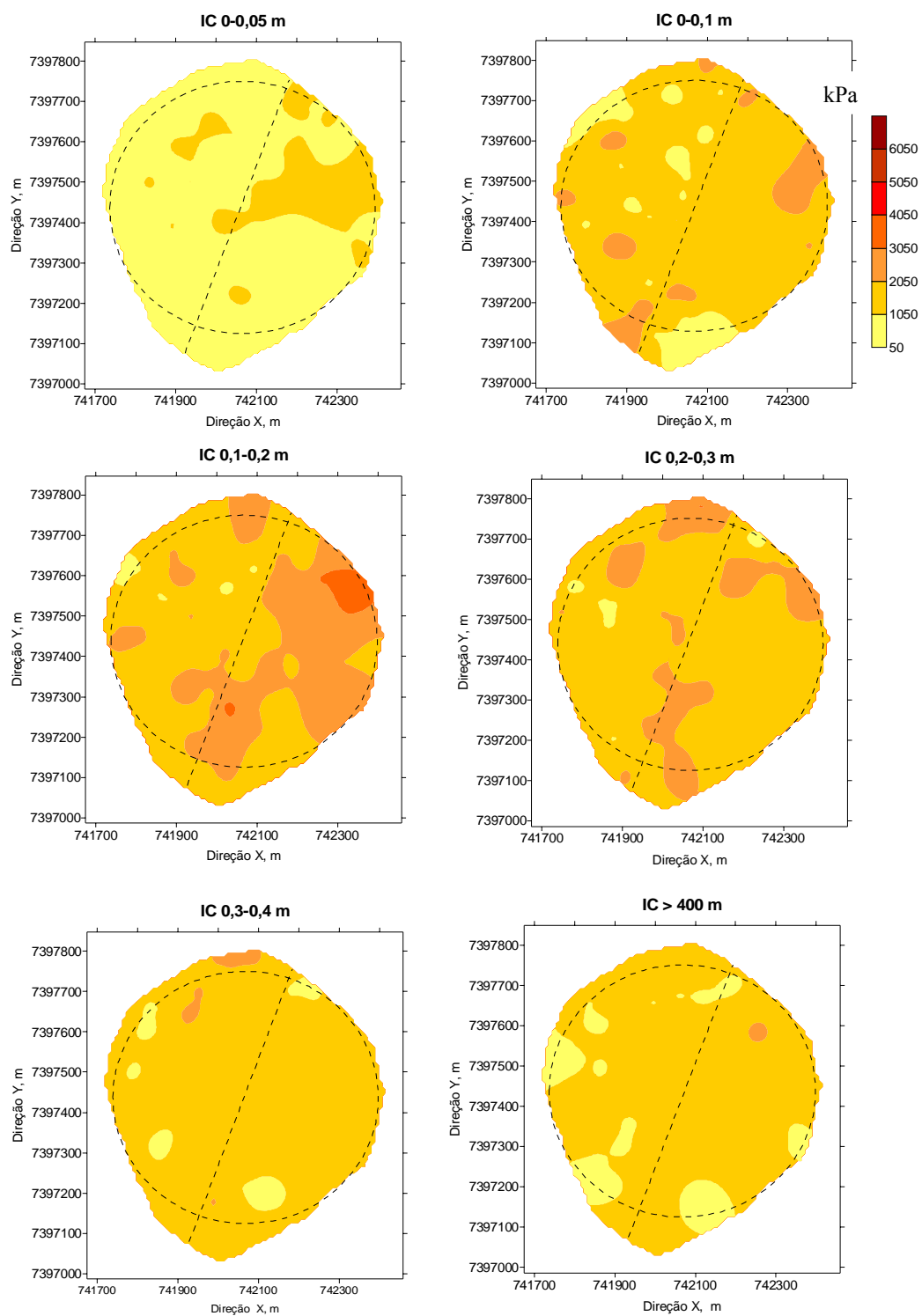


Figura 22 – Mapa de isocompactação, distribuição espacial dos valores de índice de cone (IC, kPa) em diferentes camadas de solo, sob plantio direto rotacionado (PDR) e plantio convencional (PC), área 2, Fazenda Buriti-Mirim, 2004.

Tabela 33 - Média da umidade (U , kg kg^{-1}), pressão de preconsolidação (σ_p , kPa), densidade inicial (D_{si} , Mg m^{-3}) e porosidade inicial (P_{si} , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) considerando os sistemas de manejo (PDR e PC), área 2, 2004, análise estatística pelo Teste de Tukey, a probabilidade de 5%.

Atributos	Profundidade 0-0,1 m		Profundidade CMRM	
	PC	PD	PC	PD
U	12,57 ± 2,44 a*	14,75 ± 3,20 a*	15,43 ± 4,43 a*	14,5 ± 2,14 a*
σ_p	420,43 ± 54,48 a	372,63 ± 87,64 a	255,86 ± 102,58 a	377,88 ± 124,95 a
D_{si}	1,69 ± 0,06 a	1,61 ± 0,08 b	1,70 ± 0,05 a	1,65 ± 0,10 a
P_{si}	36,64 ± 2,31 a	39,56 ± 3,01 a	36,24 ± 1,72 a	38,34 ± 3,89 a

* médias seguidas com letras iguais nas linhas não apresentam diferenças significativas entre si.

6.3.1 Índices Físicos

As propriedades físicas do solo como: densidade do solo e porosidade total das áreas foram apresentadas em mapas que mostram a sua distribuição espacial em cada área de estudo. Os resultados dessas propriedades são apresentados para a área 1, nas Figuras 23 e 24, para área 2, nas Figuras 25 e 26.

Na Figura 23 estão os mapas que apresentam a distribuição espacial dos valores de densidade inicial (D_{si}) e na pressão de preconsolidação ($D_{s\sigma_p}$), nas duas profundidades estudadas, em área cultivada sob sistema de plantio convencional (área 1). Observa-se que, para ambas as camadas, os valores de D_{si} variaram de 1,20 a 1,60 Mg m^{-3} , predominando valores de densidade entre 1,30 e 1,50 Mg m^{-3} , considerados elevados quando comparados com os valores de densidade na pressão de preconsolidação (densidade crítica), apesar deste solo ter grande contribuição de areia e silte e por se tratar de solos cultivados com culturas anuais. Na área central é notória uma mancha de solo cujos valores de densidade encontraram-se entre 1,40 a 1,50 Mg m^{-3} , evidenciando a consolidação do solo devido ao impacto do manejo (PC) em ambas as camadas, porque apresentaram valores próximos aos valores críticos, principalmente na camada superficial.

Os mapas referentes à densidade do solo na pressão de preconsolidação ($D_{s\sigma_p}$), considerada como um indicador da densidade crítica do solo, mostrou uma variação de 1,20 a 1,50 Mg m^{-3} na SP e de 1,20 a 1,80 Mg m^{-3} na CMRM. Indicando que, do ponto de vista estrutural, a densidade inicial não apresentou, teoricamente,

comprometimento do solo. Mas para a planta, em algumas áreas, principalmente para a profundidade superficial, os valores apresentaram-se próximos a valores considerados críticos. Considerando-se que na literatura para solos arenosos a densidade de $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$ é um valor crítico que limita o crescimento das raízes (VEIHMEYER E HENDRICKSON, 1948; JONES, 1983), este solo encontrava-se numa condição limite para o desenvolvimento radicular. Zimmermann & Kardos (1961) verificaram impedimento radicular da soja para solos com densidade de $1,60 \text{ Mg m}^{-3}$, reforçando que os valores encontrados para densidade se aproximaram de valores considerados críticos ao desenvolvimento radicular das culturas.

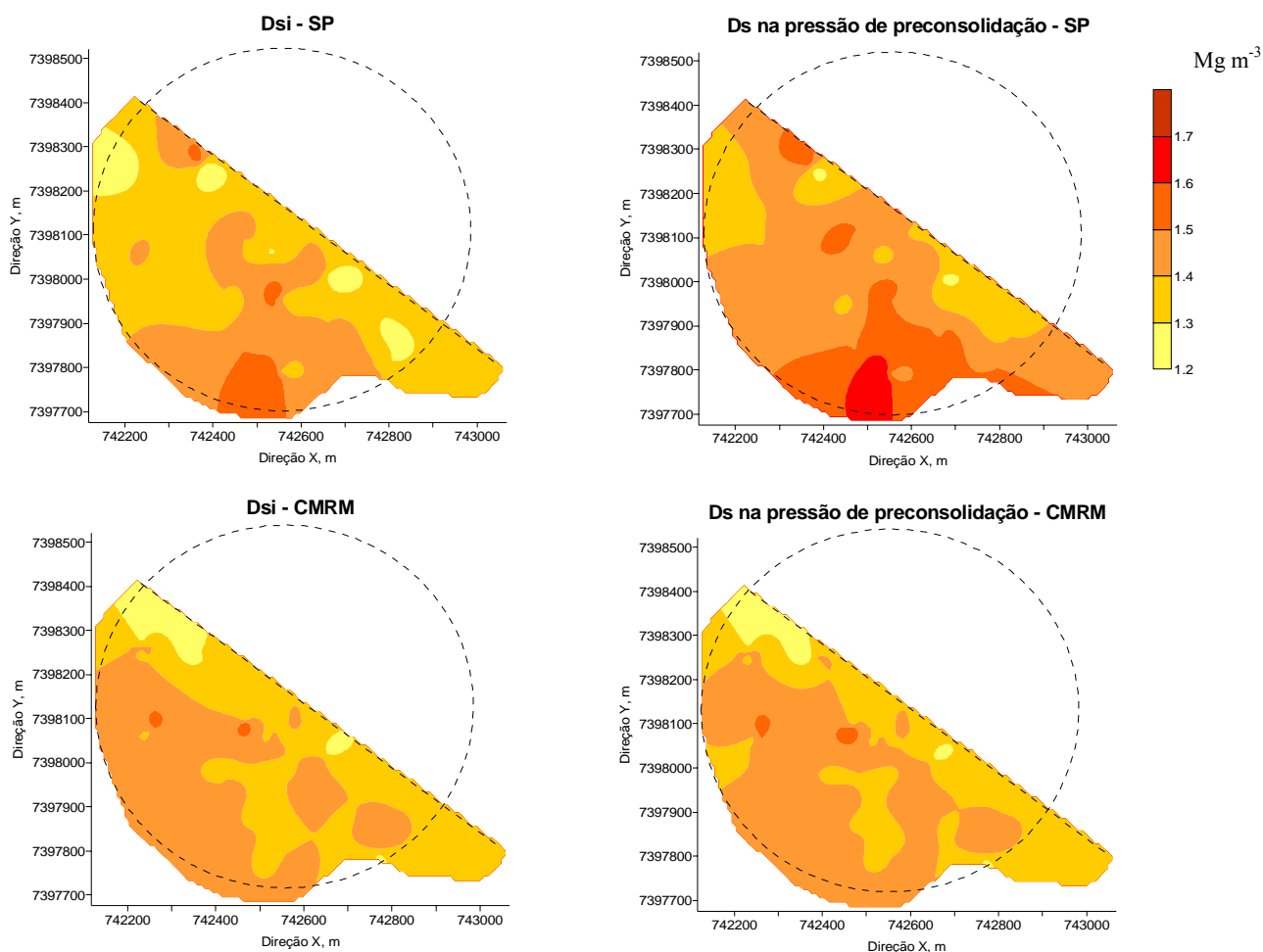


Figura 23 - Distribuição espacial dos valores de densidade do solo inicial (D_{si} , Mg m^{-3}) e na pressão de preconsolidação ($D_{s\sigma_p}$, Mg m^{-3}), nas profundidades SP e CMRM, plantio convencional, área 1, fazenda Buriti-Mirim, 2002.

Na Figura 24 estão os mapas que apresentam os valores da porosidade inicial e na pressão de preconsolidação, nas duas profundidades, observando-se que, em ambas as camadas de solo, predominaram valores da ordem de 43 a 51 % para porosidade inicial em quase toda a área.

Entretanto, após aplicação das cargas, no ensaio de compressibilidade, foram calculados os valores da porosidade na pressão de preconsolidação que não sofreram muita alteração, especificamente para profundidade CMRM.

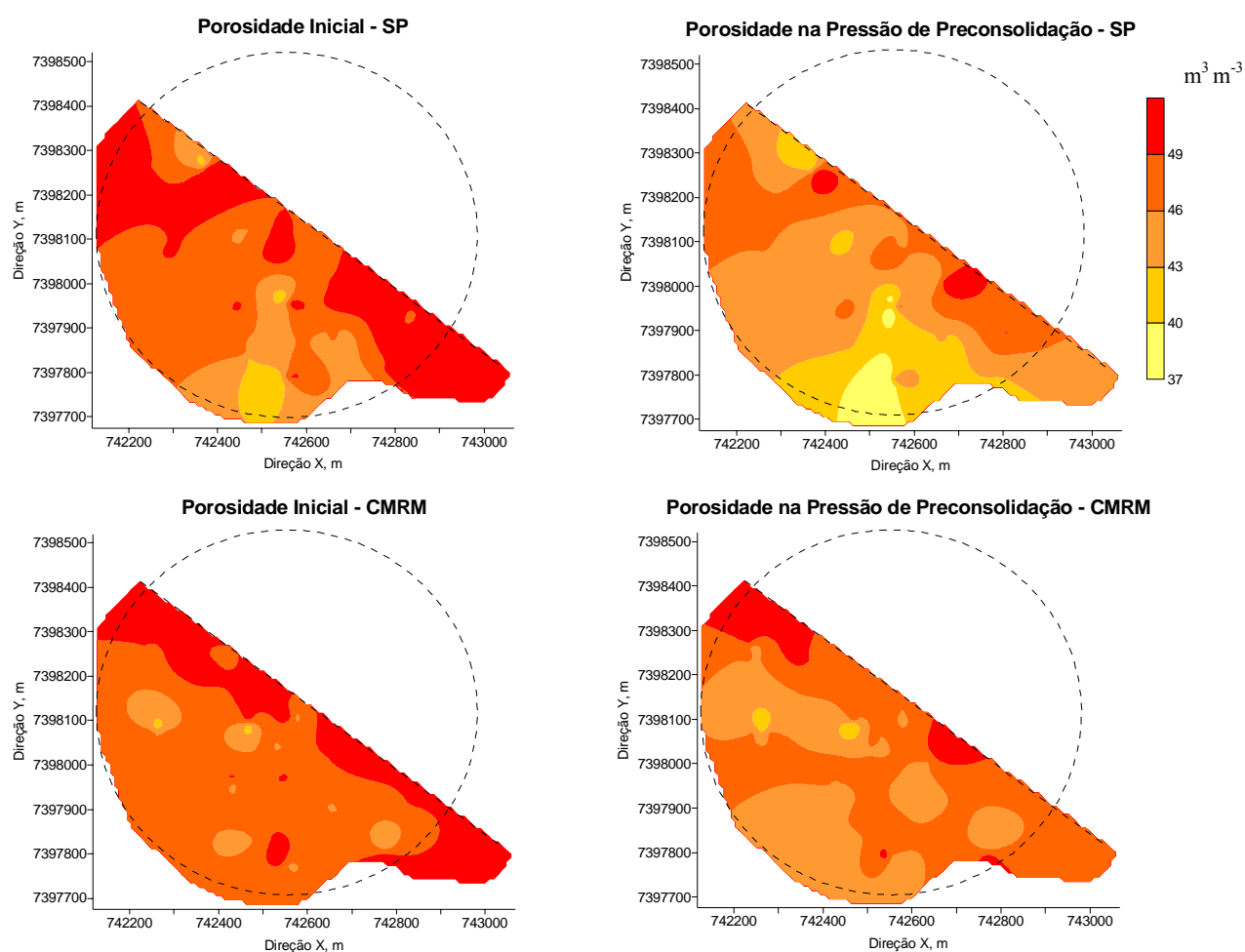


Figura 24 - Distribuição espacial dos valores de porosidade do solo inicial (P_{si} , $m^3 m^{-3}$) e da porosidade na pressão de preconsolidação ($P_{s\sigma_p}$, $m^3 m^{-3}$) nas profundidades SP e CMRM, plantio convencional, área 1, fazenda Buriti-Mirim, 2002.

Considerando-se que a porosidade na pressão de preconsolidação é um indicativo da porosidade mínima ou crítica e neste estudo está sendo sugerida como um indicativo do quanto de espaços vazios que o solo pode atingir, para que do ponto de vista estrutural, o solo não seja comprometido.

Os valores de porosidade encontraram-se próximos aos valores considerados críticos, evidenciando, assim como para D_{si} , o elevado grau de consolidação da estrutura do solo destas camadas, devido às condições de manejo.

Observando a distribuição espacial dos valores de densidade inicial, Figura 25, foi observada uma variação, onde predominaram valores da ordem de 1,50 a 1,70 $Mg\ m^{-3}$ que foram elevados, considerando que a densidade na pressão de preconsolidação (densidade crítica) atingiu uma faixa de valores de 1,70 a 1,90 $Mg\ m^{-3}$.

Considerando-se que valores de densidade de 1,75 $Mg\ m^{-3}$ foi considerado um valor crítico que limita o crescimento das raízes (VEIHMEYER E HENDRICKSON, 1948; JONES, 1983) e por se tratar de uma área onde o solo é cultivado com culturas anuais, e as amostras foram coletadas após a colheita do feijão, os resultados mostram, principalmente, quando comparados com resultados da área 1, que esta área foi mais afetada pelo manejo, solicitados pelos sucessivos ciclos de culturas.

Na Figura 26 estão os mapas que apresentam a distribuição espacial da porosidade inicial e na pressão de preconsolidação, podendo-se observar que, em ambas as camadas de solo, predominaram valores da ordem de 35 a 41 % para porosidade inicial em quase toda a área.

Após o ensaio de compressibilidade e aplicação das cargas foram calculados os valores da porosidade na pressão de preconsolidação. Esses valores foram da ordem de 29 a 35 % para ambas as camadas, entendendo-se que a porosidade na pressão de preconsolidação é um indicativo do quanto de espaços vazios o solo pode atingir sem que a sua estrutura seja comprometida de forma irremediável (porosidade crítica). Esses valores indicaram que a porosidade está próxima de seu limite, evidenciando assim como para D_{si} , o grau de consolidação da estrutura do solo destas camadas, devido às condições de manejo do solo.

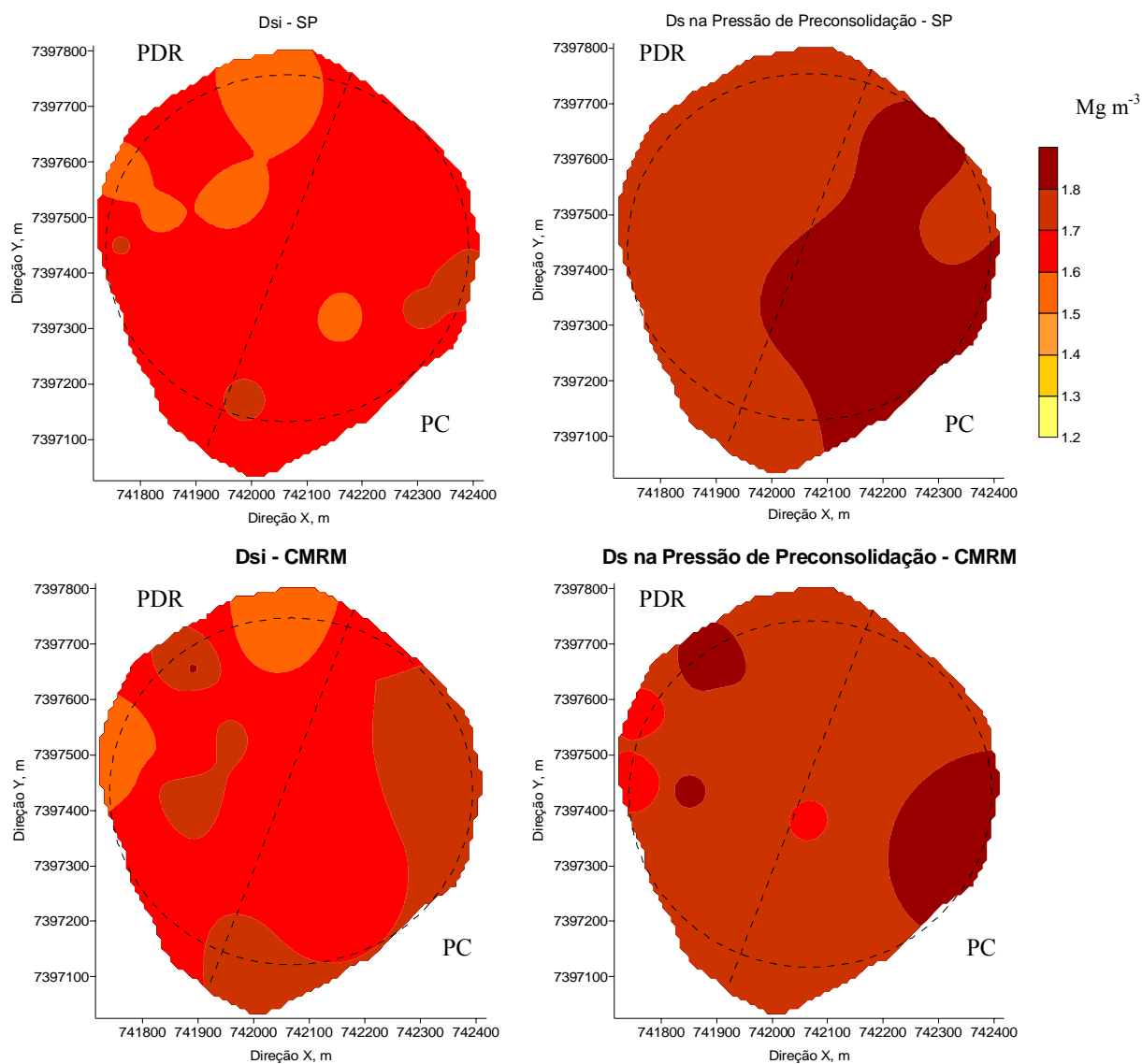


Figura 25 - Distribuição espacial dos valores de densidade (Mg m^{-3}) do solo inicial (Dsi) e na pressão de preconsolidação ($Ds\sigma_p$), sob plantio direto (à esquerda) e plantio convencional (à direita), do Pivô 5 da Fazenda Buriti-Mirim.

A área 2 foi dividida em duas partes iguais onde foram realizados tratamentos diferentes de condução das culturas, a área da esquerda foi cultivada sob plantio direto rotacionado (PDR) e a área da direita foi cultivada sob plantio convencional (PC).

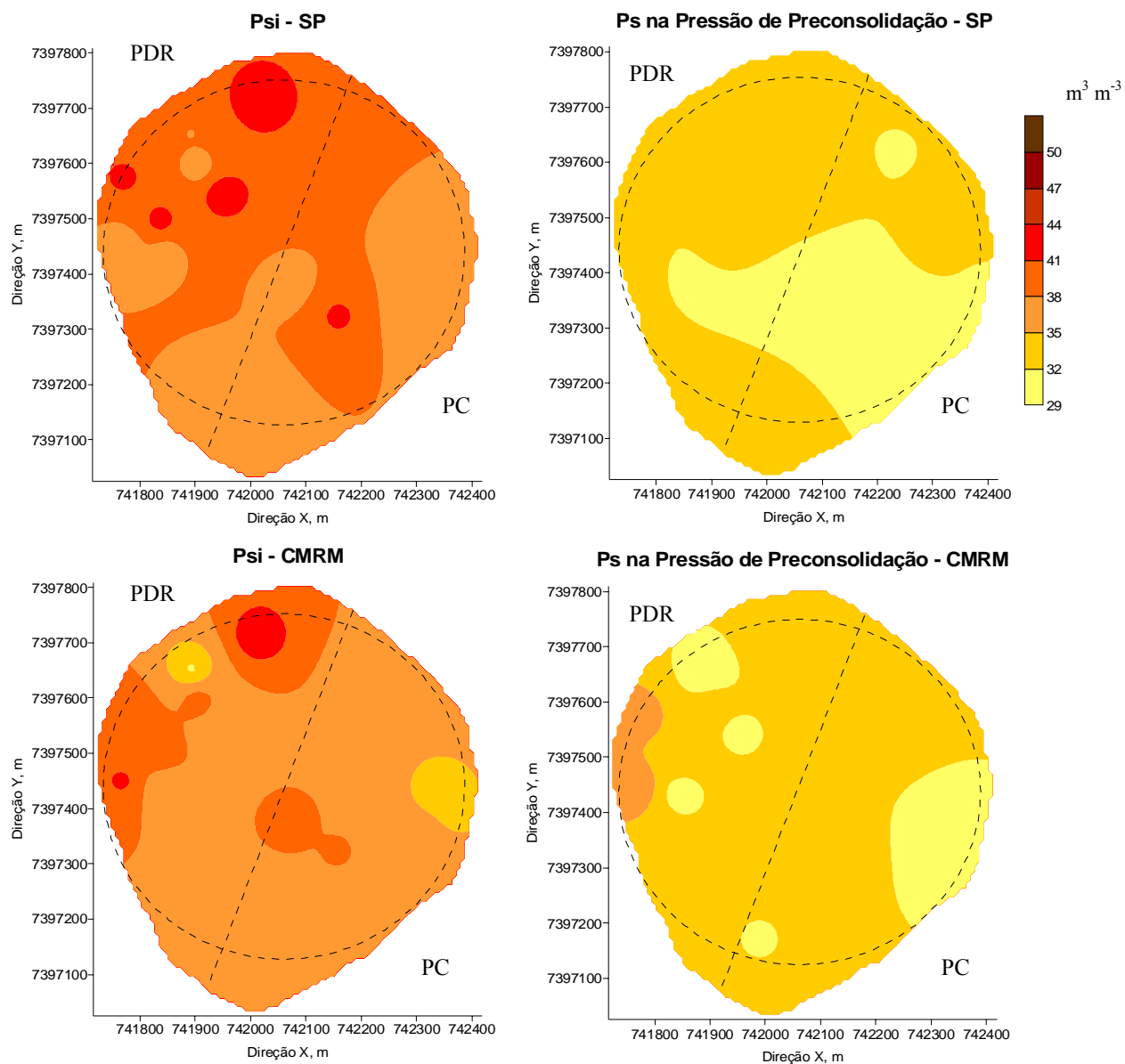


Figura 26 - Distribuição espacial dos valores de porosidade do solo inicial (Ψ_i , $m^3 m^{-3}$) e na pressão de preconsolidação (P_s , $m^3 m^{-3}$), sob plantio direto (à esquerda) e plantio convencional (à direita), da área 2 da Fazenda Buriti-Mirim.

Comparando os dois tratamentos puderam-se observar maiores valores de densidade para o tratamento convencional, quando comparado ao plantio direto rotacionado nas duas camadas (superficial e subsuperficial). Estes resultados corroboram com Aase & Pikul (1994) que encontraram, para solos cultivados sob plantio direto, valores de densidade

menores quando comparados com solos cultivados sob plantio convencional. Ruiz (2003) trabalhando com solos de textura argilosa encontrou resultados contrários.

Assim como para densidade do solo, também foi comparada a porosidade na área 2 para os dois tipos de tratamentos de condução das culturas: cultivo sob plantio direto rotacionado (Figura 26, PDR), cultivada sob plantio convencional (Figura 26, PC). Comparando os dois tratamentos puderam-se observar menores valores de porosidade para o tratamento convencional (PC), quando comparado ao plantio direto rotacionado (PDR) nas duas camadas (superficial e subsuperficial).

A análise estatística de comparação dos dados médios de densidade e porosidade iniciais (Tabela 34) indicaram diferenças significativas para os valores de densidade na camada superficial, sendo que na CMRM as diferenças, também, não foram significativas, já para os valores de porosidade as diferenças não foram significativas nas duas profundidades.

Tabela 34 - Média da densidade do solo inicial (D_{si} , $Mg\ m^{-3}$) e da porosidade inicial (P_{si} , $m^3\ m^{-3}$) considerando os sistemas de manejo (PD e PC), Área 2, 2004, análise estatística pelo Teste de Tukey, a probabilidade de 5 %.

Atributos	Profundidade 0-0,1 m		Profundidade CMRM	
	PC	PD	PC	PD
D_{si}	1,69 ± 0,06 a*	1,61 ± 0,08 b	1,70 ± 0,05 a	1,65 ± 0,10 a
P_{si}	36,64 ± 2,31 a	39,56 ± 3,01 a	36,24 ± 1,72 a	38,34 ± 3,89 a

* médias seguidas com letras iguais nas linhas não apresentam diferenças significativas entre si.

Estudos feitos por Silva et al. (2006) concluíram que a densidade e a porosidade total não foram influenciadas pelo sistema de manejo. Para Cruz et al (2003) estudando um argissolo sob sistemas de PD e PC encontraram maiores valores de densidade para o PD na camada superficial e maiores valores de porosidade total para o PC, isto porque no PC o revolvimento do solo rompe os agregados, compacta o solo abaixo da camada preparada e deixa o solo descoberto. Já no PD há pequena mobilização do solo, porém consolida a camada superficial.

Albuquerque et al. (1995) estudando um Latossolo Vermelho e Costa (2001) estudando um Latossolo Bruno observaram aumento da densidade no PD quando

comparado ao PC. Isto indica que a influência da composição granulométrica e mineralogia dependem do tipo de solo no processo de compactação.

O solo desta área 2 apresentou-se mais suscetível à compactação que o solo da área 1 e a explicação para este fato esta relaciona a textura, ou seja, uma maior contribuição de argila, menores teores de matéria orgânica, assim como, um menor diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados. As informações indicam que o tipo, a intensidade do tráfego e o teor de água merecem atenção especial no momento da mecanização.

6.3.3 Pressão de Preconsolidação do solo

Os mapas da Figura 27 permitem visualizar a distribuição da capacidade de suporte de carga do solo da área para umidades de amostragem que variaram de 8 a 16 %. Observou-se que na SP predominaram valores da ordem de 200 a 300 kPa e em pequenas áreas, atingiram valores da ordem de 400 kPa. Entretanto, na CMRM, em quase toda a área, os valores ficaram em torno de 300 a 400 kPa, com pequenas áreas apresentando valores entre 400 a 500 kPa.

Do mapa foi possível verificar a variabilidade espacial da σ_p , nas duas profundidades, mostrando que em alguns trechos a camada superficial apresentou-se mais consolidada do que a CMRM. Porém é na CMRM que grande parte da área apresentou-se mais consolidada (Figura 27). Assim como aconteceu com os resultados de resistência à penetração, aqui, também, ficou evidenciado que a profundidade média de trabalho é a mais afetada pelo efeito da compactação, no plantio convencional.

As informações fornecidas pelos mapas de pressão de preconsolidação permitiram definir a profundidade que deve ser mecanizada quando o objetivo for romper a resistência mecânica do solo, prever as áreas que solicitarão maior potência do conjunto mecanizado e, portanto, um maior consumo energético. Com base nessas informações podem-se fazer escolhas quanto ao tipo de operação (aração ou subsolagem) e ter uma perspectiva de maior acerto, tanto do ponto de vista da estrutura do solo, quanto do racionamento energético.

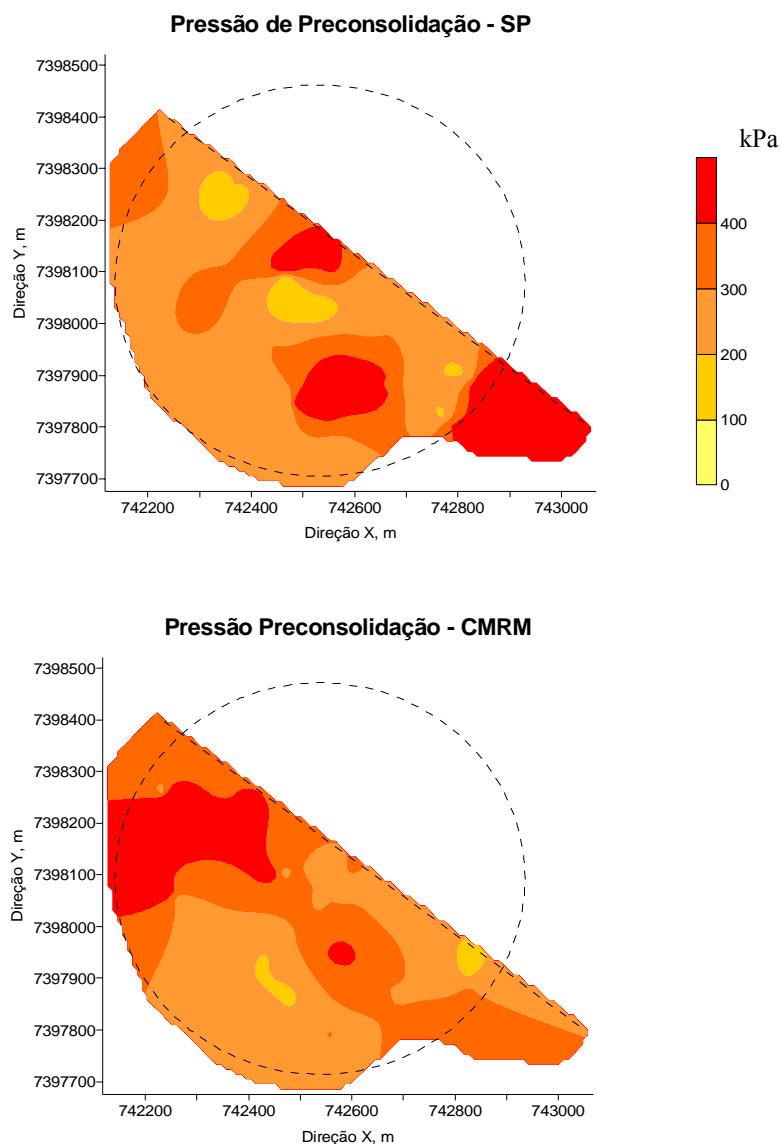


Figura 27 - Distribuição espacial dos valores de pressão de preconsolidação (σ_p , kPa), nas profundidades SP e CMRM, plantio convencional, área 1, fazenda Buriti-Mirim, 2002.

Os mapas da Figura 28 mostram a distribuição espacial do teor de água no solo na época da amostragem (1º semestre de 2002), considerada uma propriedade importante do solo, pois quando todos os outros atributos mantêm-se constantes é ela quem determina a magnitude das deformações quando uma carga é aplicada (LARSON & GUPTA, 1980; LARSON et al,1980; O'SULIVAN,1992; SILVA, 2002; SILVA & LANÇAS, 2005).

Para esta área o solo apresentou umidades baixas por se tratar de um solo de textura arenosa com contribuição de silte e argila. O teor de água no solo, de maneira geral, foi praticamente invariável entre as duas profundidades, observando-se um teor médio de 9 % e em alguns pontos atingindo valores de 11 a 13 %, na CMRM.

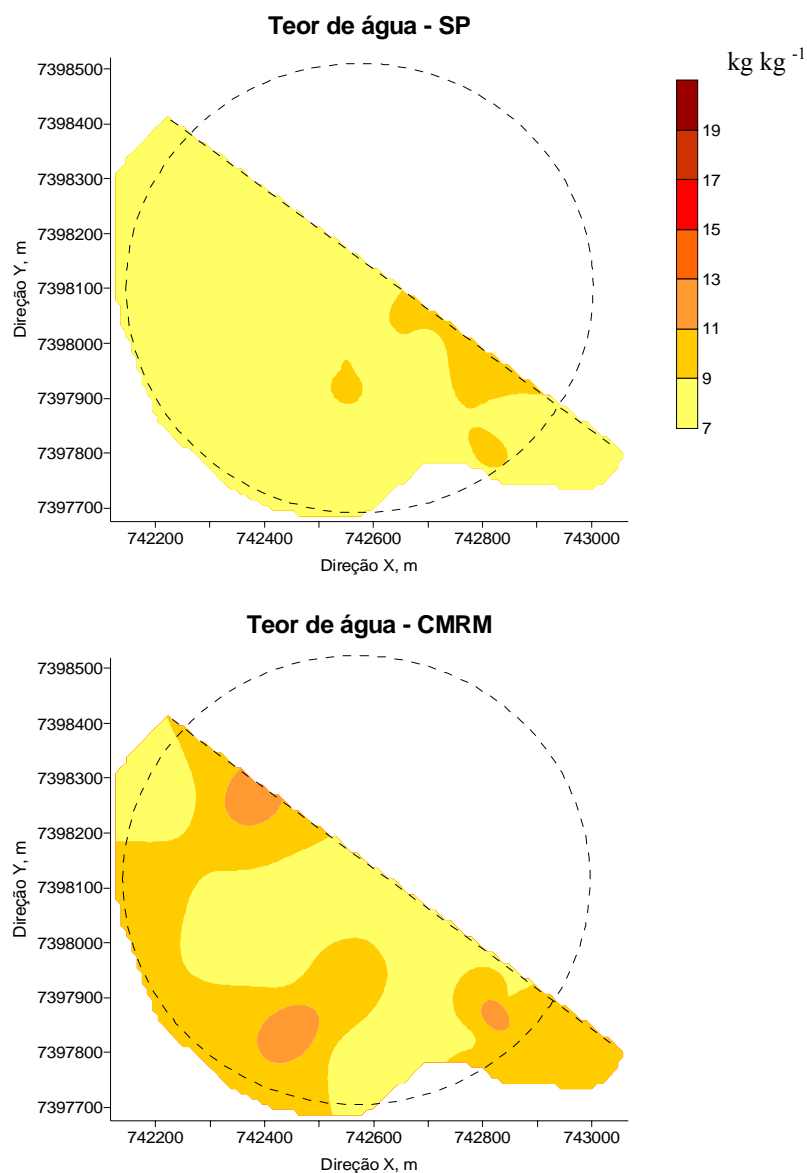


Figura 28 - Distribuição espacial dos valores do teor de água (U , kg kg^{-1}) no solo, nas profundidades SP e CMRM, plantio convencional, área 1, fazenda Buriti-Mirim, 2002.

As informações contidas nestes mapas podem servir para orientar o momento do tráfego, pois podem indicar as regiões de maior suscetibilidade do solo à compactação ou de maior capacidade de suporte. Quando se comparam os mapas de umidade (Figura 28) e pressão de preconsolidação (Figura 27) de algumas regiões da camada SP, percebe-se que houve relação inversa entre estas duas propriedades, que, também, foi descrita pelo modelo de compressibilidade.

Avaliando-se os mapas de distribuição espacial da pressão de preconsolidação (σ_p) da área 2 (Figura 29), para as duas camadas ficou claro e confirmado o impacto do manejo sobre a estrutura da camada SP (0-0,2 m), corroborando com os resultados de resistência à penetração que indicam a camada mais consolidada próxima a superfície (0,1-0,2 m).

Os valores da pressão de preconsolidação (σ_p) variam em torno de 300 a 400 kPa em quase toda a totalidade da área na camada SP e já para CMRM a área esteve repartida em três regiões distintas, mas predominam os valores da ordem de 100 a 300 kPa.

Na Figura 30 tem-se o mapa da distribuição espacial do teor de água no solo que pode ser uma ferramenta para auxiliar a tomada de decisões. Aliada ao conhecimento da pressão de preconsolidação pode-se ter a idéia do teor de água adequado para o tráfego. Portanto, definir o teor de água adequado para o tráfego e, ou preparo, assim como qual máquina ou trator poderia ser mais apropriado a determinadas regiões de sua propriedade, constituem alternativas que garantem maiores possibilidades de conservar a estrutura dos solos.

Comparando-se os dois tipos de tratamentos de condução das culturas: cultivo sob plantio direto rotacionado (PDR), cultivada sob plantio convencional (PC) pôde-se observar que, para o plantio convencional, provocou maiores valores de pressão de preconsolidação na camada superficial (0-0,1 m), havendo inversão para a CMRM, porém fazendo-se a análise estatística das médias dos dados (Tabela 35), obteve-se diferenças estatísticas não significativas.

Com o conhecimento da área que estes mapas podem fornecer, mais as informações relativas às pressões de contato dos tratores e máquinas agrícolas, pode-se ter

orientação dos equipamentos que podem trafejar na área de maneira a não causar compactação adicional do solo.

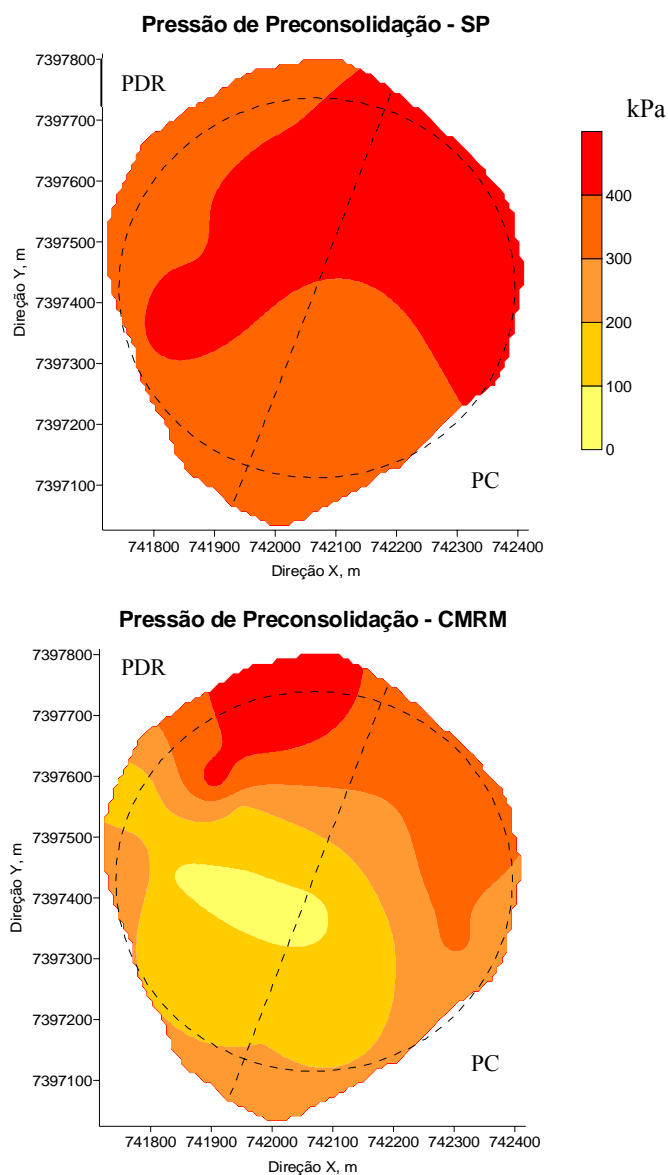


Figura 29 - Distribuição espacial dos valores de pressão de preconsolidação (σ_p , kPa), sob plantio direto rotacionado (PDR) e plantio convencional (PC), área 2 da Fazenda Buriti-Mirim.

Tabela 35 - Média da umidade (U , kg kg^{-1}), pressão de preconsolidação (σ_p , kPa), comparando os sistemas de manejo (PD e PC), área 2, 2004, análise estatística pelo Teste de Tukey, a probabilidade de 5 %.

Atributos	Profundidade 0-10 cm		Profundidade CMRM	
	PC	PD	PC	PD
U	$12,57 \pm 2,44$ a	$14,75 \pm 3,20$ a*	$15,43 \pm 4,43$ a	$14,5 \pm 2,14$ a
σ_p	$420,43 \pm 54,48$ a	$372,63 \pm 87,64$ a	$255,86 \pm 102,58$ a	$377,88 \pm 124,95$ a

- médias seguidas com letras iguais nas linhas não apresentam diferenças significativas entre si.

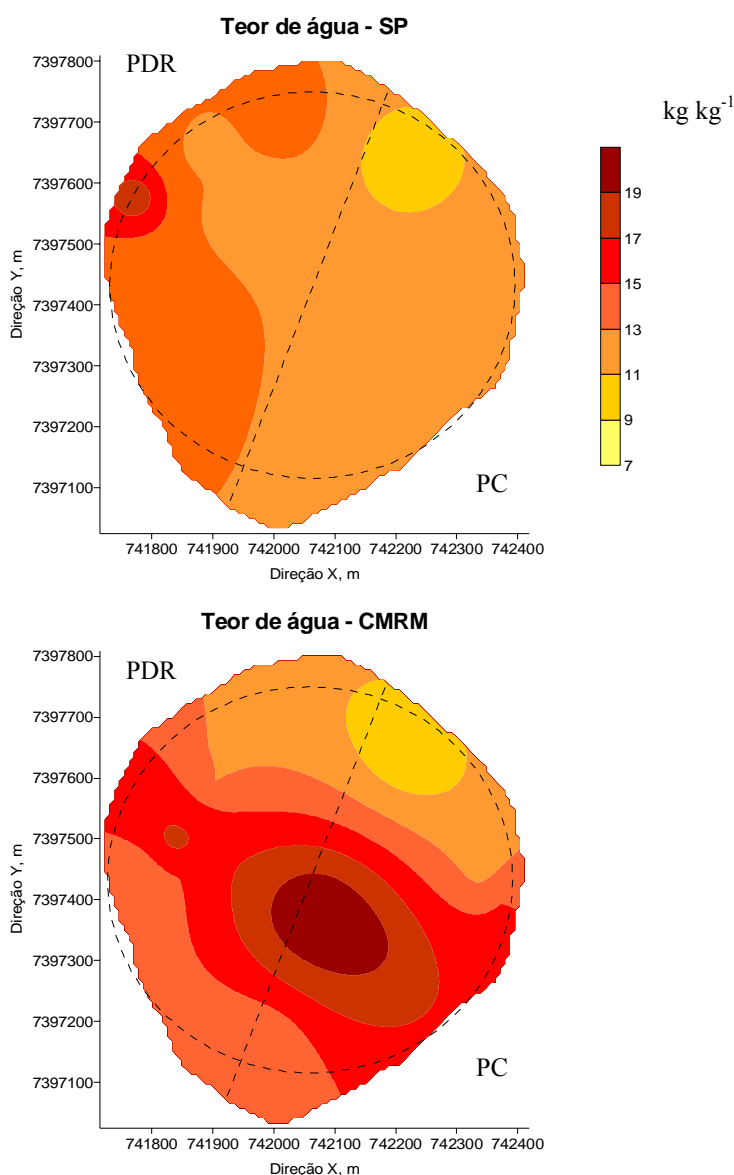


Figura 30 - Distribuição espacial dos valores do teor de água no solo (kg kg^{-1}), sob plantio direto (à esquerda) e plantio convencional (à direita), área 2, Fazenda Buriti-Mirim.

Comparando-se os sistemas de cultivo (PDR e PC) observou-se que o plantio direto rotacionado apresentou maiores valores de teor de água na camada superficial, o que se justificaria devido ao fato da maior quantidade de restos culturais na superfície do solo. Castro (1989) explicou que a maior capacidade de retenção de água aliada à menor perda de água por evaporação, fez com que o sistema de plantio direto apresentasse mais água disponível as plantas do que o sistema convencional. Embora os dados apresentem diferenças nos valores de umidade, estas diferenças não foram significativas, estatisticamente (Tabela 35).

6.4 Elaboração de Modelo de Capacidade de Suporte de Carga do Solo (CSCS) e Pressão de Contato

A avaliação da estrutura do solo foi feita pelo modelo de CSCS proposto por Dias Junior (1994), obtido graficamente por meio da relação exponencial entre a pressão de preconsolidação e a umidade do solo que é ajustada ao modelo $\sigma_p = 10^{(a+bU)}$ (eq. 1) (Figuras 31 e 32), correspondendo aos solos das áreas 1 e 2, respectivamente. As mesmas apresentaram o comportamento das curvas ($U \times \sigma_p$) e as equações obtidas para as duas camadas de solo consideradas, SP e CMRM.

Para a área 1 pôde se observar no modelo de capacidade de suporte de carga (Figura 31) que a CMRM apresentou-se mais consolidada. A exemplo das propriedades já mencionadas anteriormente, densidade do solo e porosidade. A pressão de preconsolidação também confirmou o impacto do manejo e a rotação de culturas sobre a estrutura do subsolo desta área. Observou-se que a pressão de preconsolidação diminuiu à medida que o teor de água aumentou. Resultados semelhantes foram encontrados por Silva et al. (2003), Silva et al. (2004) e Miranda (2006). Portanto, em áreas irrigadas, deve-se ter muito cuidado com o tráfego, principalmente, depois dos turnos de irrigação.

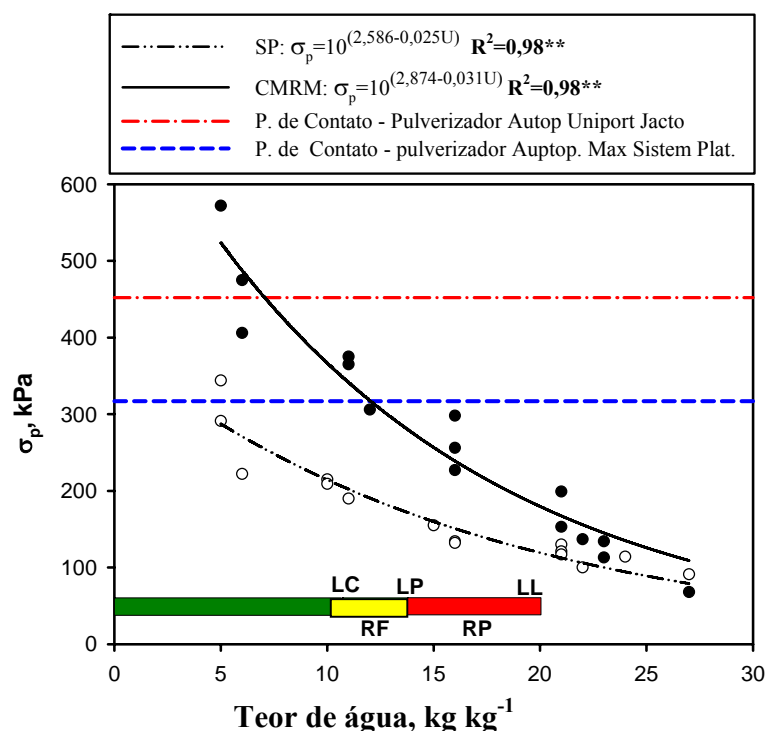


Figura 31 - Modelo de capacidade de suporte de carga para duas camadas de solo com seus respectivos limites e estados de consistência do solo, área 1.

Análise estatística de comparação das equações obtidas para profundidades SP e CMRM (Tabela 36) mostraram que não houve diferenças significativas para os parâmetros a e b das equações definidas para a área 1, já para área 2 os parâmetros das equações diferiram estatisticamente, denotando que a estrutura deste solo responde aos manejos adotados (preparo do solo, tráfego, tempo de cultivo) de maneira diferenciada tanto no perfil como espacialmente.

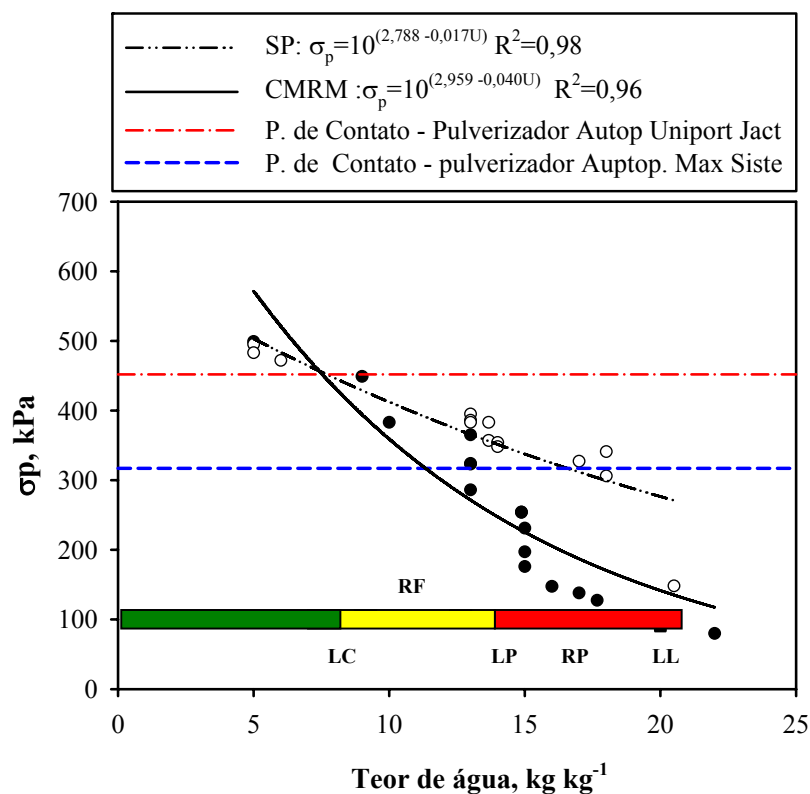


Figura 32 – Modelos de capacidade de suporte de carga para duas camadas de solo. Linhas de referências indicam a pressão de contato dos rodados de dois pulverizadores, área 2.

Tabela 36 – Análise Estatística de comparação das equações do modelo de CSCS ($\sigma_p = 10^{(a+bU)}$) pelo teste de Snedecor & Cochran (1989).

	Profundidade (m)	Parâmetros do modelo CSCS			Teste Snedecor&Cochran
		A	b	R ²	
Área 1	SP (0-0,1)	2,586	-0,025	0,98	Ns
	CMRM	2,874	-0,031	0,98	
Área 2	SP (0-0,1)	2,788	-0,017	0,98	**
	CMRM	2,959	-0,040	0,96	

** significativo a 1% de probabilidade, ns - não significativo.

Esta diferença nas áreas pode ser explicada pela variabilidade espacial das propriedades do solo que diferiram em camadas e horizontes, influenciando a estrutura do solo. As diferenças podem ocorrer pelas próprias técnicas de manejo, como exemplo, regulagem inadequada de equipamento, tráfego com teores de água inadequados ou ainda solos que se encontre com sua estrutura depauperada.

A vantagem do uso dos modelos de capacidade de suporte de carga foi permitir prever o quanto de carga o solo pode suportar em função da umidade em que se encontra e mostrou em qual profundidade o solo se encontrava mais compactado.

Na Tabela 37 estão apresentados os valores de pressão de contato que foram transferidos ao solo pelo parque de máquinas utilizado nas áreas da fazenda Buriti-Mirim.

Tabela 37 - Valores de pressão de contato pneu/solo, corrigidos segundo a proposição de Silva et al. (2003), exercida no solo por parte das máquinas e equipamentos agrícolas das utilizados na fazenda Buriti-Mirim.

Máquina/ Equipamento	Pressão de Contato Pneu/solo	
	Frontal (kPa)	Traseiro (kPa)
Trator Massey Ferguson 275 4x2 TDA	253	271
Trator John Deere 7500 4x2 TDA	194	216
Pulverizador Autop. Max Sistem Plat.290 4x2 toda	318	332
Pulverizador Autop. UNIPORT Jacto 4x2	405	452
Colhedora Cereais John Deere 1175 4x2	362	282

Considerando as pressões de contato aplicadas por dois pulverizadores (Autopropelido Uniport Jacto – 452 kPa e Autopropelido Max Sistem Plat – 332 kPa) que são dois dos equipamentos utilizados nestas áreas, pode-se prever que ambos equipamentos comprometeriam a estrutura do solo para área 1, pois na profundidade de SP o solo apresenta-se com valores de capacidade de suporte de carga (CSCS) menor do que na profundidade de CMRM (Figura 31). Portanto, o dimensionamento do equipamento ou do conjunto mecanizado nesta área deverá levar em conta as informações da camada SP.

A CSCS elevada reflete o histórico de manejo desta área, em especial, às elevadas pressões de contato aplicadas pelos diferentes maquinários, podendo-se diagnosticar a presença de camadas compactadas ou denunciar a falta de eficiência de operações, como um simples cultivo ou até mesmo de uma subsolagem.

Para a área 2, quanto aos modelos de capacidade de suporte de carga (Figura 32), observou-se, como para a área 1, para ambas as camadas, redução da pressão de preconsoidação em função do aumento do teor de água no solo. Portanto o modelo indicou o quanto de carga o solo pode suportar para determinados valores de teor de água, a suscetibilidade do solo à compactação acontece quando forem trafegados com tratores ou máquinas que apliquem pressões maiores que a resistência interna do solo.

Na Figura 32, área 2, foi representada as pressões de contato que podem ser aplicadas ao solo, por dois pulverizadores utilizados na área de estudo. Assim sendo, na condição de se utilizar o pulverizador Autopropelido Uniport Jacto (pressão de contato = 452 kPa), o teor de água no solo não deve ultrapassar o valor de 7,6 %, para evitar que a compactação adicional afete a estrutura atual do solo, isto para ambas as camadas avaliadas (SP e CMRM). Para teor de água maior, a pressão que os rodados do pulverizador exercem no solo é maior do que a capacidade de carga que o solo pode suportar. Agora se a opção for utilizar o pulverizador Autopropelido Max Sistem Plat. 290 (pressão de contato = 332), a estrutura da CMRM será afetada para teores de água superiores a 10,9 % e para camada SP só será afetada pelo tráfego se o teor de água no solo for acima de 15,7 %, portanto para esta área, é a CMRM que deve ser levada em consideração quando da decisão da entrada dos equipamentos e esta analogia foi feita para todo o conjunto mecanizado e esta apresentada na Tabela 38.

Para a área 2, observou-se que a camada SP apresentou maior capacidade de suporte de carga do que a CMRM (diferente do que ocorre na área 1), dando indicação do quanto à camada SP está compactada.

A elevada capacidade de suporte de carga do solo, observada nas duas áreas, foi devido ao histórico de manejo e a rotação de culturas a que estiveram sujeitas estas áreas. A amostragem em ambas as áreas foram feitas depois da colheita, de maneira que o histórico de tensão do solo foi identificado nos modelos (Figuras 30 e 31). Porém, no momento em que estas áreas são preparadas com o uso de arado, grades e escarificadores, as

tensões são aliviadas, a resistência mecânica do solo é modificada, alcançando valores menores e, por conseguinte, a capacidade de suporte de carga diminui.

Tabela 38 – Valores de Teor de água do solo para o tráfego de máquinas de maneira a garantir a CSCS (U , kg kg^{-1})

	PCmáx. (kPa)	Área 1		Área 2	
		SP	CMRM	SP	CMRM
Trator Massey Ferguson 275 4x2 TDA	271 (traseiro)	6,1	14,2	20,9	13,2
Trator John Deere 7500 4x2 TDA	216 (traseiro)	10,1	17,4	26,7	15,6
Pulverizador Autop. Max Sistem Plat.290 4x2 TDA	332 (traseiro)	Compromete	11,4	15,7	10,9
Pulverizador Autop. UNIPORT Jacto 4x2	452 (traseiro)	Compromete	7,0	7,8	7,6
Colhedora Cereal John Deere 1175 4x2	362 (frontal)	Compromete	10,2	13,5	10,0

Os carregamentos empregados durante a colheita e os preparos exaustivos solicitados no cultivo podem reduzir drasticamente a vida agrícola de um solo como este, se medidas preventivas não forem adotadas sistematicamente.

7 CONCLUSÕES

Dos estudos realizados nas áreas da fazenda Buriti-Mirim concluiu-se que:

O tipo de cultivo (PC e PDR) influenciou o comportamento compressivo do solo, apresentando as camadas compactadas na profundidade média de trabalho. A rotação de culturas, após um período de 2 anos, não foi capaz de produzir reduções significativas nos valores de resistência do solo à penetração para minimizar os efeitos da compactação.

Os mapas da variabilidade espacial das propriedades do solo foram importantes ferramentas para localização de áreas que estavam estruturalmente comprometidas, sendo possível com estas informações definir melhor as operações mecanizadas com a finalidade de descompactar camadas compactadas de solo.

Os modelos de capacidade de suporte do solo predizem satisfatoriamente o comportamento da resistência do solo em função da umidade, permitindo identificar a camada de maior resistência mecânica, ou seja, mais afetada pelo sistema de cultivo do solo.

8. REVISÃO BIBLIOGRÁFICAS

AASE, J. K. ; PIKUL, J. L. Compaction and bearing strength. In MODELNHAUER, W. C.; BLACK, A. L. **Crop residue management to reduce erosion and improve soil quality in Northern Great Plains**. Washington: USDA, 1994. p.34-35.

ALBUQUERQUE, J. A.; REINERT, D. J.; FIORIN, J. E. ; RUEDELL, J.; PETRERE, C. ; FONTINELLI, F. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo : efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. **R. Bras. Ci. Solo**, v.19, p.115-119, 1995.

ALBUQUERQUE, J. A.; REINERT, D. J.; FIORIN, J. E. Variabilidade de solo e planta em Podzólico Vermelho-Amarelo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 20, p.151-157, 1996.

ALBUQUERQUE, J. A.; ARGENTON, J. ; BAYER, C. ; WILDNER, L. P. ; KUNTZE, M. A. G. Relação de atributos do solo com a agregação de um Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de verão para cobertura do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 29, p. 415-424, 2005.

ALLISON, F. E. **Soil organic matter and its role in crop production**. Amsterdam, Elsevier, 1973. p.215-345.

ALVARENGA, R. C.; FERNANDES, B.; SILVA, T. C. A.; RESENDE, M. Estabilidade de agregados de um Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo e de manejo da palhada de milho. **R. Bras. Ci. Solo**, v.10, p.273-277, 1986.

AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; ELTZ, F. L. F.; BRUM, A. C. R. Potencial de culturas de coberturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **R. Bras. Ci. Solo**, v.25, p.189-197, 2001

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

ATTERBERG, A. **Über die physikalische bodenuntersuchung und über die plastizität der tone**, Inst. Mitt for Bodenkunde, v.1, 1911.

BAILEY, A. C.; JOHNSON, C. E.; SCHAFER, R. L. A model for agricultural soil compaction. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.46, n.3-4, p.257-262, 1986.

BAIZE, D.; JABIOL, B. **Guide por la description des sols**. INRA Editions, 375p., 1995.

BALASTREIRE, L.A. **Máquinas Agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 310p.

BARATA, F. E. **Propriedade mecânica dos solos: uma introdução ao projeto de fundações**. Rio de Janeiro: LTC, Livros Técnicos e Científicos Ed. S.A., 1984.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T. J. C.; MARTIN-NETO, L.; FERNANDES, S. V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil Till. Res.**, v.54, p.101-109, 2000.

BERTOL, I.; BEUTLER, J.F.; LEITE, D.; BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Sci. Agric.**, v. 58, p. 555-560, 2001.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL, A. J.; ZOLDAN JUNIOR. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.28, p.155-163, 2004.

BETTERIDGE, K.; MACKAY, A. D.; SHEPHERD T. G.; BARKER, D. J.; BUDDING, P. J.; DEVANTIER, B. P.; COSTALL, D. A. Effect of cattle and sheep treading on surface configuration of a sedimentary hill soil. **Australian Journal of Soil Research**, v.37, p.743-760, 1999.

BEUTLER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; PEREIRA FILHO, I. A.; CRUZ, J. C. Agregação de Latossolo Vermelho distrófico típico relacionado com o manejo na região dos cerrados no estado de Minas Gerais. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 25, p. 129-136, 2001.

BLASZKIEWICS, Z. A method for the determination of the contact area between a tyre and the ground. **J. Terramechanics**, v.27, n.4, p.263-282, 1990.

BORGES, J. R.; Resistência à penetração de um Gleissolo submetido a sistemas de cultivo e culturas. **R. Bras. Agrocência**, v.10, n.1, p.83-86, 2004.

BURGUER, N.; LEBERT, M.; HORN, R. Prediction of the compressibility of arable land. **Catena suppl.**, v.11, p.141-151, 1988.

CAMPOS, H. **Estatística experimental não-paramétrica**. Piracicaba: ESALQ, 4 ed. Departamento de Matemática e Estatística, 1983.

CAMARGO, O. A. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas**. Campinas, Fundação Cargil, 1983, 44p.

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. **Soil Sci. Soc. Am. j.**, v.58, p.1501-1511, 1994.

CAMPBELL, D. J.; O'SULLIVAN, M. F. The cone penetrometer in relation to trafficability, compaction and tillage. In: **Soil analysis: physical methods**, eds. SMITH, K. A.; MULLINS, DEKER C. E. M., New York, p. 399-429, 1991.

CANARACHE, A.; HORN, R.; COLIBAS, I. Compressibility os soils in a long term field experiment with intensive deep ripping in Romania. **Soil and Tillage Research**, v.56, n.3-4, p.185-196, 2000.

CARTER, M. R.; GREGORICH, E. G.; ANDERSON, D. W.; DORAN, J. W.; JANZEN, H. H.; PIERCE, F. J. Concepts of soil quality and their significance. In: GREGORICH, E. G.; CARTER, M. R. (Ed.) **Soil quality for crop production and ecosystem health**. Amsterdam: Elsevier Science, 1997. p.1-19.

CARVALHO, T. M. **Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho-Amarelo através da Geoestatística**. Lavras, 1991, 84p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Lavras, 1991.

CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E.Y.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.27, n.4, p.695-703, 2003.

CASAGRANDE, A. The determination of the precompression stress and its practical significance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANIC AND FOUNDATION ENGINEERING. Cambrige, 1936. **Proceedings**. Cambrige: MA Harvard University, 1936. p.60-64.

CASTRO, O. M. **Preparo do solo para a cultura do milho**. Campinas: Fundação Cargil (Série Técnica 3), 41p., 1989.

CASTRO FILHO, C.; LOURENÇO, A.; GUIMARÃES, M. F.; FONSECA, I. C. B. Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Paraná, Brazil. **Soil Tillage Research**, v.65, p.45-51, 2002.

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, 2001, 155p. Tese (doutoramento em Agronomia, área de concentração em Energia na agricultura) Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Paulista, 2001.

CAVALCANTE, E. G. S. **Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes condições de uso e manejo.** Ilha Solteira, 1999, 199p. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual Paulista de São Paulo, 1999.

CENTURION, J.F., DEMATTÊ, J.L.I. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, v.9, n.3, p.263-6, 1985.

CERNICA, J. N. **Geotechnical engineering.** New York: CBS College Publishing, 1982.

COSTA, F. S. **Propriedades físicas e produtividade de culturas de um Latossolo bruno sob sistemas de manejo do solo em experimentos de longa duração.** Lages, 2001, 98p. Dissertação (Mestrado) Universidade do Estado de Santa Catarina, 2001.

CRUZ, A. C. R.; PAULETTO, E. A.; FLORES, C. A.; SILVA, J. B. Atributos físicos e carbono orgânico de um argissolo vermelho sob sistemas de manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.27, p.1105-1112, 2003.

CULLEY, J. L. B.; LARSON, W. E. Susceptibility to compression of a Clay Loam Haplaquoll. **Soil Science Society of America Journal**, v.51, n.3, p. 562-567, 1987.

DEFENSE MAPPING SCHOOL **Soil trafficability.** Virginia (student pamphlet, DMS nº ST222), 62p., 1986.

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

DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, v.11, n.3/4, p.199-238, 1988.

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

DIAS JUNIOR, M.S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., H.V. & CHAEFER, C.E.G.R. **Tópicos em ciência do solo.** Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, 2000

DIAS JUNIOR, M. S., MIRANDA, E. E. V. Metodologia para determinação do limite de contração modificada. **R. Ciênc. Agrotec**, Lavras (MG), v.22, n.3, p.313-317, 1998.

- 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**, Campinas, v. 20, n.2, p.175-182, 1996.
- DON SCOTT, H. **Soil physics applications. Agricultural and Environmental**. Iowa Sta University Press. 421p., 2000.
- DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In defining soil quality for a sustainable environment DORAN, J. W.; COLEMAR, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Eds.) **Soil Sci. Soc. Amer.**: Madison, Wis, p.3-21, 1994.
- DUNN, I. S.; ANDERSON, L. R.; KIEFER, F. W. **Fundamentals of geotechnical analysis**. Canada: John Wiley of sons, 1941.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997, 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 1999, 412p.
- FERNANDES, H. C., LANÇAS, K. P. Determinação dos níveis de compactação do solo causados pelo tráfego de um "FORWARDER" em um latossolo roxo da região de Botucatu/SP. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v.12, n.1, p.53-60, 1997.
- FRENADEZ, E. M.; CRUSCIOL, C. C. C.; THIMOTEO, C. M. S. Matéria seca e nutrição da soja em razão da compactação do solo e adubação fosfatada. **Científica**, v.23, p.117-132, 1995.
- FLOWERS, M. D.; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqulf in northwest Ohio. **Soil and Tillage Research**, v.48, p.21-35, 1998.
- FONSECA, J. S.; MARTINS, G. A. **Curso de estatística**. São Paulo: Atlas, 3 ed., 286p., 1982.
- FURLANI, C. E. A.; GAMERO, C. A.; LEVIEN, R.; LOPES, A. Resistência do solo à penetração em preparo convencional, escarificação e semeadura direta em diferentes manejos da cobertura vegetal. **Eng. Agric.**, v.23, n.3, p.579-587, 2003.
- GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo Argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **R. Bras. Ci. Solo**, v.28, p.477-484, 2004.

GODBOLE, R.; ALCOCK, R.; HETTIARATCHI, D. The prediction of tractive performance of soil surfaces. **J. Terramechanics**, v.30, n.6, p.443-459, 1993.

GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; MATA, J. D. V. Análise exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. **Acta Sci.**, v.23, p.1149-1157, 2001.

GREACEN, E. L.; SANDS, R. Compaction of forest soils. A review. **Australian Journal of Soil Research**, v.18, p.163-189, 1980.

GREGORICH, E. G.; CARTER, M. R.; ANGERS, D. A.; MONREAL, C. M.; DWYER, L. M. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. **Canadian Journal of Soil Science**, v.74, n.4, p.367-386, 1994.

GUPTA, S.C. & ALLMARAS, R.R. Models to assess the susceptibility of soil to excessive compaction. **Adv. Soil Sci.**, 6:65-100, 1987.

HARTGE, K. H.; HORN, R. Effects of short-time loading on soil deformation and strength of an ameliorated typic Paleustalf. **Soil Tillage Res.**, v15, p.247 – 256, 1990.

HÄKANSSON, I.; VOORHEES, W. B.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. **Soil and Tillage Research**, v.11, n.34, p.239-282, 1988.

HORN, R. Compressibility of arable land. **Catena**, suppl., v.11, p.53-71, 1988.

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

INGARAMO, O. E. **Indicadores físicos de la degradación del suelo**. Coruña 2003, 341p. Tesis (Doctoral) Universidade da Coruña. Facultad de Ciências, 2003.

IMHOF, S. D. C. **Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de latossolos e Argissolos vermelhos**. Piracicaba, 2002, 94p. Tese (doutorado em solo e nutrição de plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, ESALQ/USP, 2002.

ISAAKS, E. H., SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York, Oxford University Press, 1989, 560p.

JONES, C. A. Effect of soil texture on critical bulk density for root growth. **Soil Sci. Am. J.**, v.47, p.1208-1211, 1983.

KAY, B. D. Rates of change of soil structure under different cropping systems. **Adv. Soil Sci.**, v.12, p.1-41, 1990.

- KEMPER, W.D. & CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L.; ENSMINGER, L.E. & CLARK, F.E., eds. Methods of soil analysis - Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Madison, **American Society of Agronomy**, p.499-510, 1965.
- KIRBY, J. M.; BENGOUGH, A. G. Influence of soil strength on root growth: experiments and analysis using a critical-state model. **European Journal of Soil Science**, v.53, p.119-128, 2002.
- KNIGHT, S. J.; FREITAG, D. R. Measurement of soil trafficability characteristics. *Trans.ASAE – Am. Soc. Agric. Eng.*, v.5, p.121-132, 1962.
- KONDO, M.K. **Compressibilidade de três Latossolos sob diferentes usos**. Lavras: UFLA, 1998. 105p. (Dissertação- Mestrado em solos e Nutrição de Plantas), 1998.
- KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Efeito do manejo e da umidade no comportamento compressivo de três Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, n.3, p.497-506, 1999a.
- KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Estimativa do efeito do uso e da umidade do solo sobre a compactação adicional de três Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, n.4, p.773-782, 1999b.
- 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, n.2, p.211-218, 1999c.
- KOOLEN, A. J. Mechanics of soil compaction. In: SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C. (Ed.) **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. cap2, p.23-44.
- LANÇAS, K. P., SANTOS FILHO, C.A. **Penetrômetro hidráulico-eletrônico equipado com DGPS para avaliação da compactação do solo**. La Plata, Editorial de la U.N.L.P. p. 570-576. 1998.
- LANÇAS, K.P., BENEZ, S.H., FURLANI Jr, J.A., GAMERO, C.A., ANTUNIASSI, U.R. Subsolador: desgaste em função da sua dureza superficial. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 19., Piracicaba, SP. 1990. **Anais**. Piracicaba, SP. p. 801-809. 1990.
- LANÇAS, K.P., SANTOS FILHO, A.G. dos, UPADHYAYA, S.K. & RIPOLI, T.C. Estimativa da compactação do solo, através do índice de cone, para três sistemas de condução da cultura do milho num projeto de agricultura sustentada de longo prazo. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 25., Bauru, SP, 1996. **Anais**. Bauru, SP. McA232 (CD ROM). 1996.
- LANÇAS, K. P. ; SANTOS FILHO, A. G. dos & UPADHYAYA, S. K. Implications of using low/correct inflation pressure for radial ply tractor tires. In: AGRICULTURAL EQUIPMENT

TECHNOLOGY CONFERENCE. **ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.)**, paper no. AETC 95-056. Chicago, Illinois, USA. 1995a.

LANÇAS, K.P.; UPADHYAYA, S.K. **Pneus radiais para tratores, guia para seleção correta da pressão de inflação**. Botucatu: FCA/UNESP, 1997. 33p. (Bol. Tec. Energia na Agricultura).

LANÇAS, K. P.; GUERRA, P. S.; PEREIRA, F. J. S.; JESUINO, P. R. Avaliação da compactação em função do tipo e manejo do solo. In: LANÇAS, Kléber Pereira; SAAD, João Cury; SILVA, Reginaldo Barboza da. (Org.). **Uso racional da água e conservação do solo em áreas irrigadas sob plantio direto e convencional**. Botucatu, 2005, v. 1, p. 2-33.

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

LARSON, W.E. & GUPTA, S.C. Estimating critical stress in unsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression. **Soil Science Society of America Journal**, 44:1127-1132, 1980.

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

LARSON, W.E.; BLAKE, G.R.; ALLMARAS, R.R.; VOORHEES, W.B. & GUPTA, S.C. **Mechanics and related processes in structured agricultural soils**. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1989. 273p. (Nato Applied Science, 172).

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical of agricultural soils. **Soil Tillage Research**, v.19, n.2/3, p.274-286, 1991.

LERINK, P. Prediction of the immediate effects of traffic on field soil qualities. **Soil and Tillage Research**, v.16, p.153-166, 1990.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Adv. Soil Sci.**, v.1, p.277-294, 1985.

LIBARDI, P. L., PREVEDELLO, C. L., PAULETO, E. A., MORAIS, S. O. Variabilidade espacial da umidade, textura e densidade de partículas ao longo de uma transeção. **R. Bras. Ci. Do Solo**, v.10, p.85-90, 1996.

LIMA, C. L. R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. Pircicaba, 2004, 60p. Tese (doutorado em solos e nutrição de plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, ESALQ/USP, 2004.

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

- MACHADO, R. V. **Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos em uma hidrossequência de solos bem a muito mal drenados.** Lavras, 1994, 88p. Dissertação (Mestrado) Escola Superior de Agricultura de Lavras, 1994.
- MACHADO, A.L.T., TREIN, C.R., BICA, A.V.D., BOENI, M. Desenvolvimento e aplicação de um penetrógrafo eletrônico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 28, A Engenharia Agrícola – TENDÊNCIAS E INOVAÇÕES. 1999, Pelotas, RS, **Anais...** Pelotas/RS, (CD ROM). 1999.
- MANTOVANI, E.C. **A soil surface traffic-corn yield model for a soil under cerrado vegetation in Brazil with less 10 years of cultivation.** Purdue, 1984. 148p. Tese (Doutorado)
- MARQUES JR, J.; CORÁ, J. E. Atributos do solo para agricultura de precisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA. Mecanização e agricultura de precisão. 1998, Poços de Caldas, MG, **Anais**, Resumo expandido. Lavras: UFLA/SBEA, 1998. Cap.2, p. 31-70.
- MAZZETTO, F.R.; LANÇAS, K.P. Determinação da área de contato de pneus agrícolas utilizando uma prensa hidráulica estática. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 12.; 2000, São José do Rio Preto, **Resumos...** São José do Rio Preto: Universidade Estadual Paulista, 2000. p.260.
- MAZZETTO, F.R.; LANÇAS, K.P.; NAGAOKA, A.K. et al. Avaliação da área de contato, deformação elástica, recalque e compactação do solo de diferentes tipos de pneus agrícolas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia, **Anais...** Goiânia: SBEA, 2003.
- MCBRIDE, R. A.; JOOSSE, P. J. Overconsolidation in agricultural soil: Pedotransfer functions for preconsolidation stress. **Soil Science Society of America Journal**, v.60, p.373-380, 1996.
- MCBRIDE, R. A. Estimation of density-moisture-stress functions from uniaxial compression of unsaturated, structured soils. **Soil and Tillage Research**, v.13, n.4, p.383-397, 1989.
- MCBRIDE, R. A.; WATSON, G. C. An investigation of re-expansion of unsaturated, structured soils during cyclic static loading. **Soil and Tillage Research**, v.17, n.3/4, p.241-253, 1990.
- MCNABB, D. H.; BOERSMA, L. Evaluation of the relationship between compressibility and shear strength of Andisols. **Soil Science Society of America Journal**, v.57, n.4, p.923-929, 1993.
- MELLO IVO, W.M.P., MIELNICZUK, J. Influência da estrutura do solo na distribuição e na morfologia do sistema radicular do milho sob três métodos de preparo. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa (MG), v.23, n.1, p.135-143, 1999.

- MIALHE, L.G. **Manual de mecanização agrícola**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1974. 301p.
- MIRANDA, E. E. V. **Modelagem e mapas de capacidade de suporte de carga de solos cultivados com cana-de-açúcar**. Botucatu, 2006, 97p. Tese (doutorado em agronomia, área de concentração energia na agricultura) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.
- MORAES, M.H., BENEZ, S.H. Efeitos de diferentes sistemas de preparo do solo em algumas propriedades físicas de uma terra roxa estruturada e na produção do milho para um ano de cultivo. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v.16, n.2, p.31-41, 1996.
- MOSADDEGHI, M. R.; HEMMAT A.; HAJABBASI, M. A.; ALEXANDROU, A. Pre-compression stress and its relation with the physical and mechanical properties of a structurally unstable soil in central Iran. **Soil and Tillage Research**, v.70,p.53-64, 2003
- MULLA, D. J. **Using geostatistics to manage spatial variability in soil fertility**. Scientific paper nº 7705, Pullman, Wash.: College of Agriculture and Home Economics Research Center, Washington State University. 1987.
- MULLA, D. J.; SCHEPERS, J. S. Key processes and properties for site-specific soil and crop management. In PIERCE, F. J.; SADLER, E. J. (Eds) The state of site-specific management for agriculture. **ASA Misc. Pub. ASA. CSSA. SSSA**. Madison, WI., p.1-18, 1997.
- MUNSON, K.L; ERBACH, D.C.; BERN, C.J. Tire inflation pressure and soil compaction. In: **ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.)**, 1994, Kansas City. (Paper 94-1052).
- MUSY, A. & SOUTTER, M. **Physique du sol**. Laussane, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 335p., 1991.
- NAGAOKA, A.K. **Desenvolvimento e avaliação do desempenho de um equipamento para ensaio dinâmico de rodado agrícola individual**. 2001. 206p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.
- NEGI, S.C., RAGHAVAN, G.S.V., McKYES, E. The effect to compaction and minimum tillage on corn yields and soil properties. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, 23:744-7, 1990.
- NETO, A. N. S.; SILVEIRA, P. M.; STONE, L.F.; OLIVEIRA, L. F. C. Efeitos de manejo e rotação de culturas em atributos físicos do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.36, n.1, p. 29-35, 2006.
- NEVENS, F.; REHEUL, D. The consequences of Wheel-induced soil compaction and subsoiling for silage maize on a sandy loam soil in Belgium. **Soil and Tillage Research**, v.70, p.175-184, 2003.

NOVAK, L.R., MANTOVANI, E.C., MARTYN, P.J., FERNANDES, B. Efeito do tráfego de trator e da pressão contato pneu/solo na compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro álico, em dois níveis de umidade. **Pesq. Agropec. Bras.**, 27:1587-1595, 1992.

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 manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, p.291-299, 2003.

ORTOLANI, A.F., COAN, O., SALLES, H.C. Influência da compactação do solo no desenvolvimento da soja (*Glycine max* (L) Merrill). **Engenharia Agrícola**. Botucatu, 6(1): 35-42, 1982.

O'SULLIVAN, M. F. Uniaxial compaction effects on soil physical properties in relation to soil type and cultivation. **Soil and Tillage Research**, v.24, n.3/4, p.257-269, 1992.

PEDROTTI, A., VAHL, L.C., PAULETTO, E.A. Níveis de compactação do planossolo e o desenvolvimento radicular de algumas culturas. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 12. 1998. Fortaleza/Ceará. **Resumos expandidos**. Sociedade Brasileira Ciências do Solo. Universidade Federal do Ceará. 1998. p.89-90.

PEREIRA, M. H. **A segunda revolução verde**. Brasília: EMBRAPA – SPI, p.25-29, 1997.

PIMENTEL-GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 14 ed. Piracicaba, Nobel, 2000. 477p.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

PORTA, J; LÓPEZ-ACEVEDO, M.; ROQUERO, C. **Edafología para la agricultura y el medio ambiente**. 2 Edición. Mundi-Prensa, 1999.

PORTERFIELD, J.W.; CARPENTER, T.G. Soil compaction: an index of potencial compaction for agricultural tires. **Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.)**, St. Joseph, v.29, n.4, p.917-22, 1986.

RAGHAVAN, G. S. V.; ALVO, P.; MCKYES, E. Soil compaction in agriculture: A view toward managing the problem. **Advances in Soil Science**, v.11, p.1-35, 1990.

ROBERTSON, L. S.; ERICKSON, H. E. Soil compaction. I. Symptons. **Crops and soils magazine**, v.30, p.11-14, 1978.

RUEDA, M. J. F. **Características físicas y mecanicas de suelos de cultivo**. Coruña 1997, 285p. Tesis (Doctoral) Universidade da Coruña. Facultad de Ciencias. Coruña 1997.

RUIZ, E. R. S. **Mapas de isocompactação e isofertilidade do solo em diferentes sistemas de manejo.** Botucatu, 2003, 162p. Tese (doutorado em agronomia, área de concentração energia na agricultura) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.

RUSSO, D.; BRESLER, E. Soil hydraulic properties as stochastic processes: I. An analysis of field special variability. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.45, p. 678-687, 1981.

SÁ, J. C. M. **Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto.** Fundação ABC, 95p., 1993.

SALIRE, E. V.; HAMMEL, J. E.; HARDCASTLE, J. H. Compression of intact subsoils under short-duration loading. **Soil and Tillage Research**, v.31, p.235-248, 1994.

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

SANTOS FILHO, A. G.; LANÇAS, K. P. Efeito da geometria do prato de recalque para levantamento de parâmetros físicos do solo. **Energia na Agricultura**, Botucatu SP, v.13, n.1, p. 18-31, 1998.

SHARMA, A.K.; PANDEY, K.P. A review on contact area measurement of pneumatic tyre on rigid and deformable surfaces. **J. Terramechanics**, v.33, n.5, p. 253-264, 1996.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.20, p.113-117, 1997.

SILVA, R. B. S. **Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de um latossolo sob diferentes intensidades de uso na região dos cerrados.** Lavras, 2002, 142p. Tese (doutorado em agronomia, área de concentração em solos e nutrição de plantas) – Universidade Federal de Lavras, 2002.

SILVA, R. B.; LANÇAS, K. P. Tráfego agrícola e sustentabilidade da estrutura do solo: relações e interrelações. In: LANÇAS, Kléber Pereira; SAAD, João Cury; SILVA, Reginaldo Barboza da. (Org.). **Sustentabilidade dos solos agrícolas da bacia hidrográfica do Alto Paranapanema em função da disponibilidade hídrica e do tráfego de máquinas.** Botucatu, 2005, v. 1, p. 2-34.

SILVA, R. B.; LANÇAS, K. P.; GUERRA, S. P. S. Mobile Soil Sample Unit - MSSU - used in Precision Agriculture for analysis of agricultural soil properties and parameters. In: ENGINEERIA, **Swedish Institute Of Agricultural And Enviromental.** (Org.). BOOK ABSTRACTS 5ª ECPA-2ª ECPL. 1ª. ed. Uppsala, 2005a, v. 1, p. 174-177.

SILVA, A. P., LIBARDI, P.L., CAMARGO, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. **R. Bras. Ci. Solo**, 10:91-95, 1986.

- SILVA, A. P.; LIBARDI, P.L.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho-Escuro ao longo de uma transeção. **R. Bras. Ci. Solo**, 13(1):1-5, 1989.
- SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.24, n.2, p.239-250, 2000.
- SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SOARES, J. M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico Arênico e de um Latossolo Vermelho Distrófico Típico. I – Estado inicial de compactação. **R. Bras. Ci. Solo**, v.26, n.1, p.9-16, 2002a.
- SILVA, R. B.; JUNIOR, M. S.; SANTOS, F. L.; FRANZ, C. A. B. Influência do preparo inicial sobre a estrutura do solo quando da adoção do sistema plantio direto, avaliada por meio da pressão de preconsolidação. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.23, p.219-226, 2003.
- SILVA, R. B.; LANÇAS, K. P.; MIRANDA, E. E. V. Densidad critica del suelo como indicador de la capacidad de soporte de carga, em areas bajo cultivo de caña de azúcar, en la región de piracicaba, SP-Brasil. In: **II Jornada sobre agricultura de precision**. A Cruña, Resumens... Universidad de a Coruña, p.32-38, 2004.
- SILVA, M. A. S.; MAFRA, A. L.; ALBUQUERQUE, J. A.; ROSA, J. D.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Propriedades físicas e teor de carbono orgânico de um argissolo vermelho sob distintos sistemas de uso e manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.30, p.329-337, 2006.
- SNAKIN, V. V.; KRECHETOV, P. P.; KUZOVNIKOVA, T. A. The system of assessment of soil degradation. **Soil Technology**, v.8, p.331-343, 1996.
- SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. *Statistical methods* 8ed. Ames, Iowa, 1989.
- SINGER, M.; EWING, S. Soil quality. In: SUMNER, M.E. (Ed.) **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC Press, 2000. p.271-298.
- SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. **Soil and Tillage Research**, v.16, n.1/2, p.179-201, 1990.
- SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C. Soil compaction problems in world agriculture. In: SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C. (Ed.) **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.1-21.
- SOUZA, L. S. **Variabilidade espacial do solo em sistemas de manejo**. Porto Alegre, 1992, 162p. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1992.

SOUZA, L. S.; DINIZ, M. S.; CALDAS, R. C. Correção da interferência da variabilidade do solo na interpretação dos resultados de um experimento de cultivo de clones de mandioca. **R. Bras. Ci. Solo**, v.20, p.441-445, 1996.

SOUZA, L. S.; COGO, N. P.; VIEIRA, S. R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. **R. Bras. Ci. Solo**, v.21, p. 367-372, 1997.

SOUZA, Z. M.; SILVA, M. L. S.; GUIMARÃES, G. L.; CAMPOS, D. T. S.; CARVALHO, M. P.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). **R. Bras. Ci. Solo**, v.25, p. 699-707, 2001.

SOUZA, Z. M.; JUNIOR, J.M.; PEREIRA, G. T.; BENTO, M. J. C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **R. Bras. Eng. Agrícola e Ambiental**, v.8, n. 1, p. 51-58, 2004.

SOWERS, G. W. 1986. Consistency. In: Klute, A. (ed). **Methods of soil analysis**. Part. 1. 2nd ed. Agronomy Monography 9, ASA. Madison, WI. p.391-399, 1986.

TAYLOR, H.M. Effects of soil strength on seedling emergence, root growth and crop yield. In: BARNES, K.K.; CARLETON, W.M.; TAYLOR, H.M.; THROCKMORTON, R.I. & VANDENBERG, G.E., eds. **Compaction of agricultural soils**. St. Joseph, American Society of Agricultural Engineers, 1971. p.292-305.

TAYLOR, H. M., GARDNER, H. R. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content and strength of soil. **Soil Sci**. v.96, p. 153-156, 1963.

TAYLOR, S. A.; ASHCROFT, G. L. Physical edaphology – **The physics of irrigated and nonirrigated soils**. San Francisco. W. H. Freeman, 1972. 532p.

TERZAGHI, K. **Theoretical soil mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1943.

TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. C. S.; GONÇALVES, C. A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Sci. Agric.**, v.59, n.4, 2002.

UPCHURCH, D. R.; EDMONDS, W. J. Statistical procedures for specific objectives. In: MAUSBACH, M. J.; WILDING, L. P. (Eds). Spatial variabilities of soils and landforms. **Soil Sci. Soc. Am. J.** Madison, p.49-71, 1993.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo, Mcgraw-Hill do Brasil, Ed. USP, 1977.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p.1-53, 2000.

VIEIRA, S. R.; TILLOTSON, P. M.; BIGGAR, J. W.; NIELSEN, D. R. Scaling of semivariograms and the kriging estimation of field-measured properties. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.21, p.525-533, 1997.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A.H. Soil density and root penetration. **Soil Sci.**, v.65, p.182-183, 1948.

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.

WILDING, L. P.; DREES, L. R. Spatial variability and pedology. In: PEDOGENESIS and soil taxonomy. **I. concepts and interactions**. New York, Elsevier, p.83-116, 1983.

WÖSTEN, J. H. M.; PACHEPSKY, Y. A. A.; RAWLS, W. J. Pedotransfer functions: bringing the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. **Journal of Hydrology**, v.251, p.123-150, 2001.

WOHLENBERG, E. V.; REICHERT, D. J.; BLUME, E. Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de cultura em rotação e em sucessão. **R. Bras. Ci. Solo**, v.28, p.891-900, 2004.

APÊNDICE

Apêndice 1 – Medidas dimensionais dos tratores

Tratores	Medidas do Trator							
	Bitola		Comp. Total (m)	Dist. a eixos (m)	Largura Máxima (m)	Vão Livre (m)	Comp. Garras (m)	
	Dianteir	Traseir					Dianteir	Traseir
	a	a	o	o				
(m)	(m)	(m)	(m)					
John Deere 7505 4x2 TODA	1,89	1,83	4,87	2,68	2,45	0,41	3,35	3,67
Massey Ferguson 275 4x2 TODA	1,86	1,82	3,93	2,38	2,16	0,31	2,17	3,31
Pulverizador Max Sistem	1,82	1,82	5,20	2,41	2,21	0,28	3,67	3,60
Pulverizador Autopropelido Uniport Jacto 2000 litros	2,02	2,98	6,41	3,25	2,37	1,33	3,25	3,05
Colhedora de grãos John Deere 1175 4x2	2,90	2,87	8,88	3,54	6,05	0,46	4,00	3,70

Apêndice 2 – Caracterização dos pneus dos tratores

Tratores	Pneu		Pressão de Inflação		Lastro	
	Dianteiro	Traseiro	Dianteiro (psi)	Traseiro (psi)	Dianteiro	Traseiro
John Deere 7505 4x2 TODA	18.4-26	24.5-32	20	20	10 lonas/	10 lonas/
	Pirelli	Pirelli			75% água	75% água
	TM 95	TM 95				
Massey Ferguson 275 4x2 TDA	12.4-24	13.6-38	16	21	6 lonas/	6 lonas/
	Firestone	Goodyear			75% água	75% água
	Super All	Power				
	Traction	Torque				
	23					
Pulverizador Max Sistem	12.4/11-24	13.6-38	12	21	6 lonas/	6 lonas/
	Firestone	Goodyear			sem água	sem água
		Power				
		Torque				
Pulverizador Autopropelido Uniport Jacto 2000 litros	12.4-36	12.4-36	22	22	12 lonas/	12 lonas/
	Goodyear	Goodyear			sem água	sem água
	Dyna	Dyna				
	Torque II	Torque II				
Colhedora de grãos John Deere 1175 4x2	12.4-24	28.1-26	40	32	6 lonas/	12 lonas/
	Goodyear	Pirelli			sem água	sem água
	Dyna	MB 39				
	Torque II					

Apêndice 3 – Apresentação das máquinas agrícolas que foram utilizadas nas áreas de estudo e suas áreas de contato do pneu na massa modelável.

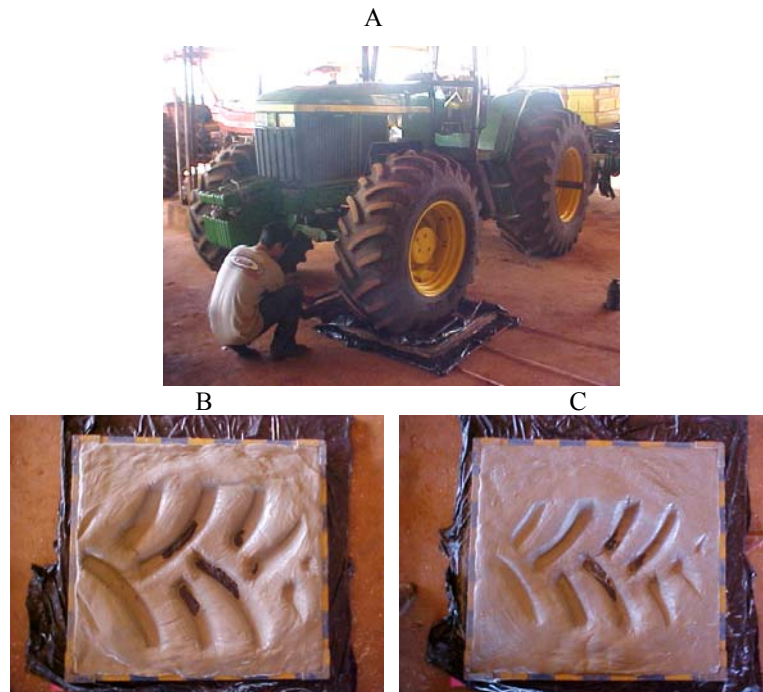


Figura 1 - Trator John Deere 7505 4x2 TDA (A); Área de contato pneu traseiro (B); Área de contato pneu dianteiro (C).

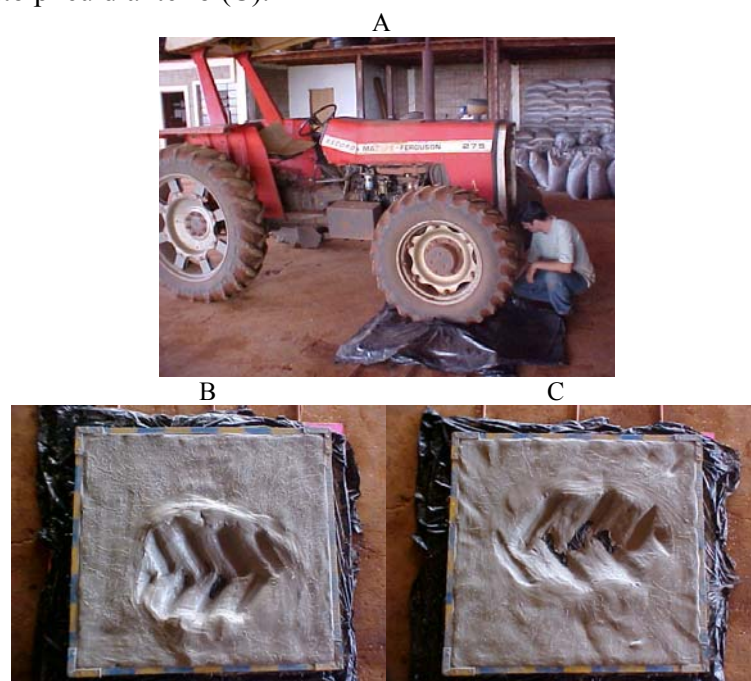


Figura 2 - Trator Massey Ferguson 275 4x2 TDA (A); Área de contato pneu traseiro (B); Área de contato pneu dianteiro (C).

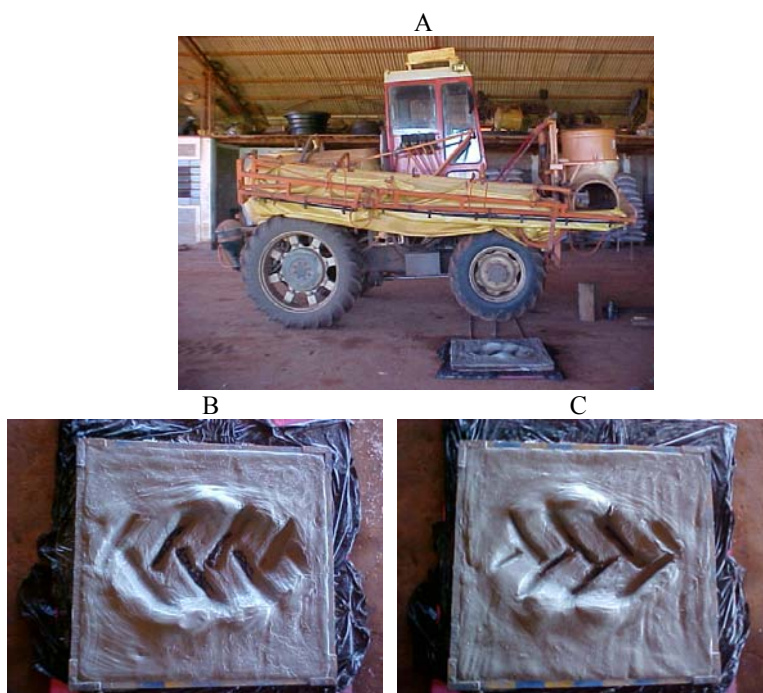


Figura 3 - Pulverizador Max Sistem – Pulverizador Columbia Jacto 2000 l montado sobre tractor Massey Ferguson 290 4x2 TDA (A); Área de contato pneu traseiro (B); Área de contato pneu dianteiro (C).

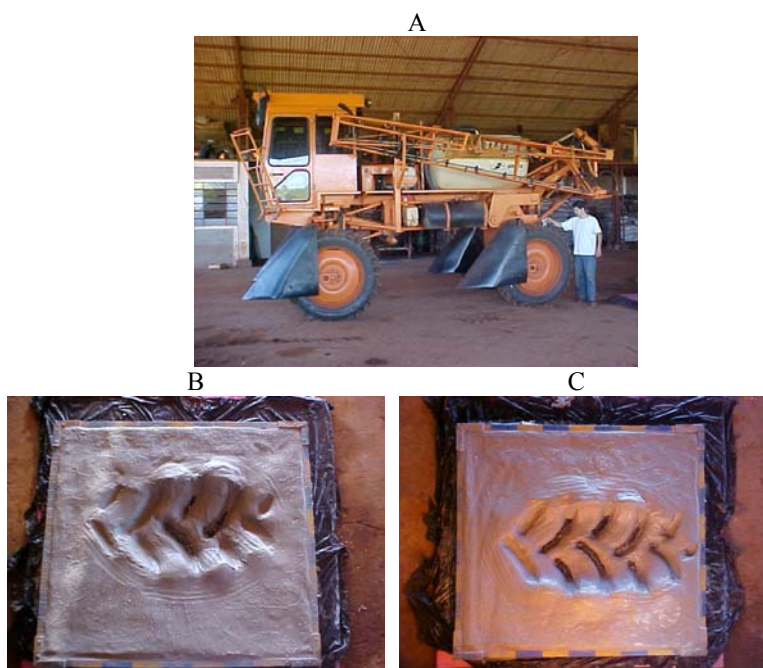


Figura 4 - Pulverizador Autopropelido Uniport Jacto 2000 l (A); Área de contato pneu traseiro (B); Área de contato pneu dianteiro (C).

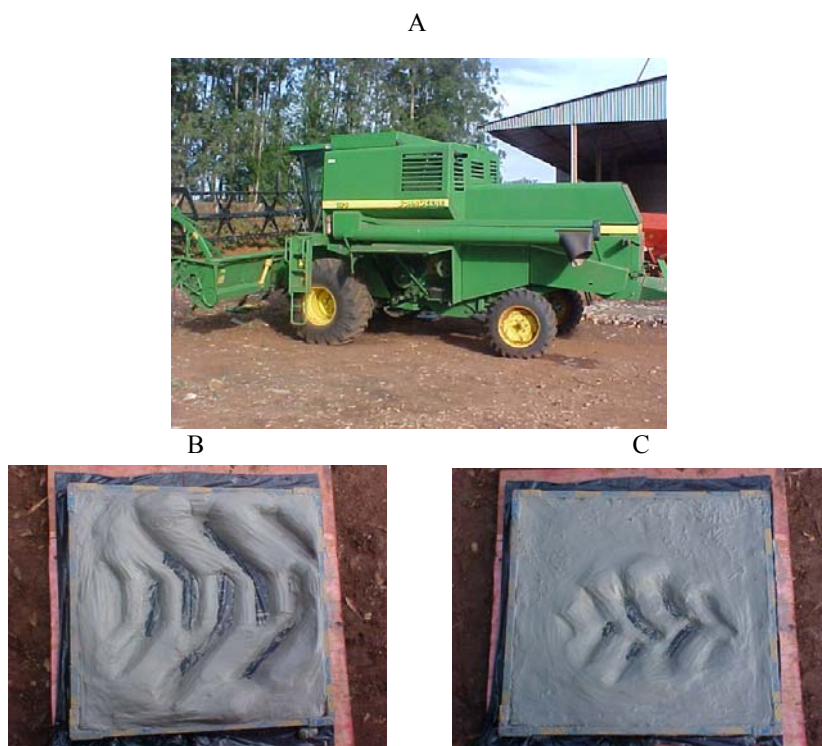


Figura 5 - Colhedora de grãos John Deere 1175 4x2 (A); Área de contato pneu de tração (B); Área de contato pneu traseiro (C).

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)