

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**AVALIAÇÃO DOS ATRIBUTOS FÍSICOS E DA
COMPRESSIBILIDADE DE UM NITOSSOLO VERMELHO
DISTROFÉRICO SOB SISTEMAS DE PLANTIO DIRETO, PREPARO
CONVENCIONAL E MATA NATIVA**

RENATO LARA DE ASSIS
Engenheiro Agrícola

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP - Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia - Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU - SP

Julho - 2002

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**AVALIAÇÃO DOS ATRIBUTOS FÍSICOS E DA
COMPRESSIBILIDADE DE UM NITOSSOLO VERMELHO
DISTROFÉRICO SOB SISTEMAS DE PLANTIO DIRETO, PREPARO
CONVENCIONAL E MATA NATIVA**

RENATO LARA DE ASSIS
Engenheiro Agrícola

Orientador: **Prof. Dr. Kléber Pereira Lanças**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP - Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia - Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU – SP

Julho – 2002

À memória de minha avó: Lavínia de Rezende Lara

À memória de meu avô: João Batista de Assis

DEDICO

Meus irmãos e aqueles que acreditaram em min

HOMENAGEIO

A meus pais: Rui Viana de Assis e Terezinha Lara de Assis

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

À Fundação do Ensino Superior de Rio Verde (FESURV) - GO, pela liberação concedida para realização do curso.

À Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP, Campus de Botucatu, pela oportunidade que me foi concedida em realizar o curso de doutorado.

Ao PICDT/CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Professor Doutor Kléber Pereira Lanças do Departamento de Engenharia Rural pela orientação, amizade, estímulo, confiança e ensinamentos transmitidos.

Aos docentes do Departamento de Engenharia Rural e do Curso de Pós-Graduação.

Aos professores da FESURV, Takeshi Kamada e Maria Salete Zordan, pela amizade e pelas constantes solicitações.

Ao ex-presidente da FESURV, Afonso Celso Borges Junqueira Mattos e ao atual presidente, Paulo Eustáquio Resende Nascimento pela confiança depositada, amizade, apoio e pela liberação para realização do curso.

Ao Professor Moacir de Souza Dias Junior (UFLA) pelas valiosas colaborações e sugestões.

Ao Professor Sílvio J. Bicudo do Departamento de Produção Vegetal pela atenção e liberação de área para realização do presente estudo.

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

Ao Benedito Fernando Camargo, funcionário do NEMPA, pela prazerosa convivência.

Às secretárias do Departamento de Engenharia Rural, Rosângela Cristina Moreci e Rita de Cássia Miranda, e do curso de pós-graduação, Maria do Carmo Fernandes D'Auria, pela constante ajuda durante o curso.

Ao Wilson Roberto de Jesus do CINAG pelo auxílio nas análises estatísticas.

À Professora Célia Regina Lopes Zimback pelo empréstimo do Permeâmetro de Guelph e pela atenção nos momentos solicitados.

À professora Maria Helena Moraes pela atenção dispensada em todos os momentos solicitados.

Ao Professor Dr. Pedro de Castro Neto (UFLA) pela amizade.

Ao colega Antonio Renan Berchol da Silva, pela amizade, atenção e ajuda na coleta de amostras.

Ao acadêmico do curso de Agronomia Gilmar Donizete Lazarini pela ajuda na montagem de equipamento.

Ao Reginaldo Barboza da Silva e Elka Élice Vasco de Miranda pela contribuição nos programas utilizados no presente estudo.

Aos colegas de república pela prazerosa convivência.

Aos colegas de curso: Denise Mahl, Caetano, Edmilson Renato, José Roberto, João Paulo, Célia, Zulema, Ana Teresa, Fernanda, Magali, Cláudio, Renildo, Francisco Faggion, Moisés, Maurício, Adão, Tanaka, Gandolfo, Marcelo Müller, Wellington.

Ao Prof. Alberto Kazushi Nagaoka da UDESC pela amizade e prazerosa convivência.

Ao Professor Ednaldo Carvalho Guimarães (UFU) pelas valiosas contribuições e atenção em todos os momentos solicitados.

Ao Professor Afonso Lopes (UNESP - Jaboticabal) pela amizade.

Ao Professor Benedito Martins Gomes (UNIOESTE) pela amizade e companheirismo.

Ao Professor Geraldo César de Oliveira (UFG) pela amizade e valiosas sugestões.

Às funcionárias da Seção de Pós-Graduação da Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP, em Botucatu, Marilena do Carmo Santos, Marlene Rezende de Freitas e Jaqueline de Moura Gonçalves, pela atenção e atendimento preciso.

Aos Funcionários da fazenda pela atenção nos momentos solicitados.

SUMÁRIO

	Página
1 RESUMO.....	1
2 ABSTRACT.....	3
3 INTRODUÇÃO.....	5
4 REVISÃO DE LITERATURA.....	7
4.1 Plantio direto: histórico, experiências e expansão.....	7
4.2 Compactação do solo e tráfego de máquinas.....	9
4.3 Métodos para avaliar a compactação do solo.....	15
4.3.1 Ensaio de Proctor normal.....	15
4.3.2 Ensaio de compressibilidade do solo.....	17
4.3.3 Resistência do solo à penetração.....	22
4.4 Influência do manejo e do tempo de adoção no sistema plantio direto nos atributos físicos do solo.....	25
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	28
5.1 Caracterização da área experimental.....	28
5.2 Descrição dos tratamentos.....	30
5.3 Equipamentos e caracterização do tráfego.....	32
5.4 Coleta das amostras de solo.....	34
5.5 Caracterização física e química.....	35
5.5.1 Limites de consistência do solo.....	35
5.5.2 Ensaio de compressão uniaxial.....	35
5.5.3 Ensaio de Proctor normal.....	36
5.5.4 Grau de compactação do solo.....	36
5.5.5 Resistência do solo à penetração.....	37
5.5.6 Textura do solo.....	38
5.5.7 Densidade de partículas do solo.....	38
5.5.8 Densidade do solo.....	38
5.5.9 Matéria orgânica do solo.....	38
5.5.10 Curva de retenção da água no solo.....	38

	Página
5.5.11 Porosidade total do solo.....	39
5.5.12 Macro e microporosidade do solo.....	39
5.5.13 Percentagem de agregados (via úmida) do solo.....	40
5.5.14 Umidade gravimétrica do solo.....	40
5.5.15 Condutividade hidráulica do solo saturado e infiltração da água no solo.....	41
5.6 Análises estatísticas.....	41
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
6.1 Análise química do solo.....	43
6.2 Análise física do solo.....	45
6.3 Limites de consistência do solo.....	46
6.4 Densidade do solo máxima, umidade ótima de compactação e matéria orgânica.....	47
6.5 Densidade do solo e grau de compactação.....	53
6.6 Distribuição de agregados por classes de tamanho e diâmetro médio geométrico (DMG).....	56
6.7 Resistência do solo à penetração.....	63
6.8 Porosidade total e distribuição de poros por tamanho.....	68
6.9 Retenção de água no solo.....	70
6.10 Condutividade hidráulica do solo saturado e infiltração tridimensional.....	73
6.11 Ensaio de compressibilidade.....	75
6.12 Sugestões para trabalhos futuros.....	93
7 CONCLUSÕES.....	94
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	96
APÊNDICE.....	123

LISTA DE QUADROS

Quadro	Página
1	Análises químicas do Nitossolo Vermelho distroférico nos diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto..... 44
2	Teores de argila, silte, areia e densidade de partículas para os diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto..... 45
3	Valores do limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), limite de contração (LC) para os diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto..... 47
4	Valores de densidade do solo máxima ($D_{smáx}$), umidade ótima de compactação ($U_{ótm}$) e matéria orgânica para os diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto..... 48
5	Valores de densidade do solo inicial (D_{si}) e o grau de compactação (GC) para os diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto..... 53
6	Valores do diâmetro médio geométrico (DMG), agregados > 2 mm, < 2 mm, 2-1 mm e < 1 mm para os diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto..... 56
7	Valores médios dos índices de cone (MPa) nas diferentes profundidades para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto e seus respectivos coeficientes de variação..... 63
8	Umidade gravimétrica do solo ($kg\ kg^{-1}$) nos diferentes tratamentos relativos a coleta de dados de resistência do solo à penetração..... 64
9	Valores de macroporosidade, microporosidade ($m^3\ m^{-3}$), relação (micro/macro) e porosidade total para os diferentes tipos de sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto..... 69
10	Valores de retenção de água ($m^3\ m^{-3}$) do Nitossolo Vermelho distroférico nos diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto..... 71

Quadro	Página	
11	Valores médios de infiltração tridimensional (mm h^{-1}) correspondente à segunda carga hidráulica (9 cm) e condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}) e seus respectivos coeficientes de variação, efetuados na profundidade de 0-15 cm nos diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.....	74
12	Coefficientes da equação de regressão, $\sigma_p = 10^{(a + bU)}$, para o Nitossolo Vermelho distroférico nos diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto, coletados nas profundidades 0-5 cm e 10-15 cm.....	76
13	Comparação das equações de regressão, após linearização, usando o procedimento de Snedecor & Cochran (1989) para o Nitossolo Vermelho distroférico nos diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto, coletados nas profundidades 0-5 cm e 10-15 cm.....	76
14	Comparação das equações de regressão, após linearização, usando o procedimento de Snedecor & Cochran (1989) para o Nitossolo Vermelho distroférico nos diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto, coletados nas profundidades 0-5 cm e 10-15 cm.....	83
15	Parâmetros das equações de regressões obtidos a partir da relação entre o índice de compressão (m) e a umidade (U) para o Nitossolo Vermelho distroférico nos diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto, coletados nas profundidades 0-5 e 10-15 cm, conforme o modelo quadrático ($m = a + bU + cU^2$).....	87
16	Limites de plasticidade (LP) e de contração (LC), pressões de preconsolidação estimadas pelos modelos $\sigma_p = 10^{(a + bU)}$ nos limites de plasticidade ($\sigma_{p(LP)}$) e contração ($\sigma_{p(LC)}$), umidades máximas ($U_{m\acute{a}x}$) e índices de compressão máximos ($m_{m\acute{a}x}$) estimados pelas equações $m = a + bU + cU^2$, desenvolvidas para o Nitossolo Vermelho distroférico para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.....	90

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Exemplo de curva de compressão do solo.....	20
2	Valores de precipitação pluviométrica média mensal (1971-1998) medidos na estação Agrometeorológica do Departamento de Ciências Ambientais da Faculdade de Ciências Agrônomicas – UNESP em Botucatu - SP.....	29
3	Valores de temperatura média mensal (1971-1998) medidos na estação Agrometeorológica do Departamento de Ciências Ambientais da Faculdade de Ciências Agrônomicas - UNESP em Botucatu – SP.....	29
4	Curvas de compactação do Nitossolo Vermelho distroférico para os diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto.....	50
5	Relações entre densidade do solo máxima ($D_{smáx}$) com umidade ótima de compactação ($U_{ótm}$) e com matéria orgânica (MO).....	52
6	Distribuição percentual de agregados por classe de tamanho, profundidades para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.....	58
7	Relação entre o diâmetro médio geométrico (DMG) e os teores de matéria orgânica (MO) para os diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto em um Nitossolo Vermelho distroférico..	62
8	Relação entre as porcentagens de agregados com diâmetros maiores que 2 mm ($D > 2$ mm) e os teores de matéria orgânica (MO) para os diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto em um Nitossolo Vermelho distroférico.....	62
9	Resistência do solo à penetração ao longo do perfil dos solos para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.....	65
10	Curvas de retenção de água (secagem) do Nitossolo Vermelho distroférico em diferentes profundidades, sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.....	72

Figura	Página
11	Curva de pressão de preconsolidação em função da umidade em amostras de um Nitossolo Vermelho distroférico no tratamento MN, coletadas nas profundidades 0-5 e 10-15 cm..... 77
12	Curva de pressão de preconsolidação em função da umidade em amostras de um Nitossolo Vermelho distroférico no tratamento PC, coletadas nas profundidades 0-5 e 10-15 cm..... 78
13	Curva de pressão de preconsolidação em função da umidade em amostras de um Nitossolo Vermelho distroférico no tratamento PD1, coletadas nas profundidades 0-5 e 10-15 cm..... 79
14	Curva de pressão de preconsolidação em função da umidade em amostras de um Nitossolo Vermelho distroférico no tratamento PD4, coletadas nas profundidades 0-5 e 10-15 cm..... 80
15	Curva de pressão de preconsolidação em função da umidade em amostras de um Nitossolo Vermelho distroférico no tratamento PD5, coletadas nas profundidades 0-5 e 10-15 cm..... 81
16	Curva de pressão de preconsolidação em função da umidade em amostras de um Nitossolo Vermelho distroférico no tratamento PD12, coletadas nas profundidades 0-5 e 10-15 cm..... 82
17	Curva de pressão de preconsolidação em função da umidade em amostras de um Nitossolo Vermelho distroférico nos tratamentos em estudo, coletadas na profundidade de 0-5 cm..... 84
18	Curva de pressão de preconsolidação em função da umidade em amostras de um Nitossolo Vermelho distroférico nos tratamentos em estudo, coletadas na profundidade de 10-15 cm..... 86
19	Relação entre a umidade gravimétrica (U) e o índice de compressão (m) para o Nitossolo Vermelho distroférico para os diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto..... 88

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice	Página	
1	Resumo da análise de variância da análise química do solo para pH, P (fósforo), H + Al (hidrogênio + alumínio), K (potássio), Ca (cálcio), Mg (magnésio), SB (soma de bases), CTC (capacidade de troca de cátions) e V (saturação de bases) do Nitossolo Vermelho distroférico para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.....	124
2	Resumo da análise de variância da textura do solo (argila, silte e areia) do Nitossolo Vermelho distroférico para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.....	124
3	Resumo da análise de variância dos limites de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e limite de contração (LC) do Nitossolo Vermelho distroférico para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.....	125
4	Resumo da análise de variância da densidade de partículas, umidade ótima de compactação e densidade do solo máxima do Nitossolo Vermelho distroférico para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.....	125
5	Resumo da análise de variância para a densidade do solo inicial e grau de compactação do Nitossolo Vermelho distroférico para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.....	126
6	Resumo da análise de variância do DMG e das diferentes classes de agregados (> 2 mm, < 2 mm, 2-1 mm e < 1 mm) e da matéria orgânica do Nitossolo Vermelho distroférico para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.....	126
7	Resumo da análise de variância para a resistência do solo à penetração e umidade gravimétrica por ocasião da determinação da resistência do solo à penetração do Nitossolo Vermelho distroférico para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.....	127

Apêndice	Página
8	Resumo da análise de variância da macroporosidade, microporosidade e porosidade total do Nitossolo Vermelho distroférico para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto..... 127
9	Resumo da análise de variância para retenção de água do Nitossolo Vermelho distroférico para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto..... 128
10	Resumo da análise de variância para a condutividade hidráulica do solo saturado e velocidade de infiltração tridimensional do Nitossolo Vermelho distroférico para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto..... 128

1 RESUMO

Os efeitos do tráfego de máquinas nos atributos do solo em função do tempo de adoção no sistema plantio direto, são ainda pouco pesquisados em ambientes tropicais e muitas dúvidas ainda persistem sobre a variação dinâmica da estrutura do solo e a sua interação com as máquinas e equipamentos. As deformações ocasionadas pelo tráfego, constituem-se em fator determinante de modificações físicas no solo, podendo até mesmo anular possíveis efeitos benéficos dos sistemas conservacionistas. Com a adoção crescente do sistema plantio direto, atributos físicos do solo são modificados, entretanto, ainda não estão bem quantificados. O presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito do tempo de adoção do sistema plantio direto, comparativamente com área de mata nativa e preparo convencional, usando os atributos físicos do solo e os modelos de compressibilidade do solo em um Nitossolo Vermelho distroférico. Os tratamentos foram: PD1 (Plantio Direto com 1 ano), PD4 (Plantio Direto com 4 anos), PD5 (Plantio Direto com 5 anos), PD12 (Plantio Direto com 12 anos), um tratamento sob PC (Plantio Convencional) e outro sem atividade antrópica (Mata Nativa). Amostras indeformadas e deformadas foram coletadas em duas profundidades (0-5 e 10-15 cm). As amostras indeformadas foram utilizadas para o ensaio de compressibilidade, sob diferentes faixas de umidade, para macro e microporosidade, densidade do solo e para confecção das curvas características de retenção de água. A partir das amostras deformadas, determinaram-se os limites de consistência, textura, análise química, estabilidade de agregados em água, ensaio de Proctor e densidade de partículas. Os resultados obtidos evidenciaram que

o tempo de adoção no sistema plantio direto promoveu melhorias na condição química dos solos avaliados na profundidade de 0-5 cm. Constatou-se que o tempo de adoção no sistema plantio direto promoveu modificações na densidade do solo máxima e na umidade ótima de compactação. O tempo de adoção no sistema plantio direto proporcionou diminuição na densidade do solo e no grau de compactação na profundidade de 0-5 cm e não causou alterações na densidade do solo na profundidade de 10-15 cm. O diâmetro médio geométrico (DMG) e a percentagem de agregados maiores do que 2 mm foram crescentes com o tempo de adoção no sistema plantio direto na profundidade de 0-5 cm e a mata nativa (MN) apresentou maior DMG em ambas as profundidades. A resistência do solo à penetração não apresentou tendência predominante de variação com o tempo de adoção no sistema plantio direto e também em relação ao tipo de preparo. O tempo de adoção no sistema plantio direto não promoveu diferenciação na porosidade total. O PD12 (Plantio Direto com 12 anos) na profundidade de 0-5 cm apresentou maior macroporosidade e menor microporosidade. Os tratamentos PD1 (Plantio Direto com 1 ano) e PD4 (Plantio Direto com 4 anos) se destacaram entre os tratamentos sob plantio direto pela maior retenção de água no solo. Os tratamentos PD12 e MN apresentaram maiores velocidades de infiltração tridimensional de água no solo e condutividade hidráulica do solo saturado. O tempo de adoção no sistema plantio direto alterou o comportamento compressivo dos solos em ambas as profundidades (0-5 e 10-15 cm), por meio das mudanças no índice de compressão e na pressão de preconsolidação. A profundidade de 0-5 cm apresentou menor capacidade de suporte de carga, do que a profundidade 10-15 cm. A profundidade de 0-5 cm, em todos os tratamentos, mostrou ser mais suscetível à compactação em relação à profundidade de 10-15 cm. Os tratamentos com plantio direto e convencional apresentaram a capacidade de suporte de carga crescente na seguinte ordem: PD5 < PD12 < PD1 < PD4 + PC, para a profundidade 0-5 cm e para a profundidade 10-15 cm: MN + PD12 < PC + PD4 < PD5. Já o tratamento PD1 apresentou um comportamento diferenciado.

PHYSICAL ATTRIBUTE EVALUATION AND COMPRESSIBILITY OF A NITOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO SOIL UNDER NO TILL SYSTEMS, CONVENTIONAL TILLAGE AND NATIVE FOREST. Botucatu, 2002, 128p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: RENATO LARA DE ASSIS

Adviser: KLÉBER PEREIRA LANÇAS

2 SUMMARY

The effects of machine traffic in soil attributes in function of adoption time in no till system, are not still well researched in tropical atmospheres and a lot of doubts persist about the dynamic variation of soil structure and its interaction with the machines and equipments. The deformations caused by the traffic, consisted in decisive factor of physical modifications in agricultural soils, being even capable to annul possible beneficial effects of conservation systems. With the growing adoption of the no till system, soil physical attributes are modified; however, they are not well quantified yet. The present study had as objective to evaluate the of effect of adoption time no till system, comparative under native forest and conventional tillage using soil physical attributes and compressibility models at a “Nitossolo Vermelho distroférico”. The treatments were: PD1 (no till with 1 year of adoption), PD4 (no till with 4 years), PD5 (no till with 5 years), PD12 (no till with 12 years), a treatment under conventional tillage (PC) and another without use or intervention (native forest). The undisturbed and disturbed samples were collected in two depths (0-5 and 10-15 cm). The undisturbed soil samples were used to perform the uniaxial compression test, under different moisture range, for macro porosity and micro porosity, bulk density and for draw the retention of water curve characteristics. Starting from the disturbed samples, were determined the consistence limits, texture, chemical analysis, stability of aggregates in water, Proctor test and particle density. With the obtained results it was evidenced that no till system promoted

improvements in chemical conditions of evaluated soils in the depth of 0-5 cm. It was verified that the adoption time in no till system promoted modifications in soil maximum density and in the optimum moisture for soil compaction. The adoption time in no till system provided decrease in bulk density and in compaction degree in the depth of 0-5 cm and it did not cause alterations for the depth of 10-15 cm. The medium geometric diameter (DMG) and the percentage of aggregates larger than 2 mm increased the values with the adoption time in no till system for the depth of 0-5 cm and the native forest (MN) presented the largest DMG in both depths. The penetration resistance did not presented predominant tendency of variation with the adoption time for no till system and also in relation to the type of tillage. The adoption time in no till system did not promote differentiation in soil total porosity. The PD12, in the depth of 0-5 cm, presented the largest macro porosity and the smallest micro porosity. The PD1 and PD4 treatments stood out among the treatments under no till for the largest soil water retention. The PD12 and MN treatments presented the largest speed of soil water infiltration and saturated hydraulic conductivity. The adoption time for no till system altered the behavior of soil compression in both depths (0-5 and 10-15 cm), thought the changes in compression index and preconsolidation pressure. The 0-5 cm depth presented the smallest capacity of load support, while the 10-15 cm depth presented the highest. The 0-5 cm depth showed to be, for all the treatments, more susceptible to soil compaction in relation to the 10-15 cm depth. The no till and conventional treatments presented load support capacity following the crescent sequence: PD5 < PD12 < PD1 < PD4 + PC for 0-5 cm depth and MN + PD12 < PC + PD4 < PD5 for 10 - 15 cm depth. The PD1 treatment showed a different behavior.

Keywords: adoption time, preconsolidation pressure, cone index, capacity of load support, soil compaction, no till, physical attributes.

3 INTRODUÇÃO

O plantio direto é uma prática conservacionista especialmente adequada para as condições de ambiente de regiões tropicais, onde se faz necessário manter o solo protegido do sol e da chuva, caracterizando-se pela sua eficiência no controle de perdas de solo e água e na redução nos custos operacionais, principalmente pela eliminação de operações de preparo do solo, tais como a aração e a gradagem. Sua adoção tem viabilizado a implantação de sistemas de produção que possibilitem maior eficiência energética e conservação ambiental, tornando-se a base da sustentabilidade.

Com a crescente utilização do sistema plantio direto, os atributos físicos dos solos têm sido modificados, necessitando portanto, de pesquisas com períodos de duração mais longos para se poder estudar os fenômenos ligados à sua estrutura. Alguns atributos do solo já são reportados na literatura, tais como a densidade do solo que mostra uma tendência de aumento nos primeiros anos de cultivo e, com o passar dos anos, apresenta uma tendência de diminuição da densidade, aumento da porosidade total e aumento no tamanho de agregados. Entretanto, muitas dúvidas sobre o sistema persistem, sendo necessário obter informações de outros atributos físicos.

A falta de critérios no dimensionamento e seleção dos equipamentos e tratores, por parte dos agricultores, resulta num acréscimo indiscriminado de peso e potência aliado às condições inadequadas de tráfego (alta umidade do solo), agravando ainda mais o problema de compactação do solo.

Os efeitos do tráfego no sistema de plantio direto são ainda pouco pesquisados e muitas dúvidas ainda persistem sobre a variação dinâmica da estrutura do solo e a interação desta com o tráfego de máquinas e equipamentos. Em alguns trabalhos constatou-se que grande parte da compactação ocorre logo após as primeiras passadas das máquinas na área e, os tráfegos posteriores, adicionam compactação ao solo somente com aumentos na carga aplicada em relação à carga anterior ou em teores de água do solo mais elevados. O conhecimento dos mecanismos e processos envolvidos nestas alterações possibilita aos técnicos tomarem decisões de manejo com o objetivo controlar as limitações devido a possibilidade de compactação do solo.

A utilização intensiva de máquinas agrícolas em todas as operações agrícolas (plantio, condução e colheita) tem promovido aumento da compactação, principalmente na zona de exploração do sistema radicular da planta. A principal razão desse fenômeno é a repetitividade das operações realizadas ao longo dos anos. Inúmeros autores sugerem que a compactação do solo seja identificada, através de atributos do solo, como a densidade do solo, distribuição de poros por tamanho, estabilidade de agregados em água e através da resistência do solo à penetração, com a finalidade de verificar a existência de camadas de maior resistência e o potencial para o desenvolvimento das raízes. Estes atributos tradicionalmente usados apenas identificam as camadas compactadas, sem entretanto, quantificar a capacidade de suporte de carga dos solos, que pode ser usado como um indicativo das pressões que as raízes precisam fazer para desenvolver.

As deformações ocasionadas pelo tráfego de máquinas constituem-se em fator determinante de modificações físicas no solo, podendo até mesmo, anular possíveis efeitos benéficos dos sistemas conservacionistas.

Desta forma, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito do tempo de adoção do sistema plantio direto, comparativamente com área de mata nativa e preparo convencional, usando os atributos físicos do solo e os modelos de compressibilidade do solo.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Plantio direto: histórico, experiências e expansão

A expressão plantio direto (PD) refere-se ao sistema de cultivo com interferência mínima no solo, preservando os resíduos de cobertura vegetal.

Na década de 30, cientistas da Estação Experimental de Rothamsted, nas proximidades de Londres, Inglaterra, observaram que as culturas cresciam muito bem sem a prática da aração e o solo melhorava sua estrutura, desde que livres das plantas daninhas (Schultz, 1978; Correia & Cruz, 1987). Desta forma o grande entrave para o novo sistema era o controle das plantas daninhas que foi solucionado em 1956, quando cientistas da Imperial Chemical Industries (ICI) na Inglaterra, descobriram o composto químico Paraquat (herbicida de contato com ação dessecante) (Schultz, 1978). Com a utilização do Paraquat e da primeira semeadora comercial Allis-Chalmers, houve um maior avanço nos estudos sobre plantio direto na América do Norte (Dick et al., 1991). Nas décadas de 60 e 70 o sistema se desenvolveu, permitindo a semeadura sem o revolvimento do solo, revolucionando a produção comercial de inúmeras culturas, em diferentes países e, em seguida, o sistema entrou numa fase de experiências e expansão.

No Brasil, a primeira referência ao cultivo mínimo, prática que preconizou o plantio direto, foi feita em dezembro de 1961, pelo Prof. Clibas Vieira e pelo

pesquisador Russel D. Frazier (Acordo Purdue University - Brasil) (Vieira & Frazier, 1961). Os autores descreviam sobre o sistema baseado nas experiências norte-americanas, caracterizando-o como uma nova técnica de agricultura com a redução do número de passadas do trator, com a aração e plantio sendo realizadas numa só operação.

As técnicas de preparo do solo predominantes no Brasil até o final dos anos 70, eram caracterizadas pela queima de palha e revolvimento do solo com o uso intenso de arado e de grade de discos. Desta forma o uso intensivo desse tipo de preparo levou a degradação de grandes áreas agrícolas (Fernandes, 1997).

Em 1972, o produtor Herbert Bartz, de Rolândia no Paraná, após convencimento por testes realizados por Rolf Derpsch da empresa GTZ (Agência de Cooperação Alemã) viaja aos EUA e Inglaterra e importa equipamentos de ambos os países e inicia o PD em 1972, constituindo a mais antiga referência em lavouras extensivas até o presente momento (Plataforma Plantio Direto, 2001).

Os primeiros experimentos foram implantados em 1971 e 1972 nos municípios paranaenses de Londrina e Ponta Grossa, por meio de um convênio entre o antigo Instituto de Pesquisas Agrícolas Meridionais (IPEAME) do Ministério da Agricultura e a empresa GTZ, de cooperação técnica do governo da Alemanha Ocidental, as quais receberam o apoio da ICI (Imperial Chemical Industries), posteriormente Zeneca e hoje Syngenta, que tinha interesse na comercialização de herbicidas (Derpsch, 1984; Borges, 1993) para experiências preliminares sobre efeitos do cultivo no crescimento de soja e trigo.

No ano de 1973 foram realizadas as primeiras experiências com PD no Rio Grande do Sul e no ano seguinte a ICI lançava o sistema para a sucessão trigo-soja no Norte e Oeste do Paraná. Em 1975 esse sistema estendia ao planalto do Rio Grande do Sul, sendo as primeiras experiências da ICI, em São Paulo, realizadas no município de Ribeirão Preto em 1976 (Muzilli, 1981).

A partir da década de 80, o plantio direto assume outra fase, quando foi introduzido o primeiro dos herbicidas modernos, o *glyphosate*, constituindo-se em importante propulsor do plantio direto. O sistema ganha impulso com a descoberta dos herbicidas sistêmicos (não seletivos e seletivos), garantindo maior eficiência no controle de plantas daninhas, e a melhoria de alternativas de semeadoras e com maiores opções culturais para cobertura do solo, aumentando a proteção contra a erosão (Saturnino & Landers, 1997).

No início da década de 80, com as experiências do sul do país, ocorre a introdução do plantio direto no cerrado, sendo as primeiras experiências registradas com o agricultor Eurides Penha no município de Rio Verde - GO no ano de 1981, numa área de 200 hectares de soja sob palhada de soja, para posteriormente testar outras metodologias (Landers, 1994).

A maior evolução do plantio direto no cerrado se deu na década de 90, com as opções de seqüências de cultivo e rotações de culturas, usadas como alternativas de culturas de inverno (safrinha) em função da adversidade climática (Saturnino, 2001).

Atualmente, segundo Derpsch (2000), o plantio direto no mundo vem crescendo num ritmo bastante acelerado. Os Estados Unidos lideram, com uma área cultivada de 19,75 milhões de hectares e o Brasil está em segundo lugar com mais de 13,0 milhões de há, com uma taxa de adoção de 25% em relação a área total cultivada, mostrando um grande espaço para o crescimento do sistema.

4.2 Compactação do solo e tráfego de máquinas

Nas últimas três décadas, houve um aumento da intensidade de uso do solo e da mecanização, principalmente com as operações de aração e gradagem, com conseqüente degradação da estrutura original do solo. A ação dos elementos ativos dos equipamentos de preparo de solo causam modificações, seja pulverizando os horizontes superficiais ou promovendo a compactação mecânica dos horizontes subsuperficiais (pé de grade/pé de arado).

A modernização da agricultura, e a utilização mais intensa de máquinas agrícolas, provocou mudanças nos atributos físicos do solo. Diversas pesquisas, realizadas em várias regiões do país, revelam que estão ocorrendo alterações significativas nas condições físicas de alguns solos, em virtude do tráfego contínuo de máquinas pesadas e do uso frequente de equipamentos agrícolas em dias em que os níveis de água do solo são muito elevados (Jorge, 1983; Taylor & Beltrame, 1980). Essas alterações referem-se ao decréscimo da porosidade (principalmente a macroporosidade ou porosidade de aeração) e da permeabilidade e ao aumento da compactação em relação às condições originais. Essas

alterações, dependendo da intensidade, podem afetar o crescimento do sistema radicular das culturas, com reflexos negativos no rendimento das colheitas (Fernandes & Galloway, 1987).

Um solo é considerado agronomicamente compactado quando a proporção do volume total de poros em relação ao volume do solo é inadequada ao máximo desenvolvimento de uma cultura ou manejo eficiente do campo (Mantovani, 1987). Atributos do solo, tais como a porosidade, densidade do solo e resistência à penetração tem sido usados para avaliar a compactação. O atributo mais usado para se determinar a compactação do solo é a obtenção da densidade do solo. Segundo o mesmo autor, a porosidade é o termo de maior expressão para se utilizar quando se relaciona com compactação do solo, pois fornece uma descrição direta da proporção de volume do solo disponível para a água e ar necessários às raízes das plantas.

O comportamento diferenciado de classes de solos, quando submetidos à compactação, é explicado por possuírem características diferentes, destacando-se, entre elas, a granulometria e o teor de matéria orgânica. Para Mantovani (1987), solos constituídos por partículas de mesmo tamanho, são menos susceptíveis ao processo de compactação, comparados àqueles onde há mistura de areia, silte e argila. Isto se deve ao fato de as partículas de tamanho diferentes se arranjam e preencherem os poros do solo, quando submetido a uma pressão externa.

De acordo com Beltrame & Taylor (1980) e Mantovani (1987), a intensa utilização de máquinas e equipamentos agrícolas necessárias no manejo do solo e um acréscimo indiscriminado de peso e de potência dos tratores utilizados, sem uma devida seleção, tem contribuído para um aumento das áreas com problemas de compactação do solo.

A compactação em solos agrícolas pelo tráfego de máquinas nas diferentes operações de preparo do solo, semeadura, tratos culturais e colheita é constatada em diversos trabalhos (Tormena & Roloff, 1996; Flowers & Lal, 1998; Dias Junior et al., 1999 e Silva et al., 2000b). O comportamento do solo, devido à aplicação de carga na superfície, depende das características do rodado e das propriedades físicas do solo. Forças verticais (carga sobre as rodas) e forças horizontais (devido ao movimento das rodas) são transmitidas pelo rodado ao solo. A pressão de inflação e o tamanho do rodado controlam a distribuição das forças sobre a área de contato com o solo, que é também influenciada pela sua capacidade de

suporte de carga. As forças na interface pneu-solo e a capacidade de suporte de carga do solo controlam a magnitude e a distribuição das tensões no solo sob as rodas (Soane et al., 1981).

Em estudo na Rússia, com equipamentos dotados com diferentes rodados, Rusanov (1991) observou diferenças na produtividade das culturas em decorrência do tipo de rodado utilizado nos tratores. O autor constatou que o trator equipado com rodado tipo esteira, com massa de 6,5 Mg e pressão de contato no solo de 0,05 MPa, ocasionou uma redução de 11% na produtividade das diversas culturas, enquanto que os tratores equipados com pneus convencionais com massa de 7,5 Mg e 11,8 Mg e pressão de contato de 0,08 MPa e 0,18 MPa, causaram, respectivamente redução de 20 a 25%.

O uso de pneus radiais com pressão baixa correta vem sendo sugerido como uma medida de redução da pressão de contato com o solo e, portanto, na redução da compactação do solo (Lanças & Upadhyaya, 1997).

Estudando a interação entre características do pneu e propriedades do solo, Perdok & Arts (1987) afirmaram que a capacidade de carga do pneu é altamente dependente de suas dimensões (largura e diâmetro), da pressão de inflação e do tipo de pneu (radial e diagonal). O efeito do aumento da largura do pneu em reduzir a deformação somente é obtido se a pressão de inflação do pneu é reduzida para um valor mínimo permitido. Analisando dois pneus, cada um suportando uma carga de 30 kN, um deles com largura de 0,44 m e inflado a 200 kPa e o outro com 0,54 m de largura e inflado a 100 kPa, os mesmos autores constataram que a menor deformação do solo (menor profundidade do sulco) ocorreu com o pneu mais largo e com menor pressão de inflação.

A pressão de contato pneu-solo e o número de passadas de rodados são os principais fatores causadores da compactação na camada arável do solo (0-50 cm), podendo ser minimizada por meio da utilização de baixa pressão de inflação dos pneus. Atualmente, cargas no eixo acima de 100 kN, somente são aceitáveis se usadas baixas pressões nos pneus. Uma carreta agrícola com peso de 300 kN, pressão de contato pneu-solo de 100 kPa, pneus largos com baixa pressão de inflação e/ou por montagem de rodas em eixos duplos ou triplos não causam compactação excessiva na camada superficial (Tijink et al., 1995).

Em um experimento com tráfego de trator sob dois níveis de umidade, Novak et al. (1992) observaram que, quando se considera somente a variável número de passadas, a repetição da passagem de carga sobre o solo, torna maior o efeito da compactação.

Ainda os mesmos autores verificaram que, principalmente, nos tratamentos com 15 passadas, as mudanças na densidade do solo em relação à densidade inicial chegam a profundidades mais elevadas do que as que normalmente são obtidas pelos implementos de preparo do solo, e, possivelmente, com o passar dos anos, esses valores podem chegar a níveis prejudiciais ao crescimento e desenvolvimento radicular. Esses autores encontraram maiores valores de densidade do solo, quando as pressões de contato pneu-solo foram maiores (maiores pressões de inflação), sugerindo que, para evitar a compactação, deve-se trabalhar com pressões de contato menores.

O trabalho com máquinas, quando o solo se encontra com um teor de água excessivo, e pela adesão do solo nos rodados, dificulta as operações de preparo, tratos culturais e colheita, pela baixa eficiência de tração, causada pela alta patinagem dos tratores. Para adequá-la a limites aceitáveis e para que possa ser desenvolvida uma velocidade operacional adequada, tem sido utilizados tratores de grande potência e peso. Grande parte dessa potência do trator pode estar sendo desperdiçada pela patinagem, além do aumento de peso contribuir para majorar a deformação do solo. Além dos efeitos negativos do preparo do solo, na operação de colheita, as colhedoras trafegam com elevada carga, contribuindo para que uma compactação adicional ocorra (Mantovani, 1987).

A presença de compactação na camada arável é determinada principalmente pela pressão de contato pneu-solo. Enquanto na subsuperfície, é determinada pela propagação das tensões aplicadas na superfície do solo. Em vista disso, a principal medida para minimizar a compactação do subsolo seria "limitar" a carga no eixo e/ou restringir as operações de campo para que sejam realizadas somente em períodos secos, pois é fundamental evitar, sempre que possível, o tráfego em condições de umidade excessiva do solo (Håkansson & Reeder, 1994).

No sistema de plantio direto o revolvimento do solo é restrito à linha de semeadura e no entanto, o tráfego ocorre normalmente em toda extensão da área, resultando num aumento da compactação do solo, principalmente em superfície.

Num experimento em Latossolo Roxo distrófico, Sidoras & Vieira (1984) estudaram o efeito dos rodados do trator em três sistemas de preparo durante a semeadura. Nas faixas compactadas (sob rodas), observou-se uma redução na infiltração de água, maiores valores de densidade do solo e capacidade de retenção de água. Os autores

concluíram que as condições criadas pelo revolvimento da camada arável não foram as mais favoráveis para a produção de culturas e que a obtenção de melhores relações ar-água em toda a superfície do solo poderiam trazer aumentos de produtividade. Entretanto, a compactação da camada de sementeira pode ser limitante no processo de germinação das sementes, contribuindo, por sua vez, para reduções da produtividade.

Segundo Håkansson & Voorhees (1996), verificar os efeitos da compactação nas propriedades do solo pode ser relativamente fácil, mas a determinação dos efeitos da compactação no crescimento de plantas é difícil, devido ao elevado grau de interação entre os vários fatores do solo e a dinâmica do ambiente. Além disso, diferentes plantas e até mesmo diferentes variedades têm diferentes capacidades em desenvolverem-se em solos compactados.

Na avaliação dos efeitos do tráfego de máquinas no solo, vários fatores devem ser levados em conta para que os possíveis efeitos, em cada situação particular possam ser analisados com segurança. As características iniciais do solo em função de sua condição estrutural, são determinantes nas futuras modificações da compactação do solo. Assim, o conhecimento do histórico da área, se possível desde sua implantação, torna-se um pré-requisito fundamental no planejamento das ações de seu uso e manejo (Tormena, 1996).

A literatura demonstra que grande parte da compactação ocorre logo após as primeiras passadas de máquinas na área e que os tráfegos posteriores adicionam compactação ao solo somente com aumentos na carga aplicada ou na umidade do solo. Em experimento realizado por Coleti & Demattê (1982), com emprego de chuva simulada, foi observado que aproximadamente 50 a 60% da compactação ocorreu com as primeiras passadas do maquinário.

Para Trein & Bergamaschi (1998), a influência da compactação do solo no estabelecimento, desenvolvimento e rendimento do milho é dependente de interações complexas entre a cultura, o tipo de solo e condições meteorológicas. Em revisões bibliográficas sobre o assunto, resultados conflitantes são encontrados sobre esse tema. Soane 1985, citado por Trein & Bergamaschi (1998) resumiu a situação dizendo que para cada cultura, solo e estação climática existe um nível de compactação ótimo para um maior rendimento. Olu & Folunso (1989) corroboram esta afirmação através de experimento com níveis de compactação (obtido por passadas de trator) e rendimento de grãos de sorgo, onde,

com poucas passadas de trator (e, portanto, compactação leve) obtiveram melhores rendimentos do que no solo sem compactação nenhuma. Os mesmos autores, porém, acharam rendimentos decrescentes com o aumento do número de passadas do trator.

De acordo com Fernandes & Galloway (1987), a distribuição da pressão no solo, devido a compressão exercida pelas rodas das máquinas depende da carga, que determina a pressão total; da extensão da área de contato do pneu com o solo, que resulta a pressão específica (peso por unidade de área); da distribuição da pressão na área de contato; do teor de água e da densidade do solo. A compactação é consideravelmente acentuada nas áreas de contato das garras dos pneus com o solo, enquanto que o efeito da compactação em profundidade depende do estado inicial da estrutura do solo e do teor de água.

Analisando diferentes manejos de solo, Klein & Boller (1995) constataram maior compactação no tratamento com plantio direto na camada superficial de 0-5 cm, atribuindo-a à consolidação natural do solo nesse sistema, somado ao efeito cumulativo do tráfego de máquinas e implementos agrícolas sobre a superfície do solo. Nos tratamentos que envolveram mobilização do solo, essa compactação superficial foi rompida pelas operações de preparo do solo e a densidade do solo foi significativamente menor.

Em estudo com tráfego controlado em sistema convencional e plantio direto, Daniel et al. (1993), concluíram que a resistência à penetração mostrou-se ser um parâmetro interessante para localizar e mensurar camadas compactadas. O sistema de plantio direto apresentou, em todas as condições avaliadas pelos autores anteriormente citados, valores superiores de resistência do solo à penetração.

Avaliando o tráfego de trator e colhedora sob plantio direto, Tormena & Roloff (1996) observaram que ambos os equipamentos promoveram aumentos na resistência do solo à penetração, de forma significativa até 20 cm de profundidade e que a resistência à penetração demonstrou ser um bom parâmetro para avaliar os efeitos dos tratamentos, refletindo de maneira sensível as alterações ocorridas na estrutura do solo.

Alternativas para minimizar o efeito do tráfego vem sendo buscadas por diversos autores. Para Magalhães (1990) e Al-Adawi & Reeder (1996), o controle do tráfego é uma alternativa que parece estar passando das pesquisas para tornar-se acessível aos agricultores. O controle do tráfego consiste em um sistema de produção no qual a área reservada para produção e as linhas destinadas ao tráfego de veículos são distintas e

permanentemente separadas. Desta forma a separação das zonas de tráfego das linhas cultivadas promove a minimização da compactação nas áreas cultivadas.

4.3 Métodos para avaliar a compactação do solo

4.3.1 Ensaio de Proctor normal

Para o estudo da compactação do solo, vários ensaios de laboratório tem sido utilizados, entre eles, o ensaio de Proctor normal, desenvolvido por Ralph. R. Proctor em 1933 (Dias Junior, 1996).

No ensaio de Proctor, segundo Vargas (1977), a densidade do solo depende da sua umidade no instante da compactação, para uma mesma energia de compactação. Com os diferentes valores obtidos de umidade e densidade do solo, traça-se a curva de compactação (umidade gravimétrica versus densidade do solo), obtendo-se assim a umidade ótima ou crítica de compactação e a densidade do solo máxima.

A curva de compactação do solo, é afetada por vários fatores, dentre eles, a energia de compactação e fatores de solo tais como a textura, a umidade e a matéria orgânica (Silva et al., 1986). Solos com pequena variação no tamanho de suas partículas são menos susceptíveis ao processo de compactação, em comparação com aqueles que apresentam grande variação de tamanho de suas partículas, se rearranjam e preenchem os poros do solo quando submetidas a uma pressão (Mantovani, 1987).

A energia de compactação utilizada no ensaio de Proctor normal é equivalente em torno de 15 passadas de um trator com 0,727 t por roda (pressão de 140 kPa) em solo franco-arenoso (Raghavan et al., 1976), e segundo Vargas (1977) é semelhante à passagem de cerca de 12 vezes de um pé-de-carneiro leve (5 a 7 t) sobre uma camada de 30 cm de espessura.

A influência da matéria orgânica na curva de compactação é importante, devido ao seu alto poder de absorção de água, o que dificulta a compactação do solo (Silva et al., 1986; Dias Junior, 2000); por promover melhorias na estrutura do solo (Stone e Ekwue, 1993) e apresentar menor densidade que a do solo (Ekwue e Stone, 1995).

Estudos envolvendo o ensaio de Proctor normal no Brasil com aplicação na área agrícola ainda é incipiente. Poucos são os trabalhos, relacionando atributos do solo com os resultados do ensaio (Silva et al., 1986; Novak et al., 1992; Mantovani et al., 1992; Carpenedo, 1994; Itaborahy et al., 1997; Figueiredo et al., 2000; Dias Junior e Estanislau, 1999; Dias Junior e Miranda, 2000; Santos, 2001).

A utilização do ensaio de Proctor para fins agrícolas, segundo Mantovani et al., (1992) sugere-se que ao se dimensionar as máquinas e estabelecer o cronograma de utilização das mesmas, seja levada em consideração a curva de compactação do solo, enquanto que Dias Junior & Estanislau (1999) avaliando o efeito do grau de compactação na curva característica de água no solo encontraram diminuição da água disponível para os diferentes solos e condições de manejo estudados.

Segundo Dias Junior (1996), o ensaio de Proctor é de fácil determinação, limitado para o estudo da compactação de solos, pois para sua realização é necessário a destruição da estrutura, que apaga a história de tensão do solo.

Avaliando o efeito de diferentes graus de compactação e adubação fosfatada no crescimento do milho (*Zea mays* L), em três solos de diferentes textura (Santos, 2001) concluiu que quanto maior o grau de compactação, maiores terão que ser as doses de fósforo aplicadas, para uma produção satisfatória. Foi observado ainda que o fósforo aplicado funciona como um fator de alívio da compactação do solo, resultando em uma maior produção para um mesmo grau de compactação.

O grau de compactação ou compactação relativa que é o resultado da divisão da densidade do solo, obtida por amostragem no campo, pela densidade do solo máxima obtida no ensaio de Proctor, recentemente tem sido utilizado para expressar mais adequadamente a relação solo-planta, por representar o grau de consolidação dos constituintes do solo (Lipiec et al., 1991).

Os valores do grau de compactação são expressos em porcentagem, e segundo Linstrom & Voorhess (1994), valores acima de 86%, são considerados elevados e causam efeitos prejudiciais ao desenvolvimento e rendimento das culturas, devido aos aumentos de densidade do solo, diminuição da macroporosidade e alterações em outros atributos do solo como condutividade hidráulica, permeabilidade e resistência à penetração. É importante ressaltar que o efeito da compactação é variável entre os anos, associado com o

regime hídrico do solo. Torres & Saraiva (1999) observaram que nos anos de melhor distribuição de chuvas o efeito da compactação sobre a produtividade da soja foi minimizado, enquanto que nos anos mais secos a compactação afetou negativamente a produtividade da soja com valores do grau de compactação de 84% a 87%. Segundo Linstrom & Voorhees (1994), em revisão sobre o assunto encontraram que valores do grau de compactação (< 80%) podem afetar negativamente a produtividade de algumas culturas, devido à redução da capacidade de armazenamento de água, causada pelo aumento excessivo da quantidade de macroporos e diminuição do movimento capilar de água no solo. Dados que corroboram com o exposto foram relatados por Torres & Saraiva (1999), que constataram na cultura do trigo diminuição na produtividade, principalmente nos anos mais secos, ocasionadas pelo aumento da macroporosidade e redução do armazenamento de água. Assim as condições locais (solo, clima) e o tipo de cultura podem apresentar valores diferentes do grau de compactação prejudiciais para cada situação de ambiente.

4.3.2 Ensaio de compressibilidade do solo

O estudo da compactação do solo em áreas agrícolas envolvendo parâmetros físico-mecânicos (Kondo & Dias Junior, 1999a), tem assumido grande importância, devido a possibilidade de avaliar conjuntamente a suscetibilidade do solo, a compactação e o momento ideal para execução das operações mecanizadas.

A influência dos sistemas de manejo afetando atributos do solo que influenciam o comportamento compressivo são conhecidos, tais como a matéria orgânica (Stone & Ekwue, 1995), a estrutura (Horn et al., 1988), a umidade e a densidade do solo (Dias Junior, 1994).

A umidade é o fator que determina a quantidade de deformação que poderá ocorrer no solo. Em condição de solo seco, sua capacidade de suporte de carga é elevada, podendo ser suficiente para suportar as pressões aplicadas e a compactação do solo pode não ser significativa (Dias Junior, 1994), entretanto em condições de alta umidade o solo fica suscetível a compactação devido a sua baixa capacidade de suporte de carga.

A pressão de preconsolidação (σ_p) tem sido usada como uma estimativa da capacidade de suporte de carga dos solos agrícolas (Dias Junior & Pierce, 1996).

A σ_p é obtida a partir das curvas de compressão do solo, através da utilização do método gráfico proposto por Casagrande (1936), ou através de planilha eletrônica proposta por Dias Junior & Pierce (1995).

A proposição do método de Casagrande é baseada na escolha visual do ponto de menor raio ou de máxima curvatura da curva de compressão do solo. Observações verificadas em alguns trabalhos relatam que à medida que aumentam as perturbações na amostra indeformada (Holtz & Kovacs, 1981), ou em condição de alta umidade (Dias Junior & Pierce, 1995) torna-se difícil a escolha do ponto de menor curvatura, em razão das curvas de compressão tenderem a ficarem lineares, apresentando grande subjetividade. Já o método baseado em planilha eletrônica proposto por Dias Junior & Pierce (1995) reduz a probabilidade de erro durante a determinação, apresentando confiabilidade, repetitividade e facilidade de utilização.

A pressão de preconsolidação divide a curva de compressão em duas regiões, sendo uma de deformações pequenas, elásticas e recuperáveis (curva de compressão secundária), e em uma outra região onde ocorre as deformações plásticas e não recuperáveis (curva de compressão virgem) (Holtz & Kovacs, 1981; Dias Junior & Pierce, 1995).

A pressão de preconsolidação representa a maior pressão que o solo foi submetido no passado (Casagrande, 1936), sendo portanto um indicativo de sua história de tensão (Dias Junior, 1994).

A história de tensão do solo reflete o tipo de manejo pelo qual o solo foi submetido (Dias Junior & Pierce, 1996) e o comportamento compressivo do solo é afetado pela sua história de tensão e principalmente pela variação do teor de água do solo (Dias Junior, 1994). Assim sendo, o entendimento do comportamento compressivo do solo utilizando as curvas de compressão adquire uma grande importância em razão de serem elas a base, do ponto de vista físico, para a tomada de decisão do manejo mais adequado, reduzindo-se os efeitos prejudiciais originados pelo processo de compactação do solo.

Em situação em que o solo não sofreu nenhuma pressão prévia, sua curva de compressão é linear e qualquer pressão aplicada resultará em deformações não

recuperáveis (Dias Junior & Pierce, 1996). Em situações em que o solo já experimentou pressões prévias, ou seja, já tenha uma história de tensão, as deformações resultantes, poderão ser recuperáveis ou não recuperáveis (Stone & Larson, 1980; Holtz & Kovacs, 1981; Dias Junior & Pierce, 1996).

É na região da curva de compressão secundária, conforme Dias Junior & Pierce (1996), que o solo deve ser cultivado ou trafegado, sem que ocorra compactação adicional, sendo este o componente da curva de compressão que reflete a história de tensão do solo e que vem sendo usado na modelagem da capacidade de suporte de carga por Dias Junior (1994) e Kondo & Dias Junior (1999a). Assim a maior pressão que deve ser aplicado ao solo para evitar a sua compactação é a pressão de preconsolidação (Dias Junior, 1994).

Dias Junior (1994) propôs um modelo exponencial que estima a capacidade de suporte de carga dos solos em função dos valores da pressão de preconsolidação e da umidade, sendo:

$$\sigma_p = 10^{(a+bU)} \quad (1)$$

onde:

σ_p = pressão de preconsolidação (kPa);

a e b = parâmetros de ajuste da equação de regressão;

U = umidade gravimétrica (kg kg^{-1}).

O modelo proposto por Dias Junior (1994) tem sido utilizado para quantificar os níveis de pressão que podem ser aplicados aos solos para evitar que ocorra compactação adicional em diferentes sistemas de manejo e culturas, entre os quais solos sob culturas anuais e pastagem (Kondo & Dias Junior, 1999a), eucalipto (Dias Junior et al., 1999), café (Miranda, 2001), sistemas de manejo no cerrado (Oliveira, 2002; Silva, 2002) e para determinação de dias trabalháveis (Castro Neto, 2001).

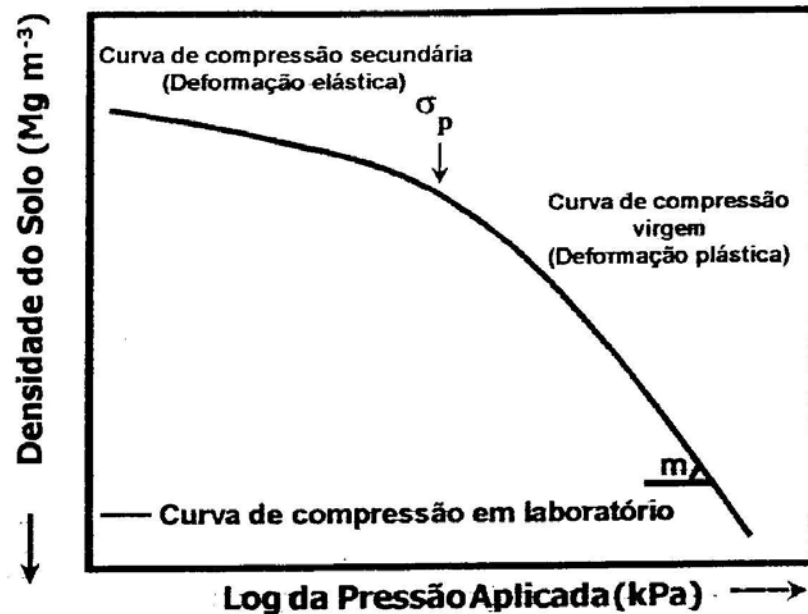


Figura 1. Exemplo de curva de compressão do solo (Dias Junior, 1994).

A representação gráfica da curva de compressão do solo corresponde a relação entre o logaritmo da pressão aplicada e algum parâmetro relacionado com o arranjo de partículas e/ou agregados do solo, sendo a densidade do solo a mais utilizada (Dias Junior, 2000).

A partir da curva de compressão (Figura 1), determina-se o índice de compressão (m), estimado como sendo a inclinação da reta de compressão virgem (Bradford & Gupta, 1986) e pode ser utilizado como uma medida da susceptibilidade do solo à compactação (Kondo & Dias Junior, 1999a). Quanto maior o seu valor, maior será a inclinação da reta de compressão virgem e mais suscetível o solo será à compactação. O valor de m varia com a umidade do solo, apresentando a seguinte forma geral:

$$m = a + bU + cU^2 \quad (2)$$

Onde:

m = índice de compressão (Mg m^{-3});

a , b e c = parâmetros de ajuste da equação de regressão;

U = umidade gravimétrica do solo (kg kg^{-1}).

O estudo do processo de compactação do solo no Brasil, com o uso da curva de compressão em sistemas agrícolas, ainda é incipiente, havendo poucas informações nesta área. Macedo (1993), determinou a compressibilidade de um Podzólico Vermelho Escuro em condições de degradação e recuperado nas tensões de água entre 25 e 500 kPa, utilizando o ensaio de compressão confinada. Avaliou neste estudo a curva de compressão do solo e a resistência à penetração, e observou que não ocorreu diferença entre as condições estudadas. Em outro trabalho, Carpenedo (1994) estudou a compressibilidade de um Podzólico Vermelho Escuro (PE), Podzólico Vermelho-Amarelo (PV) e um Latossolo Roxo, sob diferentes sistemas de manejo e com diferentes graus de compactação, concluiu que os graus de compactação diferenciaram-se apenas no Podzólico Vermelho-Escuro. Já a pressão de preconsolidação foi afetada pelos manejos nos PE e PV, observando valores mais altos nas áreas sob sistema plantio direto.

Kondo & Dias Junior (1999a), em estudo, analisando a compressibilidade de solos sob diferentes usos, constataram que solos sob a condição de cultura anual são mais suscetíveis à compactação, do que aqueles sob mata natural e pastagem, devido à sua menor capacidade de suporte de carga para uma mesma faixa de umidade.

Maiores σ_p em áreas sob plantio direto em comparação ao sistema convencional foram observadas por diversos autores, entre os quais, Reinert (1990), Carpenedo (1994), Dias Junior (1994), Silva et al. (2002), Oliveira (2002). Dias Junior (1994) relata que o fato do sistema plantio direto suportar níveis de pressões mais elevados, constitui uma vantagem em relação a sua trafegabilidade.

Avaliando o efeito sob sistema de plantio direto e manejo convencional, em um Podzólico Vermelho Escuro e um Latossolo Vermelho Escuro, Silva (1999) observou que a pressão de preconsolidação aumentou de forma exponencial com o aumento da densidade inicial do solo, dentro de cada classe de grau de saturação, e na mesma classe de densidade inicial do solo, os valores de pressão de preconsolidação decrescem de forma logarítmica com o aumento do grau de saturação. O índice de compressão foi inversamente proporcional à densidade inicial do solo e pouco influenciada pelo grau de saturação inicial. A suscetibilidade do solo à compactação mostrou comportamento diferente para cada tipo de solo.

Avaliando a sustentabilidade da estrutura de um Latossolo cultivado com cafeeiro na região dos cerrados, Miranda (2001) encontrou diferenças entre os sistemas avaliados, onde o café irrigado apresentou maior suscetibilidade a compactação do solo do que o cafeeiro no sistema convencional e o autor ainda constatou a importância da água e o preparo do solo como fatores de alívio da compactação do solo.

4.3.3 Resistência do solo à penetração

A penetrometria é considerada um método apropriado para avaliar a resistência à penetração de raízes no solo, segundo (Bengough & Mullins, 1990), mesmo considerando as diferenças marcantes existentes entre um raiz e um cone metálico. O ideal é a mensuração da resistência real encontrada pelas raízes realizada através de métodos precisos, como a densidade do solo e percentagem de macroporos, entretanto, as dificuldades práticas têm levado os pesquisadores a utilizar o penetrômetro em sua investigação. A facilidade e a rapidez na obtenção dos resultados, além da possibilidade de um maior número de repetições, são as principais vantagens do uso do penetrômetro. A resistência à penetração, medida com penetrômetro, expressa como índice de cone, é a relação entre a força exercida para fazer penetrar um cone metálico no solo e sua área basal (Bradford, 1986).

A resistência do solo à penetração de um penetrômetro é um indicador intermediário da compactação (Lanças, 1996), não sendo medição física direta de qualquer condição do solo. Esta é afetada por outros fatores além da compactação, sendo a mais importante o teor de água do solo (Mantovani, 1987). Por esta razão só permite comparações entre solos de mesma textura e com a mesma umidade.

A utilização crescente deste método, deve-se a sua rapidez e facilidade de amostragem, que permite a análise de grandes áreas, e pela alta correlação encontrada entre a resistência à penetração do solo e o crescimento das raízes.

Nas últimas décadas muitos são os trabalhos procurando correlacionar dados de resistência à penetração com parâmetros físicos do solo, principalmente com a densidade do solo.

Segundo Materechera et al. (1991), os níveis críticos de resistência à penetração para o crescimento das plantas são variáveis com o tipo de solo, equipamento utilizado e com a espécie cultivada. Valores críticos experimentais e aqueles citados na bibliografia são divergentes.

Apesar de a resistência ser afetada pela textura, densidade do solo e conteúdo de água, Canarache (1990) sugere que valores acima de 2,5 MPa começam a restringir o pleno crescimento das raízes das plantas. Para Torres & Saraiva (1999), em experimentos com soja em Latossolos Roxo, observaram valores de resistência em torno de 2,5 MPa (solo na consistência friável) como baixos para promover restrição no crescimento do sistema radicular. Enquanto que resistências entre 3,5 a 6,5 MPa, consideram possíveis problemas de impedimento mecânico. As resistências de 3,5 MPa indicam baixo índice de compactação e 6,5 MPa como alto. Alguns autores, no entanto, têm adotado um índice de cone de 1,0 MPa como crítico, mas não impeditivo, ao crescimento de raízes no solo (Henderson, 1989; Gerard et al., 1972). É importante lembrar que os resultados de índice de cone, só permite comparações para o mesmo tipo de solo e com o mesmo teor de água.

Avaliando o efeito da umidade do solo na resistência à penetração em Latossolo Roxo, Klein et al. (1998) observaram que na tensão de 8 kPa (teor de água na capacidade de campo), a camada adensada não foi detectada, enquanto nas tensões maiores os valores de resistência superaram a resistência limitante de 2 MPa. Outros autores obtiveram resultados diferentes, e constataram que não se permite a obtenção da resistência sob baixos teores de água no solo e que a resistência seja medida com teores de água próximos à capacidade de campo, situação em que se consegue uma boa correlação entre a densidade do solo, a resistência à penetração e o crescimento radicular (Mata, 1988; Henderson, 1989).

Contrariando a recomendação de trabalhos mais antigos, não é recomendável a determinação da resistência à penetração quando o solo se encontra na capacidade de campo ou próximo dela, pois a água diminui a capacidade de detecção das diferenças existentes nos resultados obtidos. A razão é que os equipamentos utilizados anteriormente eram manuais e não possibilitavam a obtenção de dados em solos com baixo teor de água, em função do limite de força do operador. Para comprovar esta recomendação, Guerra et al. (2000) constataram a influência do teor de água na determinação do índice de cone, sendo que a presença da água inibiu a diferenciação da compactação pelo efeito

lubrificante que provoca no solo, deixando-o muito plástico, e facilitando a penetração da haste, indicando que, para uma melhor sensibilidade dos efeitos da carga, deve-se tomar os dados de resistência à penetração com o solo relativamente seco.

Em experimento realizado em um Latossolo Roxo do norte do Paraná em área cultivada com soja, Torres & Saraiva (1999) observaram o efeito da variação da umidade do solo, sobre o da resistência à penetração. Na densidade de $1,33 \text{ g/cm}^3$, a resistência à penetração foi de 1,5 MPa, quando a umidade do solo estava em torno de 37% e de 16 MPa, quando a umidade estava em torno de 21%, evidenciando a grande variação da resistência com a mudança dos teores de água. Este fato pode induzir a erros de interpretação, principalmente, se forem consideradas resistências acima de 3,5 a 6,0 MPa, como sendo as que podem prejudicar o desenvolvimento das culturas. Os mesmos autores observaram também que quando o solo se encontrava com a consistência dentro do intervalo plástico, o que se verificou logo após um chuva, os valores de resistência à penetração obtidos com penetrômetro foram semelhantes e não caracterizaram as diferenças de compactação existentes entre os tratamentos. As avaliações feitas no solo dentro da faixa de friabilidade, umidade em torno de 27 a 29%, foram as mais adequadas para caracterizar as diferenças entre as densidades estudadas.

Nas determinações da resistência do solo à penetração, em razão da grande influência do teor de água, considera-se que é um pouco temerário utilizar somente as avaliações feitas com penetrômetro e, em termos absolutos, definir se um solo está ou não compactado. É importante que os resultados obtidos devem ser inseridos em um contexto maior de avaliação da compactação, contemplando, além do uso correto do equipamento (numa mesma condição de umidade, dentro da faixa de friabilidade do solo), o histórico de produtividade da propriedade em diferentes glebas e abertura de trincheiras para a verificação do sistema radicular (Torres & Saraiva, 1999).

Com a adoção crescente do sistema plantio direto em diferentes regiões a compactação do solo é um assunto bastante estudado e debatido. Entretanto, para que a compactação do solo não inviabilize a adoção e expansão do sistema plantio, deve-se fazer um acompanhamento mais rigoroso, adotando metodologias padrões para que se tenha um melhor diagnóstico e dimensionamento de sua real importância.

4.4 Influência do manejo e do tempo de adoção no sistema plantio direto nos atributos físicos do solo

Os diferentes sistemas de manejo promovem efeitos nas propriedades físicas do solo, verificando-se um aumento da densidade do solo e diminuição da porosidade, da infiltração e da condutividade hidráulica, quando os solos são submetidos a diferentes sistemas de manejo, em relação ao seu estado natural (Machado & Brum, 1978; Anjos et al. 1994).

A condutividade hidráulica do solo saturada é considerada um parâmetro de grande utilidade na diferenciação dos efeitos de sistemas de preparo na movimentação de água no perfil. A compactação do solo e a descontinuidade dos poros reduz significativamente a condutividade hidráulica.

O sistema plantio direto, por apresentar um sistema permanente de bioporos e canais deixados por raízes que apodrecem, permite uma melhor situação de drenagem (Boone, 1988). Arzeno (1990) obteve valores de condutividade hidráulica do solo saturado nos sistemas plantio direto e escarificador cerca de duas vezes maior que no sistema de plantio convencional em Latossolo Roxo.

Diversos trabalhos experimentais relatam os efeitos benéficos dos sistemas conservacionistas no melhoramento das propriedades físicas do solo. Segundo Bragagnolo & Mielniczuk (1990), a cobertura do solo com plantas ou seus resíduos, reduz a temperatura máxima do solo e as perdas de água por evaporação. Em outro trabalho, Silva (1986) relata que os resíduos de culturas também proporcionam um aumento na taxa de infiltração de água no solo.

Vários trabalhos reportam as maiores velocidades de infiltração no sistema plantio direto em relação ao convencional (Derpsch et al., 1986; Roth et al., 1988; Arzeno, 1990; Castro, 1995). A cobertura vegetal também melhora ou mantém a capacidade de infiltração de água no solo, pois, reduzindo o efeito de sua desagregação, evita o selamento superficial provocado pela obstrução dos poros através das partículas finas desagregadas (Castro et al., 1987).

A influência do tráfego acumulado sob área de plantio direto, promovendo alterações nas propriedades físicas do solo são relatados por diversos trabalhos.

A compactação do solo altera o padrão de crescimento das raízes pelo aumento da resistência do solo e decréscimo na porosidade do solo (Tormena, 1996). Desta forma modificações na estrutura do solo podem levar à uma redução no conteúdo de água disponível e/ou má aeração (Voorhees, 1983), com consequência direta sobre a produtividade das culturas.

Em estudo em área de cerrado conduzida por duas décadas no sistema plantio direto, Oliveira (2002) observou que o tráfego de máquinas e a ausência de revolvimento, promoveu alterações significativas na estrutura do solo, principalmente na macroporosidade na profundidade de 0-5 cm.

Em área de Latossolo Vermelho-Escuro, Albuquerque et al. (1995) constataram que ao final de 7 anos não ocorreram diferenças de densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade entre o sistema plantio direto e o preparo convencional.

Em estudo em área sob plantio direto, Hill et al. (1985) encontraram que o teor de água no solo, para dado potencial matricial, é maior no sistema de manejo conservacionista, quando comparado ao manejo convencional, em razão da maior quantidade de poros, que são responsáveis pela retenção de água no solo.

O aumento no teor de matéria orgânica em sistemas conservacionistas é explicado pela redução na taxa de decomposição dos materiais orgânicos frescos e húmus adicionados por cultivos anuais e seu conseqüente acúmulo são obtidos pela diminuição do revolvimento do solo e pela adição de suficiente montante de carbono orgânico para que o balanço anual desse elemento seja positivo. Essas condições são favorecidas principalmente pelo manejo em sistema de plantio direto, onde estão inseridos os componentes: plantas de cobertura e adubos verdes, rotação de culturas e acúmulo constante de palhadas na superfície do solo (Calegari, 2000).

A matéria orgânica é o principal componente para melhorar a qualidade do solo, em razão de sua baixa densidade específica, favorece a granulação, diminui a densidade do solo, forma agregados estáveis e, em solos muito argilosos, proporciona a melhoria da estrutura e da aeração, favorecendo o desenvolvimento do sistema radicular (Hernani et al., 1995).

A influência da matéria orgânica na agregação do solo ocorre a medida que se adiciona material orgânico ao solo, intensificando a atividade microbiana, resultando na

produção de exsudados que desempenham função na formação e estabilização (agentes cimentantes) dos agregados.

Os efeitos do plantio direto na agregação do solo pela eliminação das operações de preparo, resultam numa menor quebra mecânica dos agregados e a manutenção de cobertura por resíduos vegetais protegendo do impacto direto das gotas de chuva, condições bem diferentes das encontradas no sistema convencional (Bertoni & Lombardi Neto, 1990).

O maior efeito agregante no sistema plantio direto em comparação ao sistema convencional na camada superficial foi relatado em diversos trabalhos: Abrão et al., 1979; Reinert et al., 1984; Eltz et al., 1989; Carpenedo & Mielniczuk, 1990; Albuquerque et al., 1994; Pereira et al., 1996; Da Ros et al., 1997; Campos et al., 1999; Carvalho et al., 1999; Palmeira et al., 1999; Alves et al., 2000; Lima et al., 2000; Santos, 2000; Silva et al., 2000a; Beutler et al., 2001a.; Corrêa, 2002; Oliveira, 2002.

Inúmeros trabalhos relatam a ação das raízes das plantas na formação e estabilização dos agregados do solo (Tisdall & Oades, 1979). Entretanto, as gramíneas têm exercido maiores benefícios (Carpenedo & Mielniczuk, 1990; Paladini & Mielniczuk, 1991; Silva & Mielniczuk, 1997a; Silva & Mielniczuk, 1998).

Avaliando o efeito do tempo de adoção no sistema plantio direto, Da Ros et al. (1996) observaram maiores percentagens de agregados na classe de maior diâmetro (> 2,00 mm) com o tempo de adoção em áreas de um, seis e nove anos, com valores de 20,3%, 58,72% e 69,51%, respectivamente.

Com relação ao diâmetro médio geométrico (DMG), Da Ros et al. (1996) constataram um aumento com o tempo de adoção em plantio direto, sendo este aumento mais acentuado nos primeiros anos de instalação do sistema.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Caracterização da área experimental

O presente estudo foi conduzido em um Nitossolo Vermelho distroférico (Embrapa, 1999), relevo ondulado textura muito argilosa, localizado nas áreas de produção e experimental, da Fazenda Lageado, sendo o solo predominante, ocupando 42,1% da área total de 940,4 ha e com altitude média de 770 metros (Carvalho et al., 1983). A classificação climática de Botucatu, SP, segundo Cunha et al. (1999) e através da metodologia de Köppen, foi classificada como sendo Cwa, clima temperado quente (mesotérmico) com chuvas no verão e seca no inverno, e a temperatura média do mês mais quente é superior a 22°C.

Nas Figuras 2 e 3 são apresentados os resultados da temperatura média mensal e da precipitação média mensal do período de 1971 a 1998. A estação seca vai de abril a agosto e a estação chuvosa compreende os meses de setembro a março, sendo o mês de janeiro o mais chuvoso.

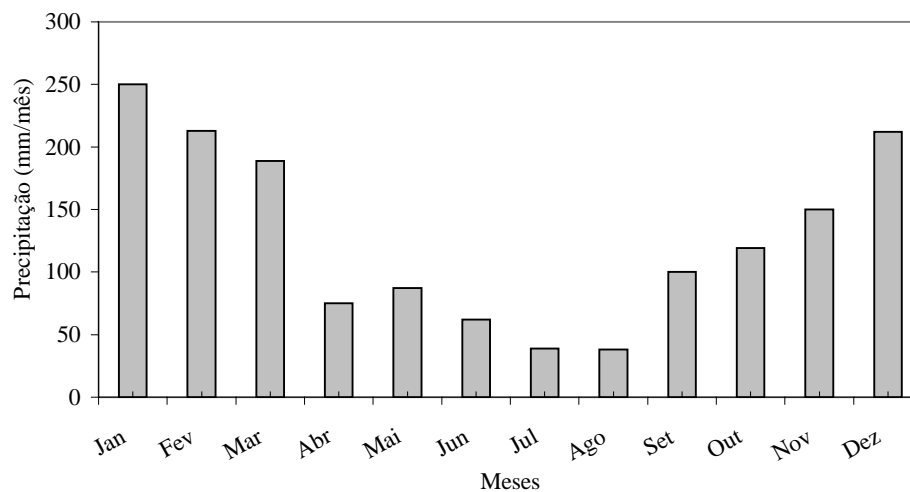


Figura 2. Valores de precipitação pluviométrica média mensal (1971-1998) medidos na estação Agrometeorológica do Departamento de Ciências Ambientais da Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP em Botucatu – SP.

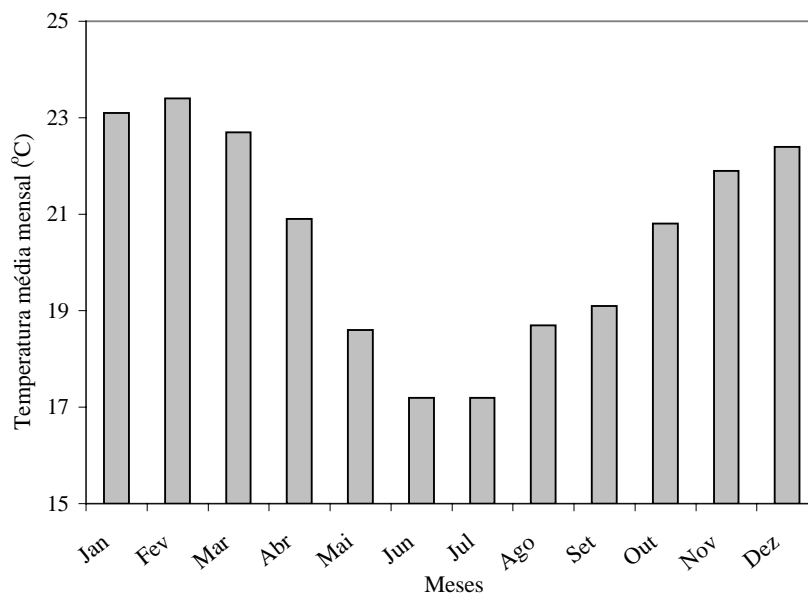


Figura 3. Valores de temperatura média mensal (1971-1998) medidos na estação Agrometeorológica do Departamento de Ciências Ambientais da Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP em Botucatu – SP.

O material de origem dos solos das áreas estudadas é constituído predominantemente por produtos de alteração de rochas eruptivas básicas (basaltos) e por vezes encontram-se misturados a materiais mais grosseiros, chamados “sedimentos neocenozóicos” de ampla ocorrência na região (Galhego & Espíndola, 1976). Geralmente o basalto apresenta aspecto homogêneo (fina granulação), como ainda basaltos amigdaloidais, com cavidades preenchidas por zeólitas, calcita e outros minerais (Carvalho et al., 1983).

Com relação a fração argila das áreas estudadas (Souza, 1973), encontrou em sua mineralogia, em amostras isentas de ferro livre, os valores extremos de 60 a 79% para a caolinita, 13 a 20% de gibbsita e 0 a 12% de alofana; e diagnosticadas presenças de vermiculita e illita (incipiente).

5.2 Descrição dos tratamentos

Mata nativa (MN)

A condição de mata nativa apresenta árvores de grande porte mantidas há mais de 40 anos sem cultivo ou qualquer outro tipo de atividade antrópica. Com localização definida pelas coordenadas 22°48'28"S e 48°25'39"W Gr. No presente estudo foi conduzida como área testemunha.

Plantio convencional (PC)

A área foi cultivada com milho, desde 1983 utilizando a grade aradora e grade niveladora para o preparo do solo. No ano 2000 a área foi cultivada no inverno com o triticale (*Triticum turgidocereale* (Kiss) Mackey) e nos anos anteriores foi deixada em pousio, com localização definida pelas coordenadas 22°48'19"S e 48°25'41"W Gr e com declividade de 0 a 4%.

Plantio direto com 1 ano (PD1).

Corresponde a área de produção comercial da fazenda. Nas últimas duas safras foi cultivada com soja e anteriormente com o milho. Na safra 1999/2000, ano de instalação do sistema plantio direto, foi realizada uma calagem com aplicação de 1000 kg de

calcário/ha. Como culturas de inverno na safra 1999/2000 foi utilizada a aveia preta, 2000/2001 e 2001/2002 o triticale. Com localização definida pelas coordenadas 22°48'56''S e 48°25'39''W Gr e com declividade de 0 a 4%.

Plantio direto com 4 anos (PD4).

Até o verão de 1996, a área era cultivada com a cultura do milho no sistema de preparo convencional, quando se instalou o sistema de plantio direto sobre os restos de cultura e vegetação espontânea. Após a colheita do milho no ano de 1998, semeou-se aveia preta (*Avena Strigosa* Schieb), no inverno, para formação de cobertura morta (Silva, 2000). Na safra 1998/1999, cultivou-se o milho no verão e no período de inverno a área ficou em pousio. Na safra 1999/2000, cultivou-se a soja no verão e o milheto no inverno, com aplicação de 500 kg de calcário/ha para correção da acidez do solo. Na safra 2000/2001, cultivou-se o milho no verão e o triticale como cultura de inverno. Antes do plantio do triticale aplicou-se 1000 kg de calcário/ha para manutenção. No verão de 2001 foi plantado o milho como cultura de verão. Com localização definida pelas coordenadas 22°49'3''S e 48°25'44''W e com declividade média de 4,5%.

Plantio direto com 5 anos (PD5).

Em maio de 1996 foi realizada a colheita da cultura do milho e aplicado calcário para elevar a saturação de bases do solo para 70%. Em seguida foi realizada a escarificação profunda em toda a área experimental, realizando em seguida uma gradagem leve para nivelamento e destorroamento do solo. Em maio de 1996 foi instalado um experimento no sistema plantio direto, com aveia preta como cobertura de inverno (Levien, 1999). Na safra de verão, 1996/97, foi cultivado o milho no verão e no inverno a aveia preta. Na safra seguinte, 1997/98, a safra de verão também foi o milho e no inverno mantida apenas a condução da vegetação espontânea (Marques, 1999). Na safra 1998/1999, cultivou-se a soja no verão e no inverno o triticale. Nas safras, 1999/2000 e 2000/2001 novamente a soja no verão e aveia no inverno. Com localização definida pelas coordenadas 22°48'25''S e 48°25'40''W Gr e com declividade de 0 a 4%.

Plantio direto com 12 anos (PD12).

No verão de 1988 o solo foi preparado mediante aração a aproximadamente 25 cm de profundidade, seguida de duas gradagens niveladoras e a área foi cultivada com soja. No inverno de 1989, iniciou-se com o sistema de plantio direto com o cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L) (Rosolem et al., 1992). Nos anos seguintes a área foi utilizada da seguinte forma: De 1989 a 1998 cultivou-se a soja como cultura de verão. De 1989 a 1994 o trigo como cultura de inverno, de 1995 e 1996 o tremoço azul (*Lupinus angustifolius*), 1997 o triticale, 1998 a aveia preta (*Avena strigosa* Schieb.), 1999 e 2000 o triticale. De 1999 a 2000 a área ficou em pousio no período de verão, apenas com o manejo da vegetação espontânea com a aplicação de herbicidas. No inverno foi utilizada a aveia preta. Na safra 2001/2002 foi cultivada com soja, como cultura de verão. Com localização definida pelas coordenadas 22°49'40"S e 48°25'39"W Gr e com declividade de 0 a 4%.

Nas áreas agricultáveis, o controle de plantas daninhas, foi realizado por meio de capina química com utilização de herbicidas e após capina mecânica (trituração de restos de culturas). As plantas de cobertura no inverno foram também manejadas com capinas química e mecânica.

5.3 Equipamentos e caracterização do tráfego¹

Nas diversas operações de manejo nas áreas em estudo foram utilizados os seguintes tratores, colhedoras e implementos, cujas informações foram obtidas nos catálogos dos fabricantes:

- Trator marca Valmet modelo 128-4, 4 x 2 TDA, potência de 90,5 kW (123 cv) no motor e massa de 7.260 kg, para as operações de preparo do solo: aração (grade aradora) e gradagem no plantio convencional e para operação de semeadura.

- Trator marca Ford New Holland, modelo 3030, 4 x 2, com potência de 38,5 kW (52 cv) no motor, para as operações de pulverização.

¹ Citação de marcas e fabricantes não implicam em recomendação do autor.

- Trator marca Massey Ferguson, modelo 265, potência de 47,9 kW no motor (65 cv), tração 4 x 2 TDA, para a operação de semeadura.

- Trator marca Massey Ferguson, modelo MF 296, com tração 4x2, potência de 81,0 kW no motor, com 6.054 kg de peso total, para operação com grade niveladora.

- Trator marca SLC – John Deere, modelo 6600, potência de 89,0 kW no motor (121 cv), tração 4 x 2 TDA, pneus de baixa pressão e alta flutuação, utilizado para levantamento de dados de resistência à penetração.

- Semeadora adubadora de fluxo contínuo, de arrasto, marca Semeato, modelo TD 300, com 15 linhas espaçadas de 200 mm, sulcadoras de discos duplos para sementes e fertilizantes, com capacidade para 400 kg de sementes e 790 kg de fertilizantes, utilizadas para semeadura de plantas de cobertura no inverno.

- Semeadora adubadora de precisão, de arrasto marca Tatu, modelo PST2, com 6 linhas espaçadas de 550 mm, sulcadoras do tipo haste escarificadora, com capacidade de 40 kg de sementes por linha (total de 240 kg) e 725 kg de fertilizantes para semeadura de culturas de verão.

- Triturador de restos de culturas, marca Jan, modelo Tritton 2300, montado, com rotor horizontal de 607 mm, com largura de corte de 2,3 metros, com 32 pares de facas curvas, oscilantes e reversíveis, sistema de regulagem de altura de corte e com massa de 735 kg.

- Pulverizador de barras, marca Jacto, modelo Condor M12, montado, barra de 12 m de largura com 24 bicos tipo jato em leque modelo 10003 espaçados de 0,50 m, tanque com capacidade de 0,60 m³, utilizado no controle de plantas daninhas.

- Grade niveladora marca Marchesan, modelo GNL/32, de arrasto, com acionamento hidráulico pelo controle remoto, 32 discos de 0,508 m (20”) de diâmetro, com bordas recortadas à frente e bordas lisas atrás.

- Grade aradora de arrasto, marca Tatu, levante hidráulico pelo controle remoto, 10 discos com diâmetro de 0,86 m (34”).

- Colhedora autopropelida de grãos, marca Massey Ferguson, modelo MF 1630, com picador-distribuidor de palhas e massa de 6080 kg.

5.4 Coleta das amostras de solo

Para a realização deste estudo, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas. As amostras deformadas foram usadas nas seguintes determinações: textura, análise química, ensaio de Proctor, estabilidade de agregados em água, limites de liquidez, plasticidade e contração e as indeformadas nas seguintes determinações: macro e microporosidade, densidade do solo, curva de retenção de água e para o ensaio de compressibilidade.

Estas amostras foram coletadas nas profundidades 0-5 e 10-15 cm, em razão da primeira camada possuir valores mais elevados de matéria orgânica, densidade do solo mais reduzida e, portanto, mais predisposta aos fatores externos de compactação, enquanto que, a segunda apresenta valores mais reduzidos de matéria orgânica e valores de densidade do solo mais elevados.

Para a realização dos ensaios de compressibilidade foram coletadas 540 amostras (45 amostras x 2 profundidades x 6 tratamentos) utilizando anéis de aço inoxidável com diâmetro aproximado de 0,069 m e 0,025 m de altura. Os pontos amostrais foram escolhidos na entrelinha da última cultura cultivada em cada tratamento, procurando a melhor representatividade de cada tratamento em estudo. Estas amostras foram utilizadas para a obtenção dos modelos de sustentabilidade da estrutura dos solo, em função da obtenção da pressão de preconsolidação e umidade.

Para o ensaio de Proctor foram coletadas amostras aleatoriamente, totalizando 36 amostras (3 repetições x 2 profundidades x 6 tratamentos).

As amostras indeformadas para a determinação da macro e microporosidade foram coletadas nas profundidades de 0-5 e 10-15 cm, totalizando 108 amostras (9 repetições x 2 profundidades x 6 tratamentos). Para a determinação da curva de retenção de água utilizou o mesmo procedimento amostral anterior.

Para a determinação dos limites de consistência do solo (limites de liquidez, plasticidade e contração) foram coletadas amostras aleatoriamente, totalizando 36 amostras (3 repetições x 2 profundidades x 6 tratamentos).

A resistência à penetração foi determinada em diferentes pontos dentro de cada tratamento até a profundidade de 40 cm (30 repetições por tratamento).

A condutividade hidráulica e velocidade de infiltração foram determinadas pelo método do permeâmetro de Guelph, segundo metodologia de Reynolds & Elrick (1985), na profundidade de 0-15 cm com 30 repetições por tratamento.

As coletas de amostras indeformadas e deformadas e determinações de campo foram realizadas a partir do mês de março de 2001 até janeiro de 2002.

5.5 Caracterização física e química

5.5.1 Limites de consistência do solo

Amostras deformadas foram utilizadas para a determinação dos limites de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e o limite de contração (LC) com utilização de mercúrio, segundo (Sowers, 1965).

5.5.2 Ensaio de compressão uniaxial

As amostras em laboratório, foram devidamente preparadas e saturadas por capilaridade e as umidades gravimétricas equilibradas naturalmente à temperatura ambiente. Depois de equilibradas as mesmas foram submetidas aos ensaios de compressibilidade. As amostras foram equilibradas à temperatura ambiente em cinco faixas de umidade por profundidade: 0,03 a 0,07; 0,08 a 0,12; 0,18 a 0,22; 0,28 a 0,32 e de 0,38 a 0,42 kg kg^{-1} .

Foi utilizado um consolidômetro pneumático-eletrônico para a realização dos ensaios de compressibilidade uniaxial descrito por Castro Neto (2001). As amostras indeformadas foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial com aplicação de pressões estáticas de 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa, com leituras no defletômetro aos 15; 30; 60; 120; 240 segundos. Os ensaios foram realizados segundo metodologia de Dias Junior (1994). Através de pré-testes foi encontrado um tempo máximo de 4 minutos de aplicação de cada carga para a ocorrência de pelo menos 90% da deformação máxima fosse alcançada.

O índice de compressão foi estimado como sendo a inclinação da reta de compressão virgem (Bradford & Gupta, 1986), e a pressão de preconsolidação conforme Dias Junior & Pierce (1995).

5.5.3 Ensaio de Proctor normal

A densidade do solo máxima e a umidade ótima de compactação, foram determinadas pelo ensaio de Proctor normal (Nogueira, 1995). O ensaio consiste em compactar uma amostra de solo dentro de um cilindro, com um volume aproximado de 1000 cm³, em três camadas sucessivas, com a aplicação de 25 golpes com um soquete com peso de 2,5 kg a uma altura de queda de 30cm. Desta forma tem-se uma energia de compactação de 6 kg cm cm⁻³. O ensaio foi repetido para diferentes umidades (pelo menos cinco corpos de prova com umidades crescentes), obtendo-se assim, para cada valor de umidade, uma densidade do solo. Após plotaram-se os resultados em um gráfico (umidade gravimétrica versus densidade do solo) e ajustando em seguida um polinômio de 2º grau ($D_s = aU^2 + bU + C$), obtendo-se, a curva de compactação, com a umidade ótima ($U_{ót}$) e densidade do solo máxima ($D_{s_{máx}}$) obtidas pela expressão:

$$U_{ót} = \frac{-b}{2a}, \quad (3)$$

$$D_{s_{máx}} = \frac{-(b^2 - 4ac)}{4a}, \text{ onde:} \quad (4)$$

a, b e c = Parâmetros da equação.

5.5.4 Grau de compactação do solo

O grau de compactação (GC) foi obtido através da utilização da densidade do solo no campo das amostras dos diferentes tratamentos e a densidade do solo máxima extraída da curva de compactação do solo (Vargas, 1977).

O grau de compactação (GC) foi obtido através do uso da densidade do solo máxima extraída da curva de compactação do solo que relaciona a densidade do solo e a umidade (Ensaio de Proctor normal).

O grau de compactação (GC) das amostras oriundas dos diferentes tratamentos foi obtido através da fórmula:

$$GC = \frac{D_{sc}}{D_{smáx.}} \times 100, \text{ onde:} \quad (5)$$

D_{sc} = Densidade do solo no campo (Mg m^{-3}),

$D_{smáx.}$ = Densidade do solo máxima (Mg m^{-3}).

5.5.5 Resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração foi determinada utilizando-se um penetrômetro hidráulico-eletrônico, construído por Lanças & Santos (1998). O penetrômetro hidráulico-eletrônico é composto por um pistão hidráulico, uma célula de carga, uma haste de aço contendo uma ponteira cônica de ângulo sólido de 30° , é acionado pelo sistema hidráulico do trator ("controle remoto"), para obtenção da pressão necessária para cravar o cone na direção normal (perpendicular) ao solo. A velocidade constante de penetração de 30 mm/s, independentemente da resistência do solo (ASAE,1999), é obtida através da instalação de uma válvula de controle de vazão no circuito hidráulico.

A obtenção, registro e armazenamento dos dados de resistência do solo à penetração foram realizados por um sistema eletrônico, formado pelos seguintes componentes: sensor de força (célula de carga), potenciômetro utilizado como sensor de profundidade, sistema de aquisição de dados ("microllogger"), sistema de armazenamento de dados, microcomputador e programa para análise dos dados ou planilha eletrônica.

Foi utilizado para processamento eletrônico dos dados o programa desenvolvido por Castro Neto et al. (1999).

Foram retiradas amostras deformadas para determinação do teor de água nas profundidades de 0 a 20 e de 20 a 40 cm no momento das avaliações de resistência do solo à penetração. Foram avaliados 30 pontos de resistência do solo à penetração até a profundidade de 40 cm por área. Avaliou-se o índice de cone nas profundidades de 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm e 30-40 cm.

5.5.6 Textura do solo

As amostras de terra fina seca ao ar (TFSA) após dispersão mecânica (agitação rápida) de 12.000 rpm por 15 minutos e química (NaOH 0,1 N), foram separadas em peneira de 0,053 mm de malha, para a determinação da areia total. Os teores de argila e de silte foram determinados através do método do hidrômetro (Bouyoucos, 1927).

5.5.7 Densidade de partículas do solo

A densidade de partículas (D_p), expressa em kg m^{-3} , foi determinada por meio do método do balão volumétrico com álcool etílico (EMBRAPA, 1997).

5.5.8. Densidade do solo

Para esta determinação utilizou-se amostras indeformadas, retiradas por meio de anel e secas em estufa a 105-100° C, para determinação do peso seco, que dividido pelo volume do anel, resultaram no valor da densidade do solo (D_s) (Blake, 1965).

5.5.9 Matéria orgânica do solo

Determinada de acordo com metodologia da EMBRAPA (1997).

5.5.10 Curva de retenção da água no solo

Para a confecção da curva de retenção de água foi utilizada uma centrífuga modelo H-1400 pF da Kokusan Enshinki Co. Ltda de fabricação japonesa. Amostras indeformadas previamente saturadas por 24 horas foram levadas à centrífuga por um período de 30 minutos para cada rotação. O cálculo do número de rotação utilizada na centrífuga correspondente a uma tensão aplicada à amostra seguiu metodologia descrita por Centurion et al. (1997).

As tensões relacionadas as rotações foram de -1; -3; -6; -10; -33; -100 e -300 kPa.

5.5.11. Porosidade total do solo

A porosidade total (PT) foi determinado com base na expressão de Danielson e Sutherland (1986):

$$PT = \left[1 - \left(\frac{D_s}{D_p} \right) \right], \text{ onde:} \quad (6)$$

PT = Porosidade total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)

D_s = densidade do solo (Mg m^{-3})

D_p = densidade de partículas (Mg m^{-3})

5.5.12 Macro e microporosidade do solo

Para separar os poros com diâmetros maiores e menores que 0,05 mm, utilizou-se do método descrito por Richards (1965), empregando-se a tensão de 0,006 MPa, através da unidade de sucção, após saturação prévia da amostra de acordo com metodologia da EMBRAPA (1997).

A água retida nas amostras, após atingido o equilíbrio, correspondeu-se a microporosidade, que foi determinada pela equação:

$$M = \frac{(a - b)}{c} \quad (7)$$

Onde:

M = microporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)

a = peso da amostra após ser submetida a uma sucção de 60 cm de coluna de água (g)

b = peso da amostra seca a 105-110° C (g)

c = volume do cilindro (cm^3)

A macroporosidade foi determinada pela diferença entre a porosidade total (PT) e a microporosidade.

5.5.13 Percentagem de agregados (via úmida) do solo

A estabilidade de agregados foi medida pelo método descrito por Kemper & Chepil (1965), usando agregados com tamanho de 4,76 e 7,96 mm, os quais permaneceram em repouso por 10 minutos após borifação de água, antes de iniciar o tamisamento, para permitir um umedecimento lento. O método utiliza o peneiramento dos agregados em água com movimento de oscilação vertical, durante vinte minutos, por meio de peneiras com diâmetro de malha 2; 1; 0,5; 0,25 e 0,10 mm, separando agregados nas seguintes classes: > 2 mm; < 2 mm; 2 - 1 mm e < 1 mm.

Após determinações das percentagens retidas em cada peneira, calculou-se o Diâmetro Médio Geométrico (DMG) conforme Kemper & Chepil (1965), pela expressão que segue.

$$DMG = 10^{\left[\frac{\sum(n \log d)}{\sum n}\right]} \quad (8)$$

Onde:

DMG = diâmetro médio geométrico (mm)

n = percentual de agregados retidos na peneira (mm)

d = diâmetro médio de uma determinada faixa de tamanho do agregado (mm)

5.5.14 Umidade gravimétrica do solo

Foi determinada segundo metodologia descrita por Forsythe (1975), por secagem de amostras a 105-110° C, que foi determinada pela equação:

$$U = \frac{Mu - Mss}{Mss}, \text{ onde:} \quad (9)$$

U = é a umidade gravimétrica (kg kg⁻¹)

Mu = é a massa de solo úmido (kg)

Mss = é a massa de solo seco a 105-110°C (kg).

5.5. 15 Condutividade hidráulica do solo saturado e infiltração da água no solo

As medidas de infiltração da água no solo e de condutividade hidráulica do solo saturado foram realizadas no campo com o emprego do permeâmetro de fluxo constante (Permeâmetro de Guelph). Procedimentos de campo foram utilizados segundo recomendações de Lombardi Neto et al. (1993).

A condutividade hidráulica do solo saturado foi medida na profundidade de 0-15 cm, empregando-se duas cargas hidráulicas, de 6 e 9 cm. Estas baseadas na recomendação para solos com textura argilosa.

A recomendação de 30 pontos por área baseou-se em Rezende et al. (1999), que em estudo utilizando a geoestatística para estimar o tamanho de amostra para determinação da condutividade hidráulica do solo com o permeâmetro de Guelph nos sistemas de manejo convencional e de plantio direto em solo sob cerrado chegaram a estimativa de pelo menos 30 amostras, para estimar uma média geométrica, com 90% de confiança e um erro máximo de estimativa de 15% do valor real.

As equações utilizadas para cálculo da condutividade hidráulica saturada de campo (K_{fs}) seguiram metodologia, segundo Reynolds & Elrick (1985).

A obtenção dos dados de condutividade hidráulica do solo saturado e infiltração da água no solo sob condições de saturação de campo foi realizada com o uso do software GPM.EXE²

5.6 Análises estatísticas

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, incluindo a profundidade de amostragem como subfator. Os resultados das análises físicas e químicas foram submetidos à análise de variância e teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para a comparação de médias pelo programa SAS (Statistical Analysis System - versão 6.10 (SAS 1995).

² Aplicativo computacional desenvolvido pelo pesquisador Dr. Sidney Rosa Vieira - Seção de Conservação do Solo - IAC

As análises de regressão relativas aos diversos parâmetros físicos e ao ensaio de compressibilidade, foram realizadas segundo o uso do software Sigma Plot 4.0 (Jandel Scientific), e para comparações entre as regressões do ensaio de compressibilidade foi utilizado o procedimento descrito em Snedecor & Cochran (1989).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Análise química do solo

No Quadro 1, são apresentados os resultados da análise química do Nitossolo Vermelho distroférico nos diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção com o sistema plantio direto.

A análise de variância mostrou efeitos significativos dos tratamentos (sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto) e profundidades sobre os parâmetros da análise química do solo e a interação destes com a profundidade (Apêndice 1).

Observa-se que os níveis de fertilidade variam tanto em relação às profundidades, sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto. O tratamento mata nativa (MN) se destaca quanto aos níveis de cálcio (Ca), na capacidade de troca de cátions (CTC) na camada superficial em razão, principalmente, do elevado teor de matéria orgânica (MO). O plantio convencional (PC) apresentou menores níveis de fósforo (P) em relação aos tratamentos agricultáveis na profundidade de 0-5 cm, mas apresentou uma distribuição nos níveis de fertilidade uniforme nas profundidades estudadas, em razão do revolvimento do solo. Houve aumento nos níveis de fósforo, cálcio, soma de bases e na saturação de bases (V%) com o tempo de adoção no sistema plantio direto na camada

superficial, estando relacionado à deposição superficial de resíduos vegetais e a realização de calagem superficial sem revolvimento do solo.

A elevada CTC no plantio direto com 12 anos (PD12), na profundidade de 0-5 cm, possivelmente, deve estar relacionada a qualidade de sua matéria orgânica. A elevação nos níveis de Mg (magnésio) no plantio direto com 1 ano (PD1) deve-se à realização de calagem com aplicação de 1,0 ton/ha de calcário no ano de instalação do sistema.

Com os resultados obtidos evidencia-se que o tempo de adoção no sistema plantio direto promoveu melhorias na condição química dos solos avaliados na profundidade de 0-5 cm.

Quadro 1. Análises químicas do Nitossolo Vermelho distroférico nos diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto. Botucatu, Laboratório de Fertilidade do Solo da FCA/UNESP, 2001. (Média de três repetições)

Trat.	pH	P. resina	H + Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V	MO
	CaCl ₂	mg dm ⁻³	-----mmol _c dm ⁻³ -----			-----%-----			-g kg ⁻¹ -	
0 a 5 cm										
MN	6,2 Ba	20 Da	24 Ab	4,8 Ba	187 Aa	35 ABCa	227 Aa	251 Aa	91 Aa	105,2
PC	5,5 CDb	25 Da	29 Aa	4,0 Ca	43 Ca	29 BCDA	77 Ca	106 Ca	72 Ba	35,3
PD1	5,7 Ca	36 Ca	27 Aa	6,4 Aa	51 Ca	40 ABA	97 Ca	124 Ca	77 Ba	39,1
PD4	5,2 Db	43 Ba	27 Aa	3,8 Ca	47 Cb	20 Da	71 Cb	98 Ca	72 Bb	39,9
PD5	5,6 Ca	48 Ba	26 Ab	6,5 Aa	57 Ca	26 CDA	90 Ca	116 Ca	78 Ba	48,3
PD12	6,9 Aa	74 Aa	19 Ab	4,6 Ba	82 Ba	45 Aa	131 Ba	150 Ba	88 Aa	43,1
10 a 15 cm										
MN	5,0 Cb	8 Cb	41 Aa	3,3 Bb	47 ABb	19 ABb	69 ABb	111 Ab	63 Bb	53,2
PC	5,8 Aa	21 Bb	23 Bb	3,0 BCb	44 BCa	27 Aa	74 Aa	97 ABA	76 Aa	37,4
PD1	5,4 Bb	18 Bb	25 Ba	3,7 Ab	43 BCDA	29 Ab	76 Ab	101 ABb	75 Aa	37,7
PD4	5,9 Aa	45 Aa	21 Ba	3,9 Aa	63 Aa	26 Aa	93 Aa	114 Aa	81 Aa	34,1
PD5	4,7 Db	21 Bb	38 Aa	3,2 BCb	26 CDB	10 Bb	39 Bb	78 Bb	51 Cb	36,6
PD12	4,9 CDb	11 Cb	32 ABA	2,9 Cb	25 Db	12 Bb	40 Bb	72 Bb	55 BCb	28,8

MN: Mata Nativa; PC: Plantio Convencional; PD1: Plantio Direto com 1 ano; PD4: Plantio Direto com 4 anos; PD5: Plantio Direto com 5 anos; PD12: Plantio Direto com 12 anos.

Letras maiúsculas na coluna comparam diferenças entre os tratamentos para cada profundidade, no nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Letras minúsculas na coluna comparam diferenças entre as duas profundidades de cada tratamento, no nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

6.2 Análise física do solo

O Quadro 2 apresenta os resultados da análise textural e da densidade de partículas do Nitossolo Vermelho distroférico nas diferentes condições de manejo, profundidades e tempo de adoção com o sistema plantio direto.

A análise de variância mostrou efeitos significativos dos tratamentos (sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto) e profundidades sobre a textura do solo (Apêndice 2).

O tratamento PD12 destaca-se por apresentar uma quantidade maior de areia e menor de argila que os demais, por ser uma área de transição entre duas classes de solos, com presença maior de areia no material de origem (Carvalho et al., 1983).

Quadro 2. Teores de argila, silte, areia e densidade de partículas para os diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto.

Tratamento	Profund.	Argila	Silte	Areia	Dens. de partículas
	-----cm-----	----- g kg ⁻¹ -----	----- g kg ⁻¹ -----	----- g kg ⁻¹ -----	---Mg m ⁻³ ---
Mata Nativa (MN)	0-5	670 Cb	170 Aa	160 Ba	2,56 Bb
	10-15	700 Ba	150 Ab	150 Bb	2,90 Aa
Plantio Convencional (PC)	0-5	750 Aa	130 Ca	120 Da	2,86 Aa
	10-15	760 Aa	130 ABa	110 Da	2,90 Aa
Plantio Direto 1 ano (PD1)	0-5	740 ABb	140 ABCa	120 Da	2,85 Aa
	10-15	750 Aa	130 ABb	120 CDa	2,87 Aa
Plantio Direto 4 anos (PD4)	0-5	710 Ba	150 ABa	140 Ca	2,85 Aa
	10-15	730 Aa	130 ABa	140 BCa	2,90 Aa
Plantio Direto 5 anos (PD5)	0-5	710 Ba	140 BCa	150 BCa	2,82 Aa
	10-15	730 ABa	130 ABa	140 Bb	2,87 Aa
Plantio Direto 12 anos (PD12)	0-5	610 Db	120 Ca	270 Aa	2,79 Aa
	10-15	630 Ca	120 Ba	250 Ab	2,86 Aa

Letras maiúsculas na coluna comparam diferenças entre os tratamentos para cada profundidade, no nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Letras minúsculas na coluna comparam diferenças entre as duas profundidades de cada tratamento, no nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Os valores das densidades de partículas (Quadro 2) apresentaram diferenças estatísticas significativas apenas no tratamento MN, na profundidade de 0-5 cm, devido ao maior teor de matéria orgânica nesta profundidade. Segundo Ferreira & Dias Junior (1999), a matéria orgânica contribui para o abaixamento da densidade de partículas em decorrência do seu menor peso. Observa-se que não ocorreram efeitos dos tratamentos agricultáveis em relação a densidade de partículas. A variação dos níveis de matéria orgânica não foram suficientes para promover modificações em seus resultados, o que também foi encontrado por Urchei (1996).

6.3 Limites de consistência do solo

Os resultados dos limites de consistência dos solos nos diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto estão apresentados no Quadro 3.

A análise de variância mostrou efeitos significativos dos tratamentos (sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto) para os limites de liquidez (LL), plasticidade (LP) e contração (LC) e profundidades somente para o LL (Apêndice 3).

O solo sob mata nativa, na profundidade de 0-5 cm, apresentou maiores valores nos LL e LP, fato explicado pelo maior teor de matéria orgânica, que aumentam a capacidade de adsorção de água (Quadro 3 e 4) (Stone & Ekwue, 1993; Kondo, 1998).

Foi observado que o tempo de adoção no sistema plantio direto influenciaram os LL e LP e o PD12 foi mais influenciado pela textura do solo (Quadro 2 e 3).

O solo sob condição de PD12 apresentou os menores valores de LL e LP, fato este devido a presença de maior quantidade da fração areia nesta condição. Pacheco & Dias Junior (1990) constataram a influência da textura nos resultados de consistência do solo, e observaram que, a areia reduz o fenômeno de contração e a ocorrência de trincas nos corpos de prova, o que também foi observado no presente estudo.

Quadro 3. Valores do limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e limite de contração (LC) para os diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto. Médias de três repetições.

Tratamento	Profund.	LL	LP	LC
	-----cm-----	-----kg kg ⁻¹ -----		
Mata Nativa (MN)	0-5	0,58 Aa	0,46 Aa	0,26 ABb
	10-15	0,46 Ab	0,35 Ab	0,28 Aa
Plantio Convencional (PC)	0-5	0,42 Bb	0,32 Ba	0,21 Ca
	10-15	0,43 BCa	0,34 Aa	0,20 Ba
Plantio Direto 1 ano (PD1)	0-5	0,43 Ba	0,33 Ba	0,22 BCa
	10-15	0,43 Ca	0,35 Aa	0,22 Ba
Plantio Direto 4 anos (PD4)	0-5	0,44 Bb	0,33 Bb	0,25 ABb
	10-15	0,45 ABa	0,35 Aa	0,28 Aa
Plantio Direto 5 anos (PD5)	0-5	0,43 Ba	0,32 Bb	0,28 Aa
	10-15	0,43 BCa	0,34 Aa	0,29 Aa
Plantio Direto 12 anos (PD12)	0-5	0,35 Ca	0,28 Ca	0,27 Aa
	10-15	0,35 Da	0,28 Ba	0,26 Aa

Letras maiúsculas na coluna comparam diferenças entre os tratamentos para cada profundidade, no nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Letras minúsculas na coluna comparam diferenças entre as duas profundidades de cada tratamento, no nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

6.4 Densidade do solo máxima, umidade ótima de compactação e matéria orgânica

No Quadro 4 são apresentados os valores de densidade do solo máxima, umidade ótima de compactação e matéria orgânica para os diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto.

A análise de variância mostrou efeitos significativos dos tratamentos (sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto) e profundidades sobre a densidade do solo máxima, umidade ótima e matéria orgânica e a interação destes com a profundidade (Apêndices 4 e 6).

O tratamento MN apresentou o maior teor de matéria orgânica na superfície em relação a todas as condições estudadas (Quadro 4). Este maior teor refere-se ao acúmulo de restos vegetais na superfície, não ocorrendo variação nos conteúdos de matéria orgânica no tempo devido à igualdade das quantidades adicionadas e perdas (Bayer & Mielniczuk, 1999).

Quadro 4. Valores de densidade do solo máxima (Dsmáx), umidade ótima de compactação (Uótm) e matéria orgânica para os diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto. Médias de três repetições.

Tratamento	Profund.	Dsmáx	Uótm	Matéria Orgânica ¹
	-----cm-----	----Mg m ⁻³ ----	----kg kg ⁻¹ -----	-----g kg ⁻¹ -----
Mata Nativa (MN)	0-5	1,19 Db	0,39 Aa	105,2 Aa
	10-15	1,45 Ca	0,30 Ab	53,2 Ab
Plantio Convencional (PC)	0-5	1,50 Aa	0,28 DEa	35,3 Ca
	10-15	1,50 Ba	0,30 Aa	37,4 ABa
Plantio Direto 1 ano (PD1)	0-5	1,45 BCa	0,30 CDa	39,1 BCa
	10-15	1,46 BCa	0,29 Aa	37,7 ABa
Plantio Direto 4 anos (PD4)	0-5	1,42 Cb	0,30 BCa	39,9 BCa
	10-15	1,47 BCa	0,30 Aa	34,1 Bb
Plantio Direto 5 anos (PD5)	0-5	1,42 Cb	0,31 Ba	48,3 Ba
	10-15	1,47 BCa	0,31 Aa	36,6 ABb
Plantio Direto 12 anos (PD12)	0-5	1,48 ABb	0,28 Ea	43,1 BCa
	10-15	1,57 Aa	0,26 Bb	28,8 Bb

Letras maiúsculas na coluna comparam diferenças entre os tratamentos para cada profundidade, no nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Letras minúsculas na coluna comparam diferenças entre as duas profundidades de cada tratamento, no nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

¹ Matéria orgânica – média de nove repetições.

A diferença do teor de matéria orgânica no solo entre o PC e o PD5 na profundidade de 0-5 cm e a diferenciação entre as profundidades estudadas a partir do PD4 (Quadro 4), está estreitamente relacionada ao retorno dos resíduos culturais associado ao não

revolvimento do solo e uma maior estabilização do sistema. Resultados semelhantes foram encontrados por Santos et al. (1995), Beutler (1999) e Carvalho et al. (1999).

O processo lento de decomposição da matéria orgânica pela menor exposição aos processos microbianos, reduz a taxa de mineralização, resultando em um menor fluxo de CO₂ para a atmosfera (Reicosky et al., 1995), contribuindo diretamente para a diminuição do efeito estufa (Sá et al., 2000).

Na Figura 4 estão mostrados as curvas de compactação do Nitossolo Vermelho distroférico para os diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto.

O tratamento mata nativa (MN), utilizado como referência na profundidade de 0-5 cm, apresentou o menor valor de densidade do solo máxima e o maior valor de umidade ótima. Estes dados corroboram com Silva et al. (1986), Ekwue & Stone (1997) e Dias Junior & Miranda (2000).

A umidade ótima de compactação em todas as condições e profundidades estudadas (Quadro 4) situa-se dentro da faixa de friabilidade do solo (entre LP e LC) (Quadro 3), indicando que a faixa de friabilidade possui condições favoráveis para a ocorrência da máxima compactação do solo. Resende et al. (1997) referiram-se à faixa de friabilidade do solo como aquela ideal para as operações de preparo do solo, sem entretanto inferir sobre a capacidade de suporte de carga, o que pode levar a ocorrência de uma compactação indesejável, mesmo na zona de friabilidade, devido a aplicação de uma pressão que exceda a sua capacidade de suporte de carga, resultando em compactação adicional do solo (Kondo & Dias Junior, 1999a).

O efeito da matéria orgânica, principalmente no tratamento MN (Figura 4 e Quadro 4) na profundidade de 0-5 cm, é refletido pela redução na amplitude das curvas de compactação, resultando numa diminuição da densidade do solo máxima e o aumento da umidade ótima de compactação, devido a maior adsorção de água na superfície desses componentes. Esses resultados mostram a necessidade de uma maior umidade do solo para que a densidade máxima seja atingida, dados que corroboram com Silva et al. (1986), que observaram que o teor de argila e matéria orgânica influenciam a posição da curva de compactação ao longo do eixo da umidade, enquanto que o teor de areia influi na amplitude da curva de compactação, resultados também observados no presente estudo.

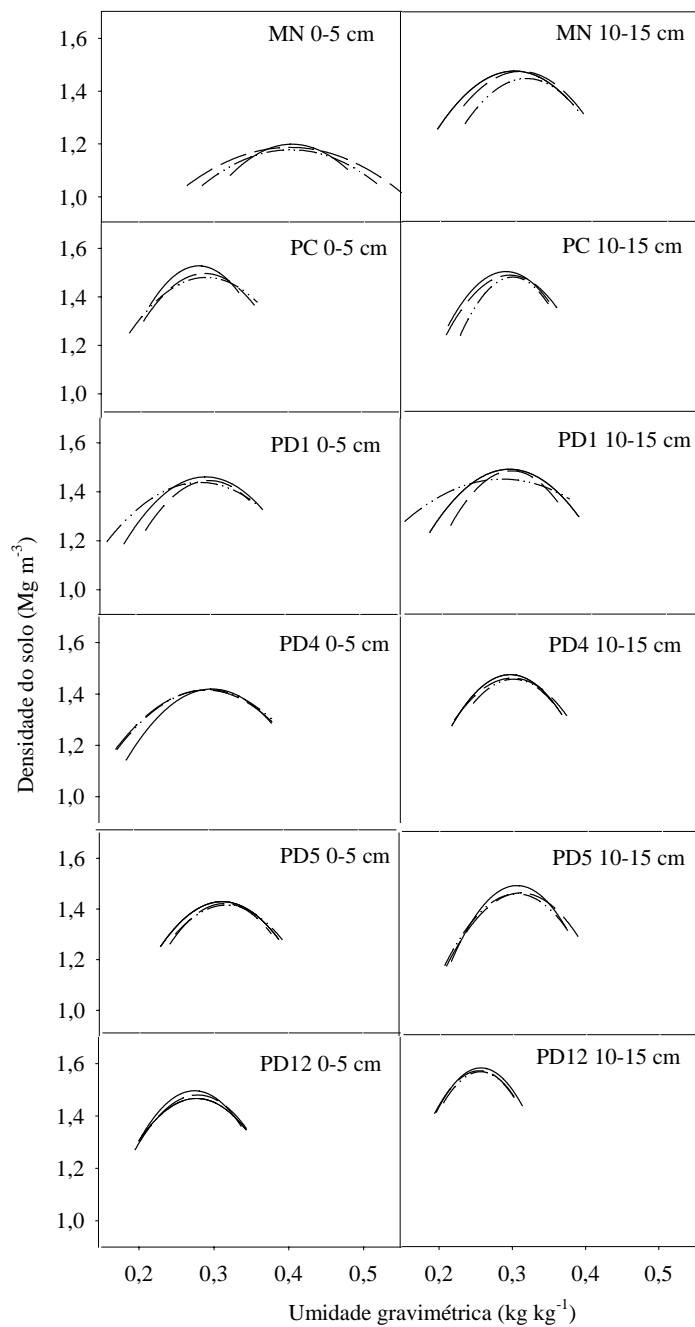


Figura 4. Curvas de compactação do Nitossolo Vermelho distroférico para os diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto. Cada curva refere-se a uma repetição.

Os maiores valores na densidade do solo máxima foram encontrados no PC e PD12 (Quadro 4). Valores elevados de densidade do solo máxima no PD12 na profundidade de 10-15 cm, deve-se mais a influência da fração areia. A explicação se deve ao fato das partículas de areia se rearranjarem de forma mais acirrada do que aqueles com predominância da fração argila (Pacheco & Dias Junior, 1990; Dias Junior & Miranda, 2000).

Os valores das umidades ótimas na profundidade de 0-5 cm foram crescentes na seguinte ordem de valores: PD12 (0,28 kg kg⁻¹), PC (0,28 kg kg⁻¹), PD1 (0,30 kg kg⁻¹), PD4 (0,30 kg kg⁻¹), PD5 (0,31 kg kg⁻¹) e MN (0,39 kg kg⁻¹). Com relação as densidades do solo máximas, estas foram crescentes na seguinte ordem: MN (1,19 Mg m⁻³), PD4 (1,42 Mg m⁻³), PD5 (1,42 Mg m⁻³), PD1 (1,45 Mg m⁻³), PD12 (1,48 Mg m⁻³) e PC (1,50 Mg m⁻³).

Através da análise dos resultados do ensaio de Proctor (Quadro 4) espera-se que o solo com PC e o PD12 tenham problemas de compactação a umidades mais baixas que os demais, o que torna estas áreas mais suscetíveis à compactação. O PD5 atingiu a densidade do solo máxima a umidade mais alta (Figura 4 e Quadro 4). Assim, para o PD5 haveria maior tempo disponível para a realização das operações de manejo em condições adversas de umidade.

Pelos resultados obtidos (Quadro 4) constatou-se que o tempo de adoção no sistema plantio direto promoveu modificações na densidade do solo máxima e na umidade ótima de compactação.

Na Figura 5 estão mostradas as funções lineares entre a densidade do solo máxima e a umidade ótima de compactação ($D_{smáx} = 2,27 - 0,027 U_{ótm}$) ($R^2 = 0,93^{**}$) e entre a densidade do solo máxima e a matéria orgânica ($D_{smáx} = 1,63 - 0,004 MO$) ($R^2 = 0,81^{**}$). Para a relação entre densidade do solo máxima e umidade ótima de compactação, equação semelhante foi encontrada por Ekwue & Stone (1997) trabalhando com quatro classes de solos com um conjunto de 48 valores de densidade do solo máxima e umidade ótima de compactação, onde obtiveram uma relação $D_{smáx} = 1,99 - 0,022 U_{ótm}$ ($R^2 = 0,97$).

Para a relação entre densidade do solo máxima e a matéria orgânica, Wagner et al. (1994), em estudo com solos com mais de 25% de argila, obtiveram a relação $D_{smáx} = 1,73 - 0,075 MO$ ($R^2 = 0,72$). Já Dias Junior & Miranda (2000) avaliando o comportamento de cinco classes de solos da região de Lavras (MG), obtiveram uma relação entre a densidade do solo máxima e o teor de matéria orgânica do tipo $D_{smáx} = 1,69 - 0,11$

MO ($R^2 = 0,84$), mostrando que houve coerência nos resultados obtidos neste trabalho e aqueles observados na literatura.

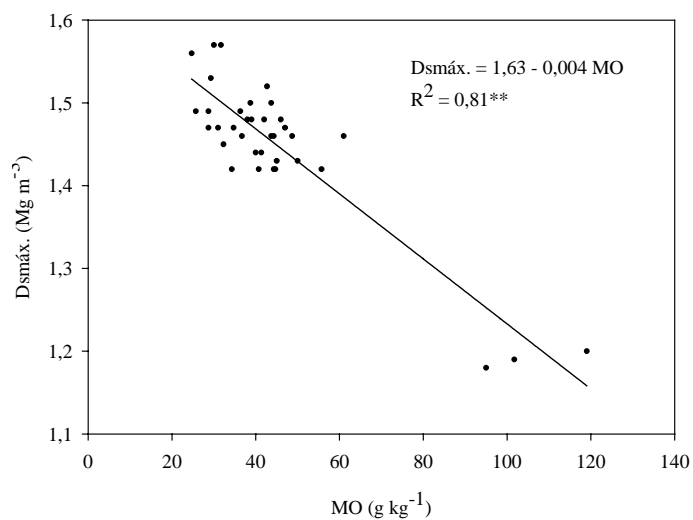
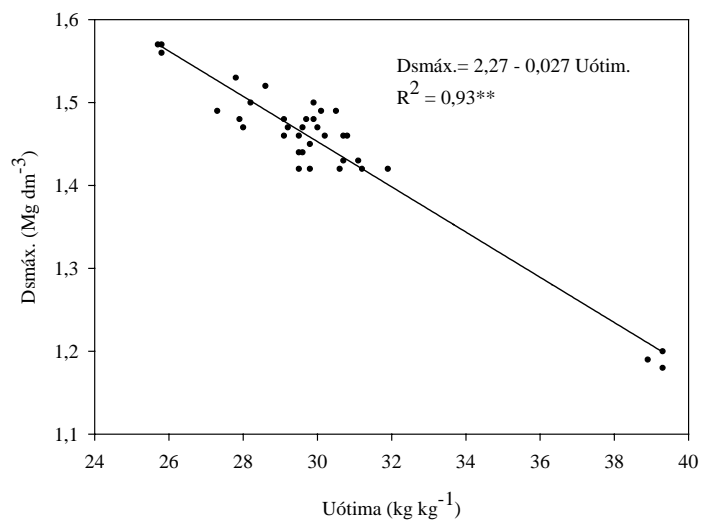


Figura 5. Relações entre densidade do solo máxima ($D_{smáx}$) com umidade ótima de compactação ($U_{ótima}$) (acima) e com matéria orgânica (MO) (abaixo). ** Significativo a 1%

6.5 Densidade do solo e grau de compactação

No Quadro 5 é apresentado os valores de densidade do solo inicial (Dsi) e o grau de compactação (GC) para os diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto.

Quadro 5. Valores de densidade do solo inicial (Dsi) e o grau de compactação (GC) para os diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto.

Tratamento	Profund. -----cm-----	Dsi -----Mg m ⁻³ -----	GC -----%-----
Mata Nativa (MN)	0-5	1,05 ± 0,03 ¹ Cb	88,35 ± 2,86 Aa
	10-15	1,22 ± 0,04 Ca	84,02 ± 3,07 Cb
Plantio Convencional (PC)	0-5	1,22 ± 0,10 Ab	81,42 ± 6,79 Bb
	10-15	1,31 ± 0,10 Ba	87,05 ± 6,45 Ba
Plantio Direto 1 ano (PD1)	0-5	1,17 ± 0,08 ABb	80,77 ± 5,23 Bb
	10-15	1,35 ± 0,04 ABa	92,12 ± 2,95 Aa
Plantio Direto 4 anos (PD4)	0-5	1,17 ± 0,12 ABb	82,39 ± 8,54 Bb
	10-15	1,36 ± 0,05 Aa	92,52 ± 3,56 Aa
Plantio Direto 5 anos (PD5)	0-5	1,12 ± 0,10 Bb	78,61 ± 6,99 Bb
	10-15	1,34 ± 0,09 ABa	91,19 ± 5,88 Aa
Plantio Direto 12 anos (PD12)	0-5	1,06 ± 0,09 Cb	71,61 ± 5,96 Cb
	10-15	1,35 ± 0,07 ABa	85,79 ± 4,70 BCa

Letras maiúsculas na coluna comparam diferenças entre os tratamentos para cada profundidade de manejo, no nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Letras minúsculas na coluna comparam diferenças entre as duas profundidades de cada tratamento, no nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

¹Média ± desvio padrão da média (n=45)

A análise de variância mostrou efeitos significativos dos tratamentos (sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto) e profundidades sobre a densidade do solo e grau de compactação e a interação destes com a profundidade (Apêndice 5).

Os valores de densidade do solo foram menores, com diferença estatisticamente significativa, na profundidade de 0-5 cm em relação a 10-15 cm para todos os tratamentos (Quadro 5). O fato se explica devido a maior presença da matéria orgânica nesta profundidade, que favorece a diminuição da densidade do solo pela maior estruturação do solo.

O tratamento PC na profundidade de 0-5 cm, apresentou um maior valor de densidade do solo em relação ao MN, PD5 e PD12 (Quadro 5). Cunha et al. (2001) constataram, em um estudo com plantio convencional com 6 anos, uma tendência de aumento da densidade do solo na superfície, devido a eliminação dos possíveis efeitos do revolvimento sobre a densidade do solo causados pelo tráfego (Voorhess & Lindstron, 1983).

Neste estudo foi constatada uma diminuição da densidade do solo com o tempo de adoção no sistema plantio direto (Quadro 5), corroborando com os de Da Ros et al. (1997). Deve-se observar que os resultados relacionados com os sistemas de manejo do solo apresentam uma diversidade de respostas a um mesmo sistema, por causa de características do solo, da planta, do clima e outros.

Os tratamentos MN e PD12 na profundidade de 0-5 cm, apresentaram densidade do solo significativamente diferentes dos demais tratamentos, evidenciando o efeito do tempo de utilização do sistema plantio direto na recuperação estrutural do solo, dados que corroboram com os de Da Ros et al. (1997), que observaram que com o uso do sistema plantio direto, por vários anos, a densidade do solo pode diminuir, devido ao acúmulo de resíduos culturais na superfície, favorecendo a reestruturação do solo.

Analisando o Quadro 5, observa-se na profundidade de 10-15 cm, valores de densidade do solo mais elevados do que a profundidade 0-5 cm, tendendo com o tempo de adoção no sistema plantio direto a se estabilizar. O aumento da densidade de solo em áreas agrícolas é reportado por vários autores, sendo considerado como consequência normal do sistema plantio direto (Vieira, 1981; Reinert, 1990 e Hånkansson & Medvedev, 1995). Henklain et al. (1996) e Henklain (1997), em estudos sob plantio direto de longa duração, observaram que a compactação mais elevada no sistema de plantio direto nos primeiros anos de condução não justifica a mobilização dessa camada para melhor condicionamento físico e maior produção. É neste período de tempo que o sistema começa a consolidar pelos efeitos dos restos culturais tanto na superfície como principalmente na subsuperfície, havendo melhorias

na qualidade de poros, que embora menores, apresentam contínuos ao longo do perfil, além de canais e galerias formados pela decomposição dos diferentes sistemas radiculares das rotações de culturas e adubos verdes introduzidos, atividade biológica e fendas provocadas pelos gradientes de umidade.

O grau de compactação (GC) (Quadro 5) do solo nos diferentes tratamentos variou de 71,61 a 92,52%. A influência dos diferentes sistemas de manejo e o efeito do tráfego foram determinantes para a variação dos resultados. Nos tratamentos sob plantio direto o GC variou de 71,61 a 82,39% na profundidade de 0-5 cm e de 85,79 a 92,52% na profundidade de 10-15 cm.

O grau de compactação tendeu a diminuir a partir do sistema PD5 e sendo diferente estatisticamente dos demais o PD12 na profundidade de 0-5 cm, devido ao maior grau de estruturação do solo (Quadro 6). Esses dados corroboram com Carpenedo (1994) que, trabalhando com um Latossolo Roxo distrófico, observou que a semeadura direta utilizada por 14 anos consecutivos desenvolveu condições físicas favoráveis superiores às observadas no preparo convencional com relação a compactação do solo.

Considerando os limites estabelecidos para o grau de compactação por Linstrom & Voorhess (1994), que considerou elevados valores acima de 86%, com efeitos prejudiciais ao desenvolvimento e rendimento das culturas, observa-se (Quadro 5) que nas áreas agricultáveis esse limite crítico não foi atingido, para a profundidade de 0-5 cm.

No PD12, na profundidade de 0-5 cm, foi encontrado valores menores do que 80% que, segundo Linstrom & Voorhess (1994) podem afetar negativamente a produtividade de algumas culturas, devido a redução na capacidade de armazenamento de água, em razão da maior quantidade de macroporos, corroborando com os resultados encontrados neste estudo, e evidenciando uma redução na capacidade de retenção de água (Quadro 10) em razão da maior quantidade de macroporos (Quadro 9).

A utilização somente do grau de compactação, não é suficiente para diagnosticar o efeito dos atributos físicos do solo sobre a planta, considerando um indicador de prováveis limitações ao desenvolvimento das culturas. É necessário a avaliação de outros parâmetros de sustentabilidade estrutural, como o ensaio de compressibilidade para o estabelecimento e diagnóstico das pressões máximas admissíveis com o mínimo de deformação estrutural do solo (Dexter, 1988).

6.6 Distribuição de agregados por classes de tamanho e diâmetro médio geométrico (DMG)

Os resultados da distribuição de agregados nas classes > 2 mm, < 2 mm, 2-1 mm e < 1 mm e do DMG nas duas profundidades, em função dos diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto, encontram-se no Quadro 6.

A análise de variância mostrou efeitos significativos dos tratamentos (sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto) e profundidades sobre as diferentes classes de agregados e o DMG e a interação destes com a profundidade (Apêndice 6).

Quadro 6. Valores do diâmetro médio geométrico (DMG), agregados > 2 mm, < 2 mm, 2-1 mm e < 1 mm para os diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto. Médias de nove repetições

Tratamento	Profund.	DMG	>2 mm	< 2mm	2-1 mm	<1 mm
	---cm---	---mm---	-----%-----			
Mata Nativa (MN)	0-5	4,78 Aa	98,6 Aa	1,4 Eb	0,4 Eb	0,9 Db
	10-15	4,34 Ab	93,5 Ab	6,5 Ea	2,8 Da	3,4 Da
Plantio Convencional (PC)	0-5	0,83 Ea	22,8 Ea	77,2 Aa	17,9 Ba	64,3 Aa
	10-15	0,96 Ea	27,6 Ea	72,4 Aa	19,2 BCa	56,7 Aa
Plantio Direto 1 ano (PD1)	0-5	1,45 Db	40,81 Db	59,2 Ba	21,8 Aa	40,2 Ba
	10-15	2,00 Ba	55,0 Ba	45,0 Db	16,6 Cb	30,46 Cb
Plantio Direto 4 anos (PD4)	0-5	1,47 Da	42,6 Da	57,4 Bb	18,4 Bb	41,8 Ba
	10-15	1,31 DEb	32,5 DEb	67,5 ABa	26,2 Aa	43,90 Ba
Plantio Direto 5 anos (PD5)	0-5	2,85 Ca	71,1 Ca	28,9 Cb	11,4 Cb	18,2 Cb
	10-15	1,89 BCb	48,9 BCb	51,1 CD	22,3 ABa	30,53 Ca
Plantio Direto 12 anos (PD12)	0-5	3,87 Ba	89,0 Ba	11,0 Db	3,8 Db	7,7 CDb
	10-15	1,54 CDb	40,7 CDb	59,3 BC	21,5 ABCa	42,27 BCa

Letras maiúsculas na coluna comparam diferenças entre os tratamentos para cada profundidade de manejo, no nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Letras minúsculas na coluna comparam diferenças entre as duas profundidades de cada tratamento, no nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Analisando os resultados (Quadro 6) observa-se que os agregados do solo quando submetidos ao tamisamento úmido, apresentam grandes variações entre os tratamentos e profundidades em estudo.

Na Figura 6 é apresentada a distribuição percentual de agregados por classe de tamanho, profundidades para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.

No presente estudo o tratamento MN apresentou a maior porcentagem de agregados estáveis em água nas classes de maior diâmetro (> 2 mm) com valores acima de 90% em ambas as profundidades. O DMG foi de 4,78 e 4,34 mm, para as profundidades de 0-5 e 10-15 cm, respectivamente. Esta maior agregação no tratamento MN é resultante do grande acúmulo de matéria orgânica ao longo dos anos, em virtude da não ação antrópica por mais de 40 anos, influenciando fortemente a agregação do solo, relato também observado por Bayer & Mielniczuk (1999), em solos sob vegetação natural.

Observando o tempo de adoção do sistema plantio direto nota-se um aumento significativo nos agregados de maior diâmetro (> 2 mm), na profundidade de 0-5 cm, no PD1, PD4, PD5 e PD12 com valores de 40,81%, 42,6%, 71,1% e 89,0%, respectivamente, enquanto que no PC foi de apenas 22,8% (Quadro 6). A menor mobilização do solo e a decomposição de restos culturais resultou em ligantes orgânicos, conferindo uma maior resistência do solo ao impacto das gotas de chuva, e perdas de solo, água e elementos nutrientes por erosão. Esses dados corroboram com aqueles apresentados por Da Ros et al. (1996), ressaltando o efeito benéfico do sistema plantio direto, contribuindo para o manejo sustentado do solo. Castro Filho et al. (1998), em estudo em Latossolo Roxo com 14 anos de duração no sistema plantio direto, observou que com o aumento do teor de carbono orgânico resultou em aumento no DMG pela diminuição de agregado de menor diâmetro ($< 0,25$ mm) e aumento de agregados de maior diâmetro.

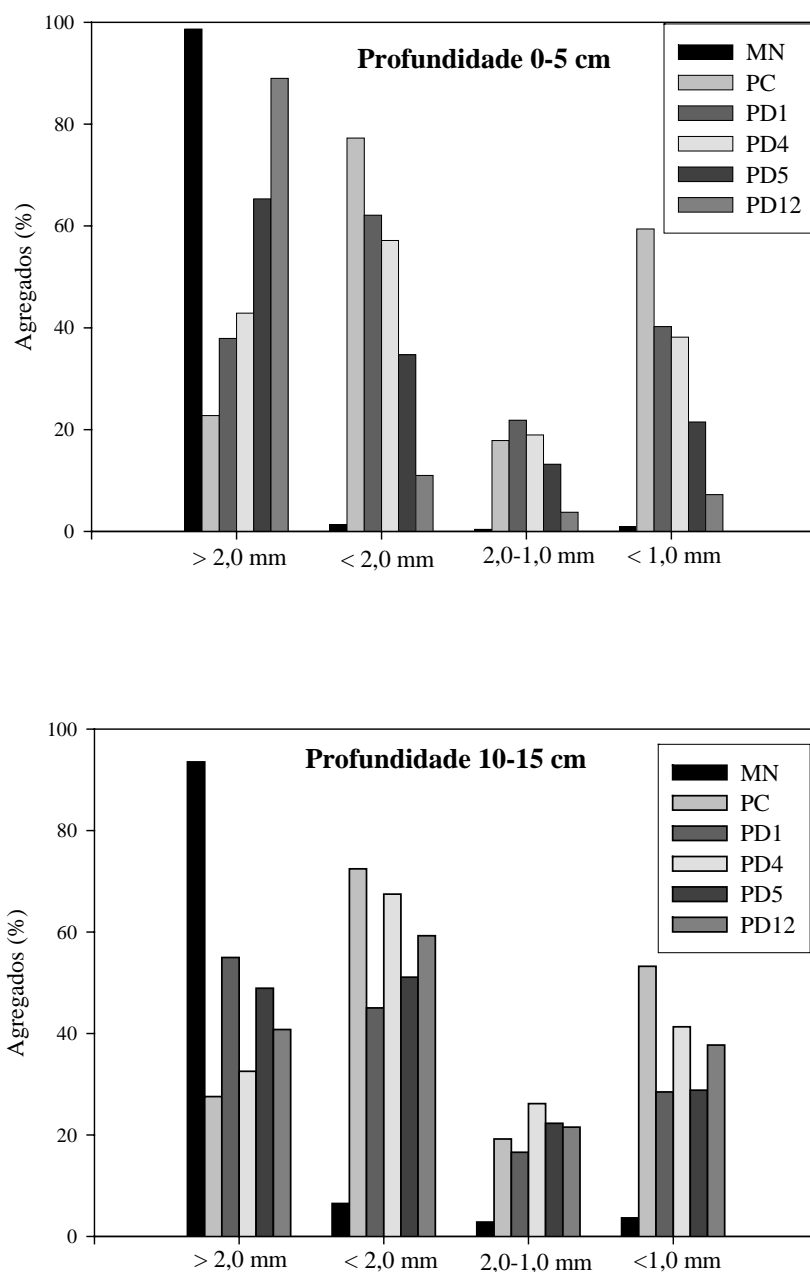


Figura 6. Distribuição percentual de agregados por classe de tamanho, profundidades para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.

Deve-se também atribuir a maior agregação nos tratamentos sob plantio direto ao efeito das diferentes sucessões e rotações nos tratamentos em estudo. Este efeito possivelmente ocorreu com maior intensidade nos tratamentos PD4 e PD5 que tiveram predominância da cultura do milho como cultura de verão e diferentes plantas de cobertura no

inverno. Espera-se que a sucessão gramínea/gramínea tenha contribuído com maior quantidade de massa seca. Maiores benefícios das gramíneas tem sido relatados em diversos trabalhos (Carpenedo & Mielniczuk, 1990; Paladini & Mielniczuk, 1991; Silva & Mielniczuk, 1997a; Silva & Mielniczuk, 1998).

O parâmetro mais afetado pela matéria orgânica é a agregação e a partir do seu efeito direto ou indireto afetam outros atributos físicos do solo, indicadores da qualidade do solo, tais como: porosidade, distribuição de poros por tamanho, capacidade de retenção de água, infiltração e movimento de água, entre outros (Bayer & Mielniczuk, 1999). A matéria orgânica é responsável por estabilizar os agregados do solo devido sua maior área superficial e capacidade de troca de íons, possibilitando um maior número de ligações eletrostáticas entre as partículas do solo (Angers, 1992).

A maior desagregação no sistema convencional e menor no sistema plantio direto (Quadro 6), segundo Tisdall & Oades (1982), se deve ao fato de que em solos cultivados, os agregados são expostos com frequência à desagregação física ou pelas mudanças climáticas (rápido umedecimento ou pelo impacto da gota de chuva), ou pela ação de implementos agrícolas, uma vez que os agregados maiores que 2 mm de diâmetro estáveis em água, consistem em agregados e partículas mantidos juntos, em decorrência da rede fina de raízes e hifas. Resultados da intensa utilização de equipamentos de preparo do solo, com maior desagregação e degradação física de solo foram observados por Carpenedo & Mielniczuk (1990), Paladini & Mielniczuk (1991) e Campos et al. (1999).

Os resultados obtidos sugerem que o preparo de solo no sistema convencional, por mais de vinte anos, fracionou os agregados maiores em unidades menores, causando modificações significativas com relação as características originais, sendo estas mais afetadas quanto maior a intensidade de preparo do solo, tornando-o mais susceptível a erosão. A classe predominante de agregados no PC foi a < 1 mm. Resultados semelhantes de fracionamento de agregados foram encontrados em diversos trabalhos por Grohmann & Arruda (1961), Reinert et al. (1984), Carpenedo & Mielniczuk (1990), Campos et al. (1995), Da Ros et al (1996) e Beutler et al. (2001b).

Analisando a classe de tamanho de agregado com diâmetro < 1 mm, observa-se na profundidade de 0-5 cm uma diminuição significativa dos agregados com o

tempo de adoção no sistema plantio direto. Dados também observados por Castro Filho et al. (1998).

Já no 1^o ano no sistema plantio direto houve um aumento de 79% na classe de agregados > 2 mm em relação ao convencional na profundidade de 0-5 cm e nas demais áreas os seguintes acréscimos: PD4 (87%), PD5 (211,8%), PD12 (290%) e MN (332,5%). Na profundidade de 10-15 cm o acréscimo com o tempo de adoção na classe de diâmetro > 2 mm foi menor (Quadro 6).

A redução nos agregados < 2 mm em relação ao PC na profundidade de 0-5 cm foram da seguinte ordem: PD1 (23%), PD4 (26%), PD5 (63%), PD12 (86%) e MN (98,2%).

Os valores observados para O DMG variaram de 0,83 a 4,78 mm (0-5 cm) e de 0,96 a 4,34 mm (10-15 cm). Os valores da classe de agregados maiores que 2 mm, apresentaram a mesma tendência de comportamento do DMG, concordando com Silva et al. (2000a) e Alvarenga et al. (1986) que observaram a mesma tendência, mostrando que esta classe de agregados pode ser utilizada para expressar a agregação do solo.

Na profundidade de 0-5 cm, o DMG teve um aumento da seguinte ordem: PD1 (75%), PD4 (77%), PD5 (243%), PD12 (366%) e MN (476%) em relação ao plantio convencional.

A relação entre o DMG dos agregados e os teores de carbono orgânico são demonstrado por diversos autores, tais como Roth et al. (1991) e Silva & Mielniczuk (1997b), que observaram que a importância da matéria orgânica na estabilidade dos agregados é variável com a textura e mineralogia dos solos, entre outros fatores.

A maior estabilidade de agregados no PD12 em relação aos demais anos sob plantio direto, verificada por meio do DMG (Quadro 6), pode ser explicada, pelas práticas de manejo, como o preparo do solo, adição de materiais orgânicos e o histórico cultural da área, têm significativa influência sobre a agregação quando considerados longos períodos de tempo (Harris et al., 1966). No presente estudo a distribuição dos agregados dos solos sob PD12 foi a que mais se aproximou da apresentada pelo solo sob mata. Da Ros et al. (1997), em estudo comparativo entre sistemas de preparo após cinco anos de cultivo observaram que o diâmetro médio geométrico dos agregados no tratamento com plantio direto foi estatisticamente equivalente ao do campo nativo.

A decomposição lenta e gradual dos resíduos culturais associado ao não revolvimento do solo libera compostos orgânicos que estimulam a formação e a estabilidade de agregados (Tisdall & Oades, 1982) proporcionando uma proteção física para a matéria orgânica que atua como elemento de ligação entre os agregados menores para a formação dos agregados maiores.

O efeito do maior DMG na profundidade de 10-15 cm no PD1 em relação a profundidade de 0-5 cm, deve-se provavelmente ao efeito posterior da incorporação de restos vegetais na camada arável antes da instalação no sistema plantio direto. Albuquerque et al. (1994) relata a variação temporal da estabilidade dos agregados em manejo do solo com apenas um ano de cultivo. Fica evidente que a estabilidade da estrutura pode variar temporariamente com processos físicos relacionados com o clima, crescimento de plantas, com o preparo do solo e tráfego de maquinário agrícola.

Nas Figuras 7 e 8 são apresentadas as relações entre o DMG, diâmetro de agregado maior do que 2 mm ($D > 2$ mm) e os teores de matéria orgânica para os sistemas de manejo, profundidades e o tempo de adoção no sistema plantio direto. Apesar dos baixos coeficientes de determinação ($R^2 = 0,48$) para DMG e MO e ($R^2 = 0,39$) para $D > 2$ mm e MO, estes foram significativos a 1%, demonstrando a ação de outros agentes além da matéria orgânica na agregação do solo.

Portanto, utilizando a distribuição de agregados por tamanho como indicadora de qualidade do solo, é possível identificar se o manejo atual está contribuindo positiva ou negativamente em termos de manejo sustentável e fazer uma identificação inicial do problema (Lima et al., 2000).

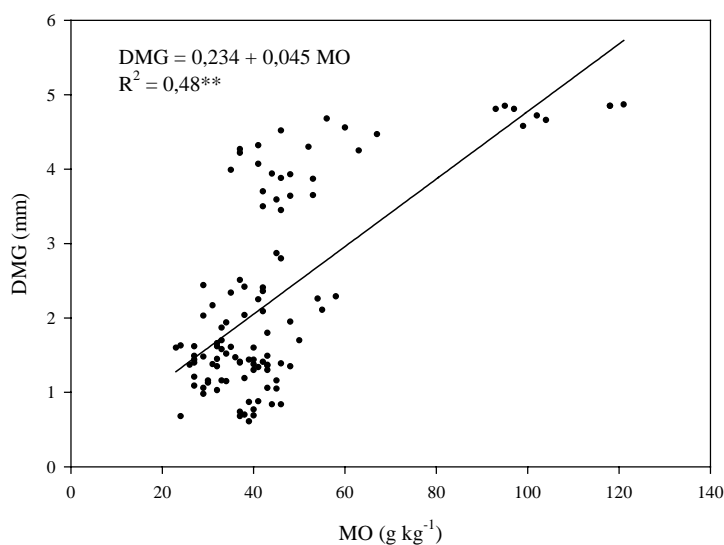


Figura 7. Relação entre o diâmetro médio geométrico (DMG) e os teores de matéria orgânica (MO) para os diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto em um Nitossolo Vermelho distroférico. ** Significativo a 1%.

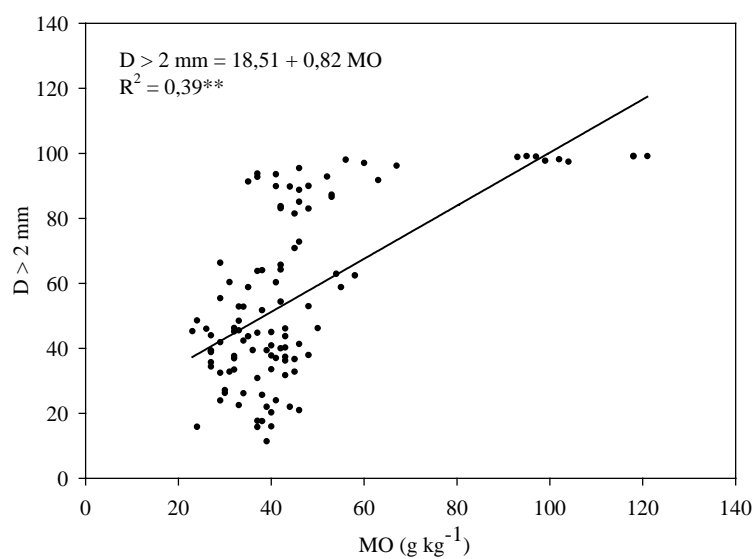


Figura 8. Relação entre as porcentagens de agregados com diâmetros maiores que 2 mm ($D > 2$ mm) e os teores de matéria orgânica (MO) para os diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto em um Nitossolo Vermelho distroférico. ** Significativo a 1%.

6.7 Resistência do solo à penetração

No Quadro 7 são apresentados os resultados obtidos na resistência do solo à penetração nos diferentes sistemas de cultivo estudados e tempo de adoção no sistema plantio direto. A análise de variância mostrou efeitos significativos dos tratamentos (sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto) e profundidades sobre a resistência do solo à penetração e com interação destes com as profundidades (Apêndice 7).

Quadro 7. Valores médios dos índices de cone (MPa) nas diferentes profundidades para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto e seus respectivos coeficientes de variação (CV).

Tratamento	IC ₀₋₁₀	IC ₁₀₋₂₀	IC ₂₀₋₃₀	IC ₃₀₋₄₀	CV (%)
MN	0,65 Cc	1,91 Cb	3,17 Ba	3,37 Aa	17,24
PC	1,15 ABc	1,92 Ca	1,60 Db	1,12 Dc	25,28
PD1	0,74 Cc	2,06 Cb	2,80 Ca	2,73 Ba	16,69
PD4	1,27 Ac	3,07 ABb	3,47 ABa	3,25 Aab	19,24
PD5	1,17 ABb	3,39 Aa	3,53 Aa	3,48 Aa	9,42
PD12	1,05 Bc	2,76 Ba	2,53 Ca	2,06 Cb	17,00
CV (%)	25,33	17,88	14,49	14,88	

Letras maiúsculas na coluna comparam diferenças entre os tratamentos, no nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Letras minúsculas na linha comparam diferenças entre as profundidades (IC) para cada tratamento, no nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

No Quadro 8 são apresentados os valores de umidade gravimétrica determinada por ocasião da determinação da resistência do solo à penetração. Os resultados da análise de variância aplicada aos teores de água no solo relata que houve diferença significativa pelo teste F para os tratamentos, profundidades, mas sem interação destes dois fatores (Apêndice 7).

Os valores de umidade no momento da avaliação da resistência do solo à penetração nos tratamentos analisados (Quadro 8) encontram-se dentro e em alguns casos pouco abaixo da faixa de friabilidade do solo (LP-LC) (Quadro 3). Em razão da pequena faixa de variação de umidade nas áreas por ocasião da determinação da resistência do solo à

penetração e por estar dentro da faixa de friabilidade do solo, permitiu a realização de análises comparativas. Observa-se que os valores de umidade nas duas profundidades foram entre 0,19 a 0,29 kg kg⁻¹ (Quadro 8).

Quadro 8. Umidade gravimétrica do solo (kg kg⁻¹) nos diferentes tratamentos relativos a coleta de dados de resistência do solo à penetração. (Média de três repetições)

Tratamento	Profundidade (m)	
	0,0 - 0,20	0,20 - 0,40
	-----kg kg ⁻¹ -----	
MN	0,22 ABa	0,23 Ba
PC	0,24 Ab	0,29 Aa
PD1	0,22 ABa	0,26 ABa
PD4	0,22 ABb	0,24 ABa
PD5	0,23 ABa	0,26 ABa
PD12	0,19 Bb	0,22 Ba

Letras maiúsculas na coluna comparam diferenças entre os tratamentos, no nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Letras minúsculas na linha comparam diferenças entre as duas profundidades para cada tratamento, no nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Segundo Torres & Saraiva (1999) é na faixa de friabilidade a indicada para detectar as possíveis diferenças na avaliação da resistência do solo à penetração.

Na Figura 9 é apresentada a resistência do solo à penetração ao longo do perfil dos solos para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.

Os diferentes sistemas de cultivo e tempo de adoção no sistema plantio direto influenciaram a resistência do solo à penetração de forma mais acentuada, abaixo da camada de 0-10 cm. Tormena (1991) concluiu que a resistência do solo à penetração mostrou-se sensível às modificações impostas ao solo pelos processos de compactação e consolidação induzidos pelo tráfego e fatores climáticos em área não irrigada.

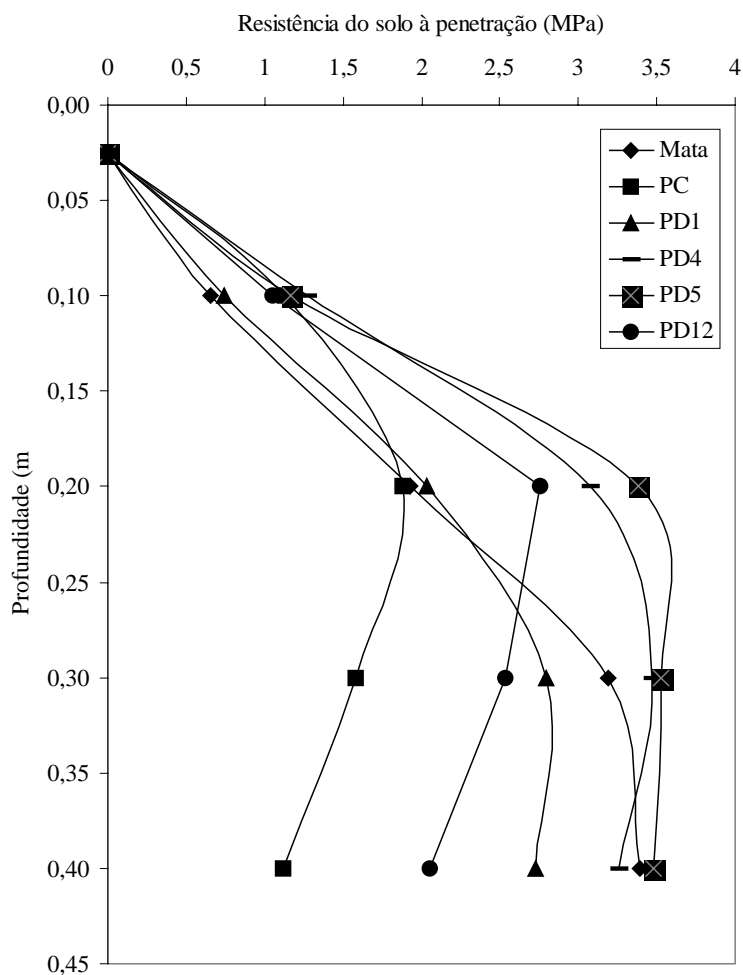


Figura 9. Resistência do solo à penetração ao longo do perfil dos solos para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.

Os valores dos índices de cone encontrados neste estudo situam-se dentro da faixa de 0,7 a 3,5 MPa (Quadro 7), sendo que os resultados para o $IC_{(0-10)}$, de uma maneira geral, refletem os efeitos da mobilização, da maior concentração de matéria orgânica e do tráfego em cada sistema de manejo.

Adotando o valor de 2,5 MPa como resistência crítica ao desenvolvimento radicular da soja na consistência friável, segundo Torres & Saraiva (1999), os resultados indicam que nas áreas de PD4, PD5 e PD12, nas profundidades de 10-20 e 20-30 cm, apresentam valores superiores, indicando possíveis restrições à penetração de raízes, em períodos de déficit hídrico. Lucarelli (1997) utilizando-se da resistência à penetração para estudar diferentes sistemas de manejo, observou que o sistema plantio direto apesar de apresentarem maior resistência do solo à penetração, propiciaram melhor estruturação e elevada taxa de infiltração de água.

Nos diferentes sistemas de cultivo, os tratamentos PD4 e PD5 foram os que apresentaram maiores valores de índice de cone em todas as profundidades, sendo que na profundidade de 20 a 30 cm, esses valores foram da ordem de 3,5 MPa. Em estudo em Latossolo Vermelho Escuro, para avaliar a resistência mecânica do solo à penetração sob o efeito de tráfego com 10 anos sob plantio direto, Silva et al. (2000b) constataram que os maiores valores de resistência à penetração foram encontrados no sistema plantio direto, que apresentou maior estado de compactação na camada de 7,5 a 17,0 cm. No presente estudo, no $IC_{(10-20)}$, ocorreu um aumento significativo da resistência do solo à penetração, para os tratamentos com o PD4 e o PD5. Este aumento da resistência do solo à penetração nestes tratamentos pode ser atribuído à tendência geral de aumento do índice de cone com o tempo, resultante da compactação causada pelo tráfego em subsuperfície (Tormena & Roloff, 1996).

Diversos trabalhos relatam a maior resistência do solo à penetração no sistema plantio direto em razão da ausência do revolvimento e a ocorrência de tráfego de máquinas agrícolas, constituindo um dos principais problemas do sistema (Carvalho Júnior et al., 1998; Tormena et al., 1998; Bicudo & Santos, 1999; Costa et al., 2000; Silva et al., 2000b; Beutler et al., 2001a; Sverzut et al., 2001).

Desta forma espera-se que o sistema radicular das culturas tenham dificuldade de crescimento; entretanto, observações experimentais tem demonstrado que nestas condições, é possível um adequado crescimento radicular, pela presença de cobertura do solo em níveis adequados, promovendo a manutenção de um maior teor de água, que promove a redução dos efeitos da maior resistência (Tormena, 1996).

O PD12 apresentou uma diminuição significativa no $IC_{(30-40)}$ (Quadro 7), sendo esta tendência também observada por Sverzut et al. (2001), em área com 10 anos sob

plantio direto. Assim, o efeito do tempo de adoção no sistema plantio direto na recuperação estrutural do solo, com a diminuição da resistência à penetração, é um fato comprovado por esses pesquisadores.

A ocorrência de valores mais elevados de resistência do solo à penetração, abaixo dos 0,25 m de profundidade em relação à superfície é, provavelmente, promovida, em parte, à presença do horizonte B com elevados teores de argila nas áreas estudadas (Carvalho et al., 1983). O efeito do acúmulo de argilas em profundidade, promove o aumento do conteúdo volumétrico de sólidos, traduzindo em aumento da densidade do solo e drástica redução na macroporosidade, na quantidade de água disponível à planta e na aeração do solo (Alvarenga et al., 1996). O acúmulo de argila em profundidade é a possível explicação para os elevados valores nos IC na área de mata nativa (Quadro 7).

O PC apresentou o maior coeficiente de variação (25,28%) na resistência do solo à penetração em razão das operações de preparo do solo (Quadro 7). A elevação na resistência do solo à penetração na superfície é resultado de que os possíveis efeitos do revolvimento sobre a densidade do solo foram eliminados pelo tráfego (Tormena et al., 1998) e, de acordo com Voorhess & Lindstrom (1983), este fato se justifica pelas magnitudes de cargas aplicadas pelos equipamentos nas operações de manejo.

A camada superficial das áreas estudadas na profundidade de 0-10 cm, foram as que apresentaram maiores coeficientes de variação, devido a influência marcante dos sistemas de preparo e do tráfego (Quadro 7).

O sistema PC proporcionou redução nos valores de resistência do solo à penetração abaixo dos 20 cm, quando em comparação com as áreas sob plantio direto, sendo estes resultados semelhantes àqueles encontrados por Pedrotti et al. (2001), é atribuído ao efeito da profundidade de preparo da grade aradora.

Os resultados apresentados no Quadro 7, indicam ser o índice de cone um parâmetro recomendável para avaliação da compactação em função dos sistemas de manejo, e intensidade de tráfego, desde que suas determinações sejam realizadas com o solo dentro de uma mesma faixa de umidade, aumentando desta forma a sensibilidade das avaliações.

6.8 Porosidade total e distribuição de poros por tamanho

No Quadro 9 estão apresentados valores de macro, microporosidade e porosidade total para os diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto.

A análise de variância mostrou efeitos significativos dos tratamentos (sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto) e profundidades sobre macro, microporosidade e a interação somente da macroporosidade com a profundidade. A porosidade total não apresentou efeito significativo dos tratamentos, mas apresentou efeito da profundidade e interação entre tratamento e profundidade (Apêndice 8).

O espaço poroso do solo em todos os tratamentos estudados é composto predominantemente por microporos (Quadro 9). A proporção ideal da distribuição de poros por tamanho, segundo Kiehl (1979) é de 2:1 (micro/macroporo), garantindo suficiente aeração, permeabilidade e capacidade de retenção de água. Analisando os diferentes tratamentos e as profundidades, observa-se que a profundidade de 0-5 cm foi a que expressou melhor esta distribuição (Quadro 9). A porosidade total, em todos os sistemas e profundidades, esteve acima de $0,5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Segundo Camargo & Alleoni (1997), um solo ideal deve apresentar $0,5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de volume de poros que, na capacidade de campo, teria $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ocupado pela água e $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ocupado pelo ar.

O efeito da mobilização do solo no PC, favorecendo a formação de macroporos, não foi constatada no presente estudo (Quadro 9). Porém, tal condição ocorre somente nos primeiros meses após as operações de preparo, pois a compactação e, por consequência, modificações na distribuição de poros por tamanho, inicia-se no mesmo momento em que é finalizada a semeadura e, segundo Carvalho et al. (1999), a grade pesada acarreta compactação da camada superficial e reduz os teores de matéria orgânica na camada de 0-15 cm, dados estes que corroboram com o presente estudo. Convém ressaltar que as coletas para as determinações foram feitas após o período de colheita da cultura de verão e, portanto, o efeito do revolvimento do solo não estava mais presente.

Quadro 9. Valores de macroporosidade, microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), relação (micro/macro) e porosidade total para os diferentes tipos de sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto. Média de nove repetições.

Tratamento	Profundidade -----cm-----	Macro ----- $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ -----	Micro ----- $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ -----	Relação (Micro/Macro)	Porosidade total ---- $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ----
Mata Nativa (MN)	0-5	0,19 Ba	0,38 Bb	2,0	0,57 Aa
	10-15	0,11 Ab	0,44 Aa	4,0	0,55 ABa
Plantio Convencional (PC)	0-5	0,17 Ba	0,42 Ab	2,5	0,59 Aa
	10-15	0,11 Ab	0,45 Aa	4,1	0,56 ABb
Plantio Direto 1ano (PD1)	0-5	0,22 ABa	0,39 ABb	1,8	0,61 Aa
	10-15	0,13 Ab	0,44 Aa	3,4	0,57 Ab
Plantio Direto 4anos (PD4)	0-5	0,17 Ba	0,42 ABa	2,5	0,59 Aa
	10-15	0,13 Ab	0,43 Aa	3,3	0,56 Ab
Plantio Direto 5anos (PD5)	0-5	0,18 Ba	0,40 ABb	2,2	0,58 Aa
	10-15	0,11 Ab	0,43 Aa	3,9	0,54 ABa
Plantio Direto 12anos (PD12)	0-5	0,27 Aa	0,34 Cb	1,3	0,60 Aa
	10-15	0,13 Ab	0,39 Ba	3,0	0,51 Bb

Letras maiúsculas na coluna comparam diferenças entre os tratamentos para cada profundidade de manejo, no nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Letras minúsculas na coluna comparam diferenças entre as duas profundidades de cada tratamento, no nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Observa-se que, no PD12, ocorreu um aumento da macroporosidade e diminuição da microporosidade na camada de 0-5 cm em relação ao plantio convencional. Voorhees e Linstrom (1984) sugerem um período aproximado de três a quatro anos para que ocorra um desenvolvimento mais favorável da porosidade na camada superficial, comparando os sistemas plantio direto e o plantio convencional. Porém, no presente estudo, esta diferença somente foi detectada aos 12 anos no sistema plantio direto, e essas melhorias estruturais não resultaram em maior capacidade de retenção de água (Quadro 10).

Na profundidade de 0-5 cm a porosidade total não foi influenciada pelos sistemas de manejo e pelo tempo de adoção no sistema plantio direto. José (2000), em estudo comparativo entre mata, plantio direto irrigado e sequeiro e plantio no sistema

convencional com 6 anos de exploração, também observou que a porosidade total não foi influenciada pelos sistemas de manejo na profundidade de 0-5 cm.

Com exceção do PD12, o tempo de adoção no sistema plantio direto não promoveu modificações significativas na distribuição de poros por tamanho (Quadro 9), observando-se que, nos tratamentos e profundidades estudados, a macroporosidade não atingiu valores menores do que $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, valor mínimo aceitável para a macroporosidade, que é responsável pela percolação de água, aeração e difusividade dos gases no solo (Kiehl, 1979).

6.9 Retenção de água no solo

O Quadro 10 mostra os valores de retenção de água para os diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto e a Figura 10 apresenta as curvas de retenção de água, compreendendo as tensões de -1, -3, -6, -10, -33, -300 kPa, comprovando-se que, em todos os manejos estudados, a retenção de água decresceu com o aumento da tensão aplicada.

A análise de variância mostrou efeitos significativos dos tratamentos (sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto) sobre a retenção de água (Apêndice 9).

O comportamento das curvas de retenção foram similares em ambas as profundidades e para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto (Figura 10).

Os tratamentos PD1, PD4, PD5 e MN tiveram semelhança na retenção de água em ambas as profundidades, diferindo estatisticamente do PD12, nas duas profundidades e do PC na profundidade de 0-5 cm. Maior retenção de água na superfície em áreas com sistema plantio direto é relatado por Sidiras et al. (1984), Farias et al. (1985), Moreira et al. (1995), Urchei (1996), Figueiredo (1998) e Oliveira (2002), e no presente estudo, sob plantio direto, as áreas de PD1, PD4 e PD5 se destacaram na retenção de água.

Castro et al. (1987) destacam que a maior capacidade de retenção de água, aliada à menor perda de água por erosão e evaporação provocada pela cobertura morta

sobre a superfície do solo, fazem com que os sistemas de plantio direto e preparo reduzido apresentem mais água disponível às plantas, quando comparados ao preparo convencional.

Quadro 10. Valores de retenção de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) do Nitossolo Vermelho distroférico nos diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto (média de 9 repetições).

Profundidade 0-5 cm						
Tensão (kPa)	MN	PC	PD1	PD4	PD5	PD12
-1	0,52 AB	0,53 A	0,53 A	0,51 AB	0,50 BC	0,49 C
-3	0,47 AB	0,47 A	0,48 A	0,49 A	0,47 AB	0,44 B
-6	0,46 AB	0,44 BC	0,46 AB	0,47 A	0,45 AB	0,41 C
-10	0,44 AB	0,41 C	0,44 AB	0,45 A	0,42 BC	0,38 D
-33	0,42 A	0,36 B	0,41 A	0,42 A	0,40 A	0,35 B
-100	0,40 A	0,34 B	0,39 A	0,40 A	0,38 A	0,33 B
-300	0,38 A	0,32 B	0,37 A	0,38 A	0,37 A	0,31 B
Profundidade 10-15 cm						
Tensão (kPa)	MN	PC	PD1	PD4	PD5	PD12
-1	0,52 AB	0,53 A	0,53 A	0,51 AB	0,50 BC	0,48 C
-3	0,48 A	0,47 A	0,49 A	0,48 A	0,47 A	0,42 B
-6	0,46 A	0,45 A	0,46 A	0,46 A	0,45 A	0,39 B
-10	0,44 A	0,43 A	0,44 A	0,44 A	0,43 A	0,37 B
-33	0,42 A	0,41 A	0,42 A	0,42 A	0,41 A	0,34 B
-100	0,40 A	0,38 A	0,40 A	0,40 A	0,39 A	0,32 B
-300	0,38 A	0,36 A	0,38 A	0,38 A	0,38 A	0,31 B

Letras maiúsculas na linha comparam diferenças entre os tratamentos, no nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Avaliando as duas profundidades, observa-se que não ocorreu decréscimo de retenção de água no solo com a profundidade, correlacionando com a matéria orgânica. Resultados semelhantes foram encontrados por José (2000), ao passo que resultados diferentes foram encontrados por Beutler (1999), que constatou diminuição da retenção de água do solo com o aumento da profundidade e diminuição de matéria orgânica.

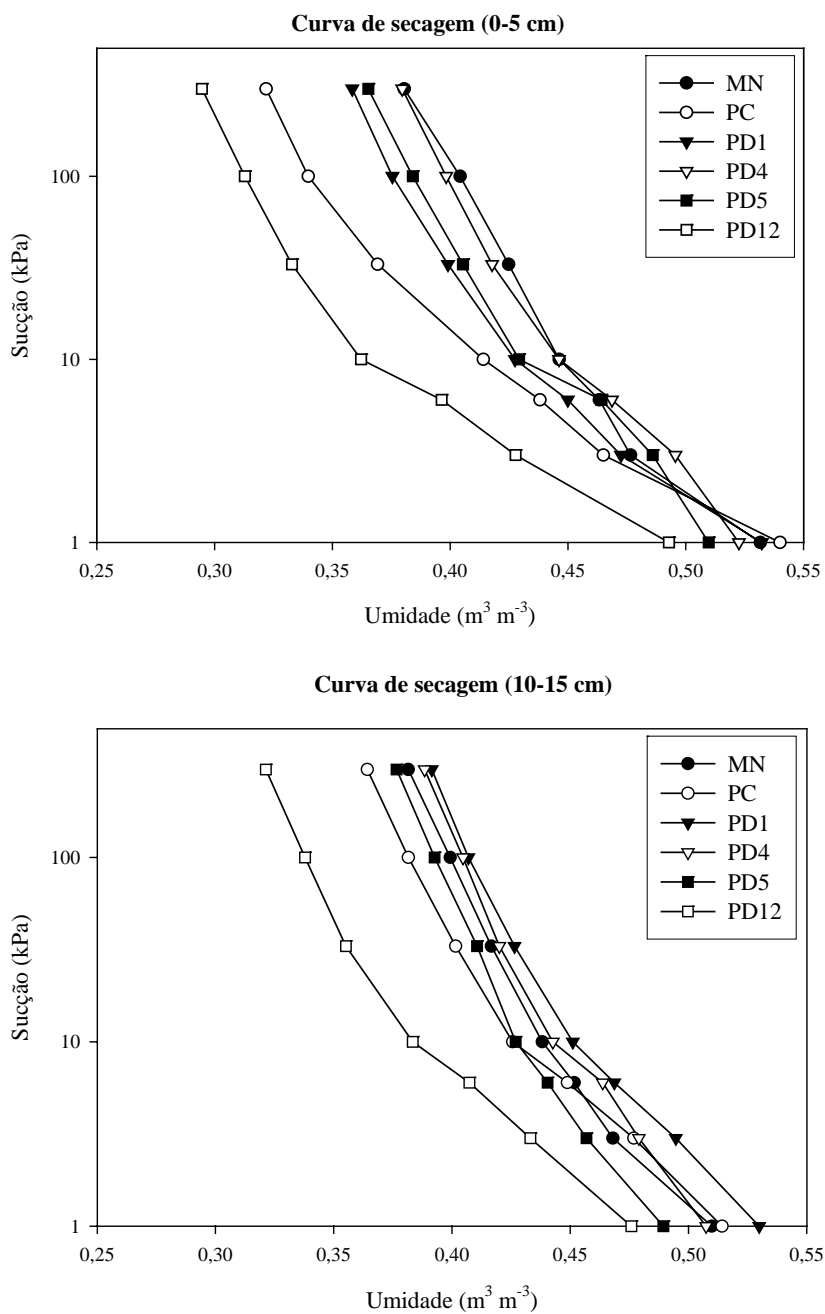


Figura 10. Curvas de retenção de água (secagem) do Nitossolo Vermelho distroférico em diferentes profundidades, sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.

O PC, tomando-se por base a tensão (-10 kPa) na profundidade de 0-5 cm, apresentou uma menor retenção de água a partir dessa tensão em comparação com os

demais tratamentos com exceção do PD12 que apresentou mesmo comportamento. Esta redução na capacidade de retenção de água, possivelmente associa-se a um esvaziamento da água contida nos macroporos, sendo influenciada, a partir daí, pelos microporos. O PD12 em ambas as profundidades diferiu estatisticamente dos demais tratamentos com menor capacidade de retenção de água, possivelmente devido a sua maior macroporosidade e menor microporosidade na profundidade de 0-5 cm (Quadro 9), a influência da textura, principalmente pela maior quantidade de areia (Quadro 2). Costa (1979) reporta que a influência da textura do solo é muito grande na retenção de água, a diferença de teor de matéria orgânica, tipo de argila, entre outros e as diferenças de microestrutura a elas relacionadas.

6.10 Condutividade hidráulica do solo saturado e infiltração tridimensional

Os resultados da infiltração tridimensional (mm h^{-1}) com a carga hidráulica de 9 cm e condutividade hidráulica (mm h^{-1}) são apresentados no Quadro 11, e a análise de variância mostrou efeitos significativos dos tratamentos (sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto) sobre a infiltração tridimensional e condutividade hidráulica do solo saturado (Apêndice 10).

Os tratamentos PC, PD1, PD4 e PD5 não diferiram estatisticamente em relação a infiltração tridimensional, fato explicado, possivelmente, pela igualdade na macroporosidade (Quadro 9).

Os baixos valores de condutividade hidráulica no plantio convencional (PC) em relação ao PD12 (Quadro 11), deve-se a desestruturação excessiva do solo, em decorrência da utilização da aração e gradagem, resultando assim em grande quantidade de partículas finas em suspensão, selando parcialmente os poros, dificultando assim a ocorrência de maiores taxas de infiltração.

O PD12 e o tratamento MN se destacaram quanto aos parâmetros analisados. Analisando a Quadro 11, observa-se que a condutividade hidráulica no PD12 e no MN foi 15 e 11 vezes respectivamente maiores que o PC. Arzeno (1990), em estudo com permeâmetro de Guelph encontrou também resultados superiores do plantio direto em relação

ao PC. A explicação possível deve-se a continuidade de poros, a tortuosidade dos interstícios e pela maior atividade biológica que facilita a movimentação tridimensional da água, dados também encontrados por Chan & Heenan (1993), Castro (1995) e Sarvasi (1994). Estimativas de condutividade hidráulica saturada e infiltração, estatisticamente superiores para o plantio direto em relação ao sistemas de plantio convencional, pode estar relacionado com o fato deste atributo sofrer grande influência da porosidade do solo, da matéria orgânica e da estruturação do solo, conforme argumentam Cadima et al. (1980), Jabro (1992). É de se esperar que no plantio direto as condições gerais dos atributos do solo estejam mais próximas das condições naturais que no plantio convencional.

Quadro 11. Valores médios de infiltração tridimensional (mm h^{-1}) correspondente à segunda carga hidráulica (9 cm) e condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}) e seus respectivos coeficientes de variação, efetuados na profundidade de 0-15 cm nos diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.

Tratamento	Infiltração tridimensional	Condutividade hidráulica
	Média geométrica (mm h^{-1})	Média geométrica (mm h^{-1})
MN	233,45 B	119,18 A
PC	83,50 C	10,42 C
PD1	94,82 C	16,67 BC
PD4	105,65 C	24,59 B
PD5	91,97 C	18,33 BC
PD12	374,63 A	157,51 A
CV (%)	6,54	30,13

Letras maiúsculas na coluna comparam diferenças entre os tratamentos, no nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Neste estudo foram encontrados valores elevados de coeficiente de variação (CV) de 30% para a condutividade hidráulica do solo saturado com o permeâmetro de Guelph, concordando com trabalhos de Arzeno (1990), Sarvasi (1994), Guimarães (2000) e Beutler et al. (2001a). Housseini et al. (1993) que encontraram valores de coeficiente de variação acima de 78%. Castro (1995) obteve coeficientes de variação de 13,74 a 33,14% para

a infiltração tridimensional e de 14,75 a 23,60% para a condutividade hidráulica em diferentes profundidades.

Segundo Reichardt (1996), a condutividade hidráulica é afetada pela estrutura e textura do solo, sendo maior em solo altamente poroso, fraturado ou agregado e menor em solos densos e compactados. Segundo o mesmo autor a condutividade não depende apenas da porosidade total, mas, principalmente das dimensões dos poros.

A infiltração no tratamento MN foi menor do que no PD12 (Quadro 11), e alguns autores encontraram maior infiltração em área de mata nativa do que em solos cultivados (Leite & Medina, 1984; Corrêa, 1985), resultados estes não observados neste estudo, provavelmente pela presença de maior macroporosidade no PD12 (Quadro 9) na profundidade de 0-5 cm.

Os valores de condutividade hidráulica foram classificados segundo diferentes classes de permeabilidade adaptadas do Soil Survey Staff (1993), como: PC, PD1 e PD5: lenta ($5-20 \text{ mm h}^{-1}$), PD4: lenta a moderada ($20-63,5 \text{ mm h}^{-1}$), MN: moderada ($63,5-127 \text{ mm h}^{-1}$) e o PD12: moderada a rápida ($127-254 \text{ mm h}^{-1}$).

A condutividade hidráulica do solo saturado mostrou-se sensível às modificações promovidas nos atributos físicos do solo, sendo um bom indicador de qualidade do solo.

6.11 Ensaio de compressibilidade

No Quadro 12 estão apresentados os valores dos coeficientes “a” e “b” da equação de regressão $\sigma_p = 10^{(a + bU)}$ proposta por Dias Junior (1994), e os respectivos coeficientes de determinação (R^2) para o Nitossolo Vermelho distroférico nos diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto, coletados nas profundidades 0-5 cm e 10-15 cm. Observa-se que os valores de “a” variaram entre 2,63 e 2,97, enquanto os de “b” entre -0,92 e -2,23. Os coeficientes de determinação foram significativos no nível de 1% e variaram de 0,76 a 0,97.

Quadro 12. Coeficientes da equação de regressão, $\sigma_p = 10^{(a + bU)}$, para o Nitossolo Vermelho distroférico nos diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto, coletados nas profundidades 0-5 cm e 10-15 cm.

Tratamento	a	b	R ²	a	b	R ²
	-----0 a 5 cm-----			-----10 a 15 cm-----		
MN	2,83	-1,91	0,88**	2,84	-1,76	0,81**
PC	2,63	-0,92	0,79**	2,81	-1,51	0,91**
PD1	2,73	-1,50	0,76**	2,97	-2,19	0,90**
PD4	2,69	-1,08	0,87**	2,84	-1,51	0,84**
PD5	2,72	-2,23	0,86**	2,83	-1,23	0,84**
PD12	2,75	-1,93	0,97**	2,77	-1,66	0,86**

MN: Mata Nativa; PC: Plantio Convencional; PD1: Plantio Direto com 1 ano; PD4: Plantio Direto com 4 anos; PD5: Plantio Direto com 5 anos; PD12: Plantio Direto com 12 anos.

(**) e (*) significativos no nível de 1 e 5% respectivamente.

Analisando as equações de regressão após linearização, usando o procedimento de Snedecor & Cochran (1989) obtidas para os diferentes manejos, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto, os tratamentos diferenciaram-se estatisticamente com exceção da mata nativa (Quadro 13), podendo inferir que a pressão de preconsoidação são diferentes nas profundidades estudadas.

Em estudos com diferentes condições de manejo e diferentes tipos de culturas, resultados semelhantes foram encontrados por Dias Junior et al. (1999), Kondo & Dias Junior (1999a), Miranda (2001), Oliveira (2002) e Silva (2002).

Quadro 13. Comparação das equações de regressão, após linearização, usando o procedimento de Snedecor & Cochran (1989) para o Nitossolo Vermelho distroférico nos diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto, coletados nas profundidades 0-5 cm e 10-15 cm.

Profundidades de amostragem	Tratamento					
	MN	PC	PD1	PD4	PD5	PD12
0 a 5 e 10 a 15 cm	NS	**	**	**	**	*

MN: Mata Nativa; PC: Plantio Convencional; PD1: Plantio Direto com 1 ano; PD4: Plantio Direto com 4 anos; PD5: Plantio Direto com 5 anos; PD12: Plantio Direto com 12 anos.

(**) e (*) significativos no nível de 1 e 5% respectivamente, e (NS) quando não significativo.

Nas Figuras 11 a 16 são apresentados os modelos de compressibilidade, segundo Dias Junior (1994), para os diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto.

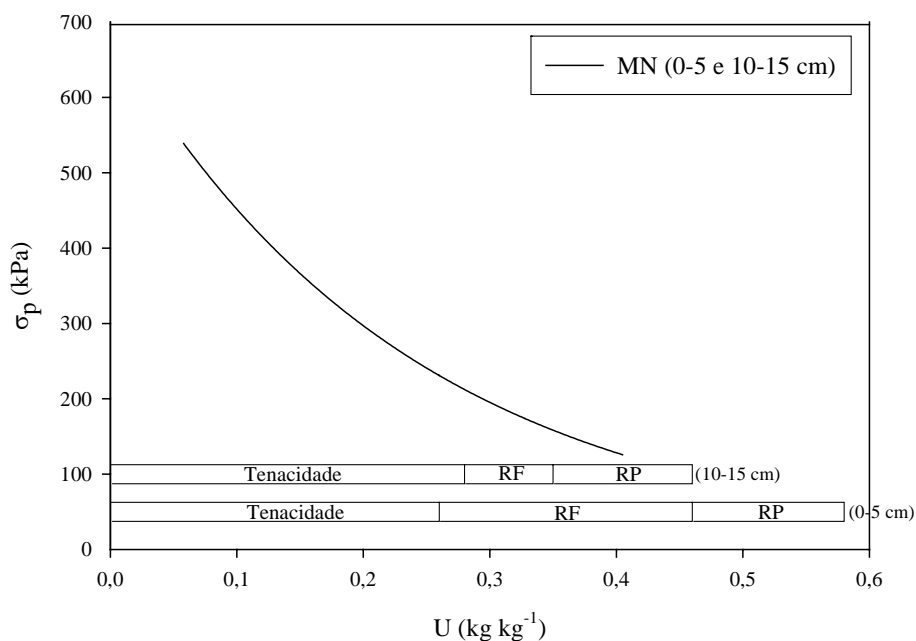


Figura 11. Curva de pressão de preconsolidação em função da umidade em amostras de um Nitossolo Vermelho distroférico no tratamento MN, coletadas nas profundidades 0-5 e 10-15 cm. RF: região de friabilidade, RP: região de plasticidade. (***) significativo no nível de 1%.

No tratamento sob vegetação de MN, utilizado com testemunha, não foi verificada diferença entre as pressões de preconsolidação (σ_p) nas duas profundidades avaliadas (Quadro 13). Observa-se na Figura 11 que os valores de σ_p e de umidade, nas duas profundidades, foram agrupados, resultando em uma nova equação, $\sigma_{p(MN)} = 10^{(2,84^{***} - 1,82 U^{***})}$ com R^2 de 0,84^{***}. A discussão apresentada a seguir, leva em consideração a nova equação obtida. Esse resultado decorre do fato do tratamento não ter sofrido ação antrópica e tráfego de máquinas, não ocorrendo, modificações nos atributos do solo que provocassem diferenciação entre as profundidades. Comportamento semelhante foi constatado por Silva (2002), em estudo em área sob cerrado natural, em comparação com áreas com preparo de solo.

Avaliando o sistema plantio convencional (PC) observa-se que, as equações de regressão $\sigma_p = f(U)$ foram diferentes nas profundidades estudadas (Quadro 13).

Pela Figura 12, verifica-se que os valores de σ_p da profundidade de 10-15 cm do tratamento PC, foram maiores do que os valores da profundidade de 0-5 cm, para os teores de água menores do que $0,30 \text{ kg kg}^{-1}$ e a partir dessa umidade, a maior σ_p é verificada na profundidade de 0-5 cm. A maior capacidade de suporte de carga na profundidade de 10-15 cm, pode estar associada aos maiores valores de densidade do solo e microporos e menores de macroporos, quando comparados aos valores encontrados na profundidade de 0-5 cm (Quadros 5 e 9).

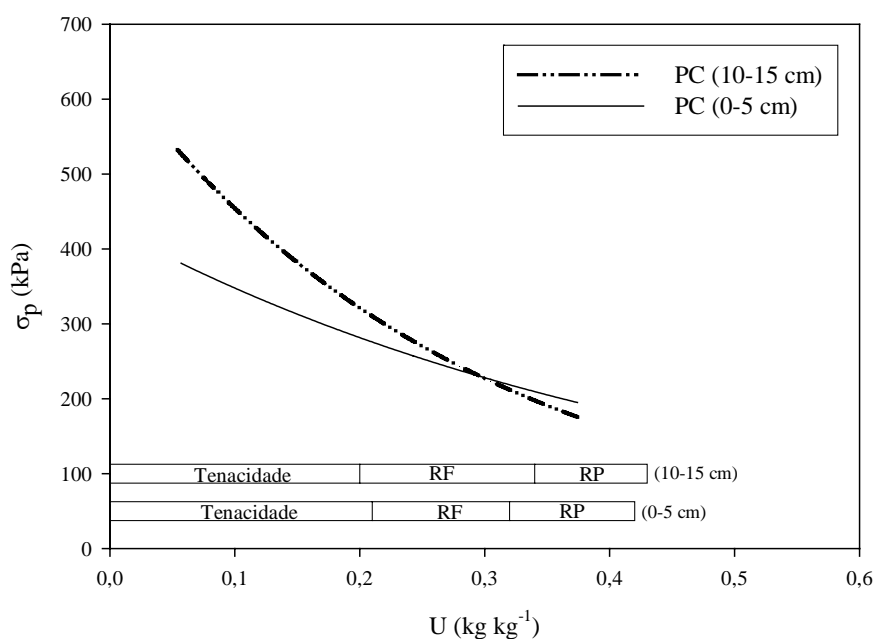


Figura 12. Curva de pressão de preconsolidação em função da umidade em amostras de um Nitossolo Vermelho distroférico no tratamento PC, coletadas nas profundidades 0-5 e 10-15 cm. RF: região de friabilidade, RP: região de plasticidade.

Para os tratamentos PD1 e PD4 as equações de regressão $\sigma_p = f(U)$, foram estatisticamente diferentes para as profundidades estudadas (Quadro 13).

As Figuras 13 e 14 representam os tratamentos PD1 e PD4 e constata-se comportamento semelhante para ambas as profundidades, com valores de σ_p da

profundidade de 10-15 cm maiores do que os valores da profundidade de 0-5 cm, para umidades menores do que $0,33 \text{ kg kg}^{-1}$, em ambos os tratamentos. Para umidades maiores do que $0,33 \text{ kg kg}^{-1}$ a profundidade de 0-5 cm apresentou maior σ_p .

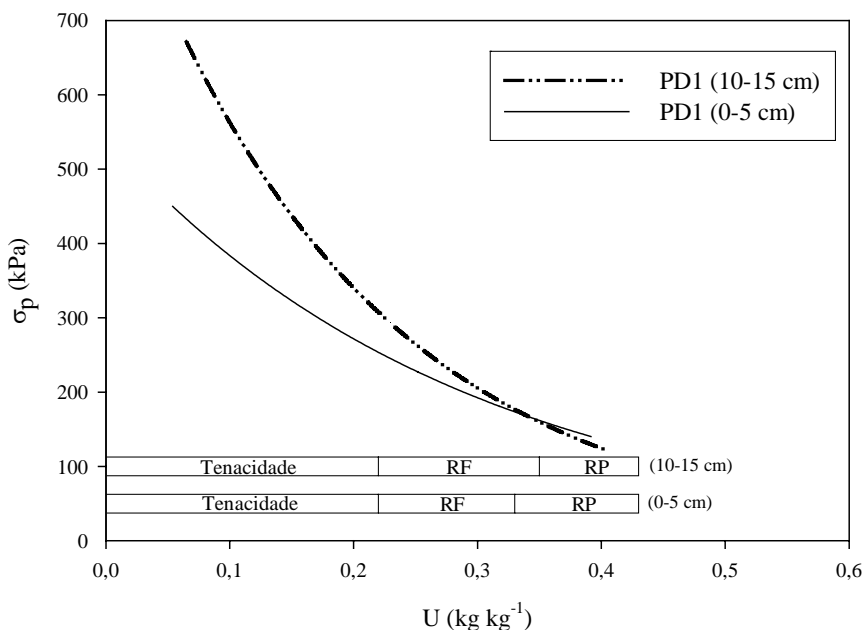


Figura 13. Curva de pressão de preconsolidação em função da umidade em amostras de um Nitossolo Vermelho distroférico no tratamento PD1, coletadas nas profundidades 0-5 e 10-15 cm. RF: região de friabilidade, RP: região de plasticidade.

A maior σ_p na profundidade de 10-15 cm, tanto no PD1 quanto no PD4, pode estar associada aos maiores valores de densidade do solo e menores de macroporosidade (Quadros 5 e 9) e maiores valores de resistência do solo à penetração na profundidade de 10-20 cm (Quadro 7).

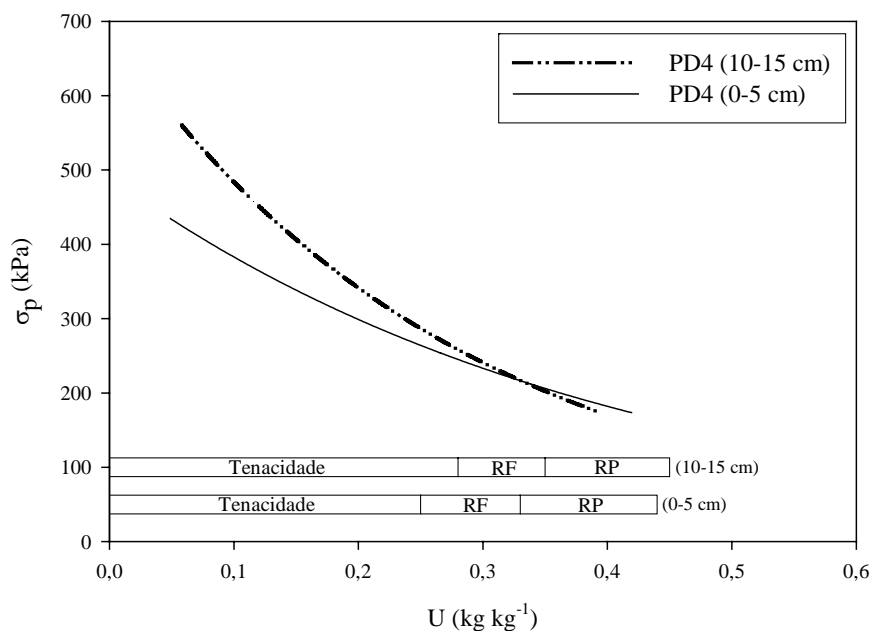


Figura 14. Curva de pressão de preconsolidação em função da umidade em amostras de um Nitossolo Vermelho distroférico no tratamento PD4, coletadas nas profundidades 0-5 e 10-15 cm. RF: região de friabilidade, RP: região de plasticidade.

Para o PD5 as equações de regressão $\sigma_p = f(U)$, foram estatisticamente diferentes para as profundidades estudadas (Quadro 13).

Na Figura 15 é apresentado o tratamento PD5 e verifica-se que a σ_p é maior na profundidade de 10-15 cm em toda faixa de umidade analisada, quando em comparação a profundidade de 0-5 cm. A explicação deve-se ao efeito do tráfego acumulado no tratamento, promovendo a formação de uma camada compactada abaixo dos 10 cm de profundidade. Verifica-se na profundidade de 10-20 cm, maiores valores de resistência do solo à penetração, confirmando a presença de compactação (Quadro 7). Os maiores valores de σ_p evidenciam o estado de compactação que o solo se encontra.

Os resultados mostrados nas Figuras 12 a 16, sugerem que nos próximos anos o tráfego de máquinas nestes tratamentos seja realizado, levando-se em consideração a capacidade de suporte de carga da profundidade de 0-5 cm, caso contrário,

certamente a σ_p do solo será superada, resultando na ocorrência de compactação adicional da camada superficial.

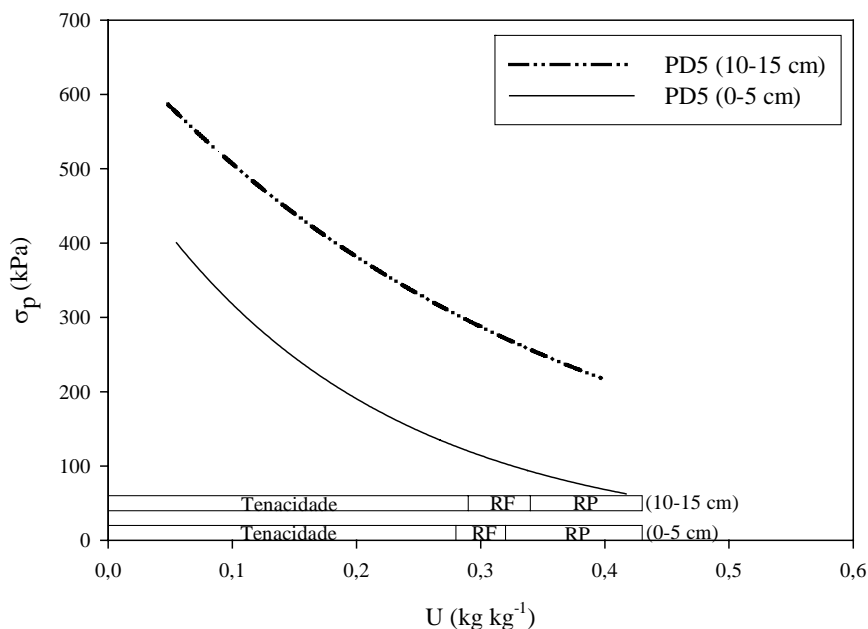


Figura 15. Curva de pressão de preconsolidação em função da umidade em amostras de um Nitossolo Vermelho distroférrico no tratamento PD5, coletadas nas profundidades 0-5 e 10-15 cm. RF: região de friabilidade, RP: região de plasticidade.

Para o PD12 as equações de regressão $\sigma_p = f(U)$, foram estatisticamente diferentes no nível de 5 % de probabilidade para as profundidades estudadas (Quadro 13).

O tratamento PD12 (Figura 16) apresentou maior σ_p em toda faixa de umidade avaliada na profundidade de 10-15 cm. A maior σ_p pode estar associada aos maiores valores de densidade do solo (Quadro 5), menores de matéria orgânica e macroporosidade e maiores de microporosidade (Quadros 4 e 9), quando comparados aos valores encontrados na profundidade de 0-5 cm. Observa-se semelhança de comportamento e uma menor amplitude entre a capacidade de suporte de carga entre as profundidades.

A maior suscetibilidade da profundidade de 0-5 cm, pode estar associada a menores valores de densidade do solo nesta profundidade (Quadro 5) e no aumento da macroporosidade (Quadro 9).

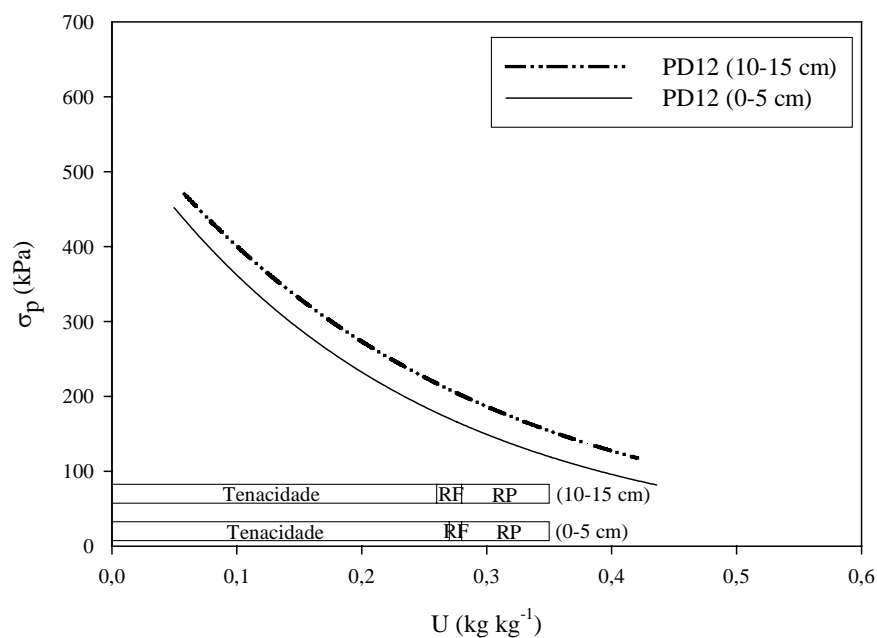


Figura 16. Curva de pressão de preconsolidação em função da umidade em amostras de um Nitossolo Vermelho distroférico no tratamento PD12, coletadas nas profundidades 0-5 e 10-15 cm. RF: região de friabilidade, RP: região de plasticidade.

O Quadro 14 apresenta a comparação das equações de regressões, após linearização, entre os tratamentos para uma mesma profundidade, usando o procedimento de Snedecor & Cochran (1989) para o Nitossolo Vermelho distroférico nos diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto coletados nas profundidades de 0-5 cm e 10-15 cm.

Observa-se que em todos os tratamentos a σ_p para a profundidade de 0-5 cm foi diferente, exceto o PC com o PD4, mostrando uma mesma capacidade de suporte de carga. Na profundidade 10-15 cm, a σ_p para todos os tratamentos foi diferente, exceto as áreas de MN e PD12 e entre PC e PD4, que apresentaram uma mesma capacidade de suporte de carga.

Comprovada a não significância entre as equações (Quadro 14), juntaram-se então os valores de umidade e de σ_p e uma nova equação foi ajustada. Observa-se na Figura 17 que os valores de σ_p e de umidade nos tratamentos PC + PD4 na profundidade de

0-5 cm foram agrupados, resultando em uma nova equação, $\sigma_{p(PC + PD4)} = 10^{(2,66^{**} - 1,00 U^{**})}$ com R^2 de 0,82**. A discussão apresentada a seguir, leva em consideração as novas equações obtidas. Observa-se que as equações para PC + PD4 (0-5 cm) e MN (0-5 e 10-15 cm) + PD12 (10-15 cm) e entre PC + PD4 (10-15 cm) diferiram das outras equações, como pode ser verificado no Quadro 14, depois de recalculados os valores de F.

Quadro 14. Comparação das equações de regressão, após linearização, usando o procedimento de Snedecor & Cochran (1989) para o Nitossolo Vermelho distroférico nos diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto, coletados nas profundidades 0-5 cm e 10-15 cm.

Tratamentos	F
MN (0-5 e 10-15 cm) vs PC (0-5 cm)	**
MN (0-5 e 10-15 cm) vs PD1 (0-5 cm)	*
MN (0-5 e 10-15 cm) vs PD4 (0-5 cm)	**
MN (0-5 e 10-15 cm) vs PD5 (0-5 cm)	**
MN (0-5 e 10-15 cm) vs PD12 (0-5 cm)	**
PC (0-5 cm) vs PD1 (0-5 cm)	**
[PC (0-5 cm) vs PD4 (0-5 cm)]	NS
PC (0-5 cm) vs PD5 (0-5 cm)	**
PC (0-5 cm) vs PD12 (0-5 cm)	**
PD1 (0-5 cm) vs PD4 (0-5 cm)	**
PD1 (0-5 cm) vs PD5 (0-5 cm)	**
PD1 (0-5 cm) vs PD12 (0-5 cm)	**
PD4 (0-5 cm) vs PD5 (0-5 cm)	**
PD4 (0-5 cm) vs PD12 (0-5 cm)	**
PD5 (0-5 cm) vs PD12 (0-5 cm)	**
MN (0-5 e 10-15 cm) vs PC (10-15 cm)	**
MN (0-5 e 10-15 cm) vs PD1 (10-15 cm)	*
MN (0-5 e 10-15 cm) vs PD4 (10-15 cm)	**
MN (0-5 e 10-15 cm) vs PD5 (10-15 cm)	**
[MN (0-5 e 10-15 cm) vs PD12 (10-15 cm)]	NS
PC (10-15 cm) vs PD1 (10-15 cm)	**
[PC (10-15 cm) vs PD4 (10-15 cm)]	NS
PC (10-15 cm) vs PD5 (10-15 cm)	**
PC (10-15 cm) vs PD12 (10-15 cm)	**
PD1 (10-15 cm) vs PD4 (10-15 cm)	**
PD1 (10-15 cm) vs PD5 (10-15 cm)	**
PD1 (10-15 cm) vs PD12 (10-15 cm)	**
PD4 (10-15 cm) vs PD5 (10-15 cm)	*
PD4 (10-15 cm) vs PD12 (10-15 cm)	**
PD5 (10-15 cm) vs PD12 (10-15 cm)	**

(...) continua

(...) continuação

Recalculando o F para os modelos que não diferiram estatisticamente

PC (0-5 cm) + PD4 (0-5 cm) vs MN (0-5 e 10-15 cm) **

PC (0-5 cm) + PD4 (0-5 cm) vs PD1 (0-5 cm) **

PC (0-5 cm) + PD4 (0-5 cm) vs PD5 (0-5 cm) **

PC (0-5 cm) + PD4 (0-5 cm) vs PD12 (0-5 cm) **

MN (0-5 e 10-15 cm) + PD12 (10-15 cm) vs PC (10-15 cm) **

MN (0-5 e 10-15 cm) + PD12 (10-15 cm) vs PD1 (10-15 cm) **

MN (0-5 e 10-15 cm) + PD12 (10-15 cm) vs PD4 (10-15 cm) **

MN (0-5 e 10-15 cm) + PD12 (10-15 cm) vs PD5 (10-15 cm) **

PC (10-15 cm) + PD4 (10-15 cm) vs MN (0-5 e 10-15 cm) **

PC (10-15 cm) + PD4 (10-15 cm) vs PD1 (10-15 cm) **

PC (10-15 cm) + PD4 (10-15 cm) vs PD5 (10-15 cm) **

PC (10-15 cm) + PD4 (10-15 cm) vs PD12 (10-15 cm) **

(**) e (*) significativos no nível de 1 e 5% respectivamente, e (NS) quando não significativo.

Na Figura 17 é mostrado o comportamento dos modelos de compressibilidade obtidos para os tratamentos em estudo na profundidade 0-5 cm.

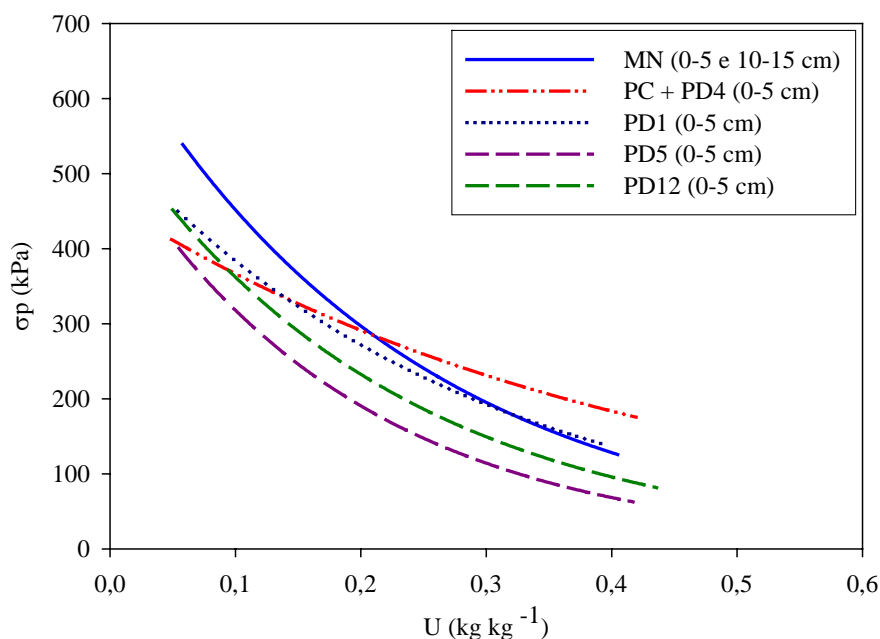


Figura 17. Curva de pressão de preconsolidação em função da umidade em amostras de um Nitossolo Vermelho distroférico nos tratamentos em estudo, coletadas na profundidade de 0-5 cm.

Na profundidade de 0-5 cm o solo sob MN possui maior capacidade de suporte de carga para umidades menores do que $0,21 \text{ kg kg}^{-1}$ do que os outros tratamentos (Figura 17), devido provavelmente aos maiores teores de matéria orgânica nesta camada (Quadro 4) que aumenta a estabilidade de agregados, pelo aumento nas ligações entre as partículas e agregados do solo, evidenciado pela maior percentagem de agregados $> 2 \text{ mm}$ e DMG (Quadro 6), o que resulta na preservação da estrutura do solo, proporcionando maior capacidade de suporte de carga e maior resistência a compactação adicional. Em estudo em área de cerrado, Oliveira (2002), avaliando a estabilidade da estrutura através da compressibilidade, na profundidade de 0-5 cm, constatou que as áreas de cerrado natural e de plantio direto suportaram mais carga do que o sistema de preparo com arado de disco, para baixos teores de água no solo, dados que corroboram com o presente estudo.

Os tratamentos com plantio direto e convencional apresentaram a capacidade de suporte de carga crescente na seguinte ordem: $\text{PD5} < \text{PD12} < \text{PD1} < \text{PD4} + \text{PC}$. Isso indica que o tratamento PD5 é mais suscetível a compactação, enquanto que o tratamento PD4 + PC são os mais resistentes (Figura 17). A maior capacidade de carga do PD4 + PC em relação ao PD12 se justifica através da maior densidade do solo (Quadro 5) e menor macro e maior microporosidade (Quadro 9). O comportamento observado para o PC sugere que os efeitos do revolvimento sobre a densidade do solo foram eliminados pelo tráfego (Tormena et al., 1998).

A menor capacidade de suporte de carga do PD1 em relação ao PC + PD4 para umidades maiores que $0,14 \text{ kg kg}^{-1}$, se justifica pela menor resistência do solo à penetração na profundidade de 0-10 cm (Quadro 7). A maior capacidade de suporte de carga do PD12 em relação ao PD5 se justifica pela maior DMG (Quadro 6).

Observa-se na Figura 18 que os valores de σ_p e de umidade nos tratamentos PC + PD4 e entre MN + PD12 na profundidade de 10-15 cm foram agrupados, resultando em novas equações, $\sigma_{p(\text{PC} + \text{PD4})} = 10^{(2,82^{**} - 1,50 U^{**})}$ com R^2 de $0,86^{**}$ e $\sigma_{p(\text{MN} + \text{PD12})} = 10^{(2,81^{**} - 1,75 U^{**})}$ com R^2 de $0,83^{**}$. A discussão apresentada a seguir, leva em consideração as novas equações obtidas.

Na Figura 18 é mostrado o comportamento dos modelos de compressibilidade obtidos para os tratamentos em estudo na profundidade de 10-15 cm.

Os menores valores de σ_p dos tratamentos MN + PD12 deve-se as melhorias na qualidade estrutural do solo pelo aumento da condutividade hidráulica do solo saturado e infiltração tridimensional (Quadro 11), em razão da continuidade de poros, tornando o solo mais suscetível a deformação.

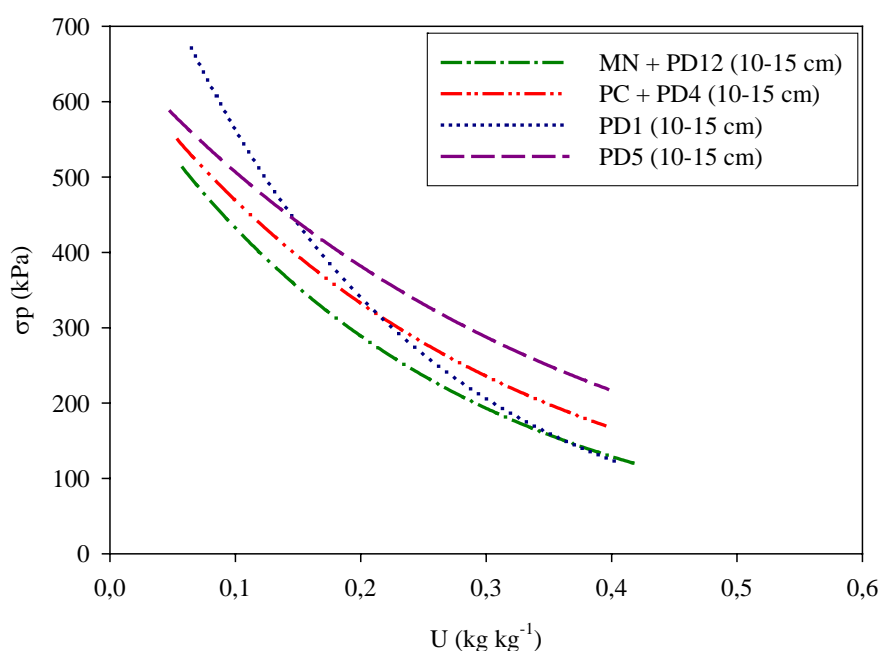


Figura 18. Curva de pressão de preconsolidação em função da umidade em amostras de um Nitossolo Vermelho distroférico nos tratamentos em estudo, coletadas na profundidade de 10-15 cm.

Na profundidade 10-15 cm (Figura 18) a capacidade de suporte de carga aumentou na seguinte ordem : MN + PD12 < PC + PD4 < PD5. Já o tratamento PD1 apresentou um comportamento diferenciado devido possivelmente, a instabilidade do sistema, em virtude das mudanças nos atributos do solo pelo pouco tempo de cultivo no sistema plantio direto, o que pode ser constatado pela elevação do DMG em relação as outras áreas (Quadro 6).

Assim os tratamentos MN + PD12 foram os mais suscetíveis a compactação, enquanto o PD5 foi o mais resistente.

A maior capacidade de suporte de carga no PD5 é explicada pelo efeito do tráfego acumulado no tratamento, promovendo a formação de uma camada compactada abaixo dos 10 cm de profundidade. Verifica-se valores de resistência do solo à penetração elevados na profundidade de 10-20 cm, confirmando a presença de compactação (Quadro 7).

Nota-se que nos primeiros anos sob plantio direto, um efeito acumulativo do tráfego, até o tratamento PD5. Já no PD12, nota-se o efeito da melhoria da qualidade estrutural do solo, anulando o efeito do tráfego, o que pode ser constatado pela menor capacidade de suporte de carga.

No Quadro 15 estão apresentados os parâmetros das equações de regressões obtidas a partir da relação entre o índice de compressão e a umidade para todos os tratamentos em estudo. Os coeficientes de determinação (R^2) variaram entre 0,35 e 0,75, sendo todos significativos no nível de 1%, exceto o PC na profundidade de 0-5 cm que foi significativo a 5%.

Quadro 15. Parâmetros das equações de regressões obtidos a partir da relação entre o índice de compressão (m) e a umidade (U) para o Nitossolo Vermelho distroférrico nos diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto, coletados nas profundidades 0-5 e 10-15 cm, conforme o modelo quadrático ($m = a + bU + cU^2$).

Tratamento	Parâmetros de ajuste das equações				Parâmetros de ajuste das equações			
	a	b	c	R^2	a	b	c	R^2
	-----0 a 5 cm-----				-----10 a 15 cm-----			
MN	-2,791	1,600	0,143	0,75 **	-4,679	2,465	0,038	0,66 **
PC	-6,442	2,868	0,072	0,44 *	-7,363	3,602	-0,056	0,54 **
PD1	-6,062	2,539	0,187	0,35 **	-5,461	2,821	-0,030	0,43 **
PD4	-6,362	3,213	0,046	0,58 **	-3,673	2,075	0,017	0,70 **
PD5	-4,980	2,305	0,143	0,52 **	-5,754	2,946	-0,042	0,58 **
PD12	-5,894	3,043	0,108	0,67 **	-4,611	2,493	0,028	0,67 **

MN: Mata Nativa; PC: Plantio Convencional; PD1: Plantio Direto com 1 ano; PD4: Plantio Direto com 4 anos; PD5: Plantio Direto com 5 anos; PD12: Plantio Direto com 12 anos.

(**) e (*) significativos no nível de 1 a 5% respectivamente.

A Figura 19 apresenta o índice de compressão plotado versus a umidade gravimétrica, para os tratamentos deste estudo e por meio desta figura, obteve-se a função $m = f(U)$ (Quadro 15), onde m representa o índice de compressão do solo.

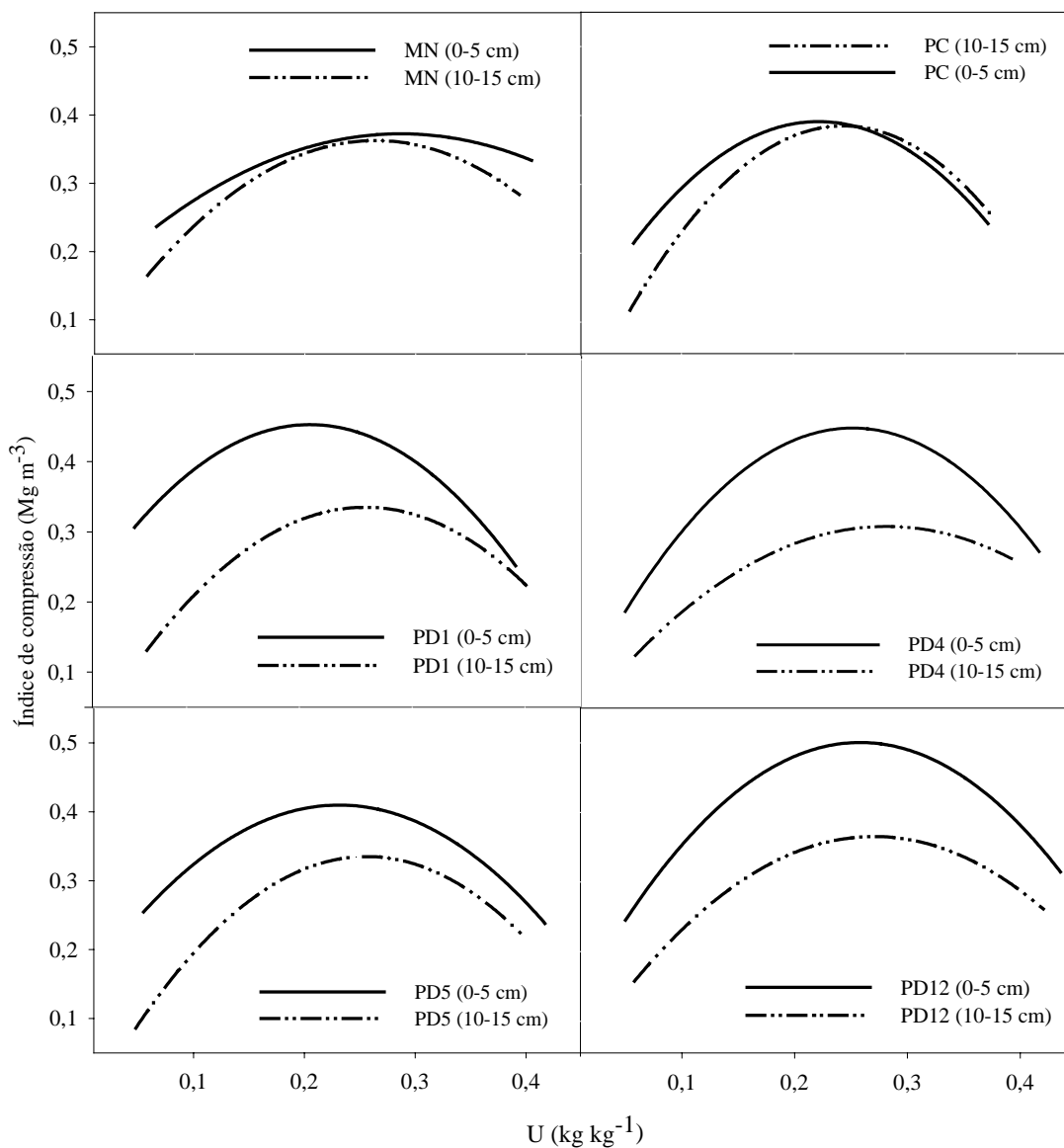


Figura 19. Relação entre a umidade gravimétrica (U) e o índice de compressão (m) para o Nitossolo Vermelho distroférico para os diferentes sistemas de manejo, profundidades e tempo de adoção no sistema plantio direto.

Analisando a Figura 19, observa-se que o índice de compressão do solo aumenta com o aumento da umidade até atingir um valor máximo e em seguida decresce. Comportamentos semelhantes foram observados por Reinert (1990), Dias Junior (1994) e Kondo & Dias Junior (1999b). A explicação para a variação do índice de compressão com a umidade, segundo Holtz & Kovacs (1981) é que o solo em condição de baixa umidade, suporta mais facilmente a pressão e, com o aumento da umidade, aumentam as deformações até atingir um máximo e, a partir daí ocorre o decréscimo, em razão da dissipação de parte da pressão aplicada pela água, reduzindo a pressão sobre o solo e conseqüentemente, sua deformação. Para baixa umidade, a deformação do solo é limitada pelo fato de o movimento de suas partículas ser dificultado pela falta de água (Silva et al., 2000c).

O Quadro 16 apresenta os limites de plasticidade, contração e valores de pressões de preconsolidação estimados pelos modelos $\sigma_p = 10^{(a + bU)}$ nos limites de plasticidade e contração, assim como, as umidades máximas e índices de compressão máximos estimados pelas equações $m = a + bU + cU^2$, desenvolvidas para o Nitossolo Vermelho distroférico para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.

A profundidade de 0-5 cm em todos os tratamentos estudados, apresentou maiores valores de índice de compressão máximo ($m_{m\acute{a}x}$). Desta forma, evidencia-se a maior suscetibilidade da camada superficial à compactação (Figura 19 e Quadro 16).

A profundidade de 10-15 cm apresentou menores índices de compressão, indicando maior resistência à deformação. Fato se explica, pela maior densidade do solo (Quadro 5) e, maiores resistências do solo à penetração na profundidade de 10-20 cm e menores valores de macroporosidade (Quadro 9).

A capacidade de suporte de carga, considerando a faixa de friabilidade do solo (LP-LC), que pode ser aplicada aos solos, considerando os tratamentos agricultáveis na profundidade de 0-5 cm, variaram de 101,5 a 124,6 kPa no PD5 (condição com menor capacidade de suporte de carga) até 216,6 a 273,4 kPa no PC (condição com maior suporte de carga) (Quadro 16).

Na profundidade de 10-15 cm o σ_p variou de 159,8 a 307,8 kPa no PD1 (condição com menor capacidade de suporte de carga), até 258,1 a 297,4 kPa no PD5 (condição com maior suporte de carga).

Quadro 16. Limites de plasticidade (LP) e de contração (LC), pressões de preconsolidação estimadas pelos modelos $\sigma_p = 10^{(a + bU)}$ nos limites de plasticidade ($\sigma_{P(LP)}$) e contração ($\sigma_{P(LC)}$), umidades máximas ($U_{m\acute{a}x}$) e índices de compressão máximos ($m_{m\acute{a}x}$) estimados pelas equações $m = a + bU + cU^2$, desenvolvidas para o Nitossolo Vermelho distroférico para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.

Tratamento	Profundidade	LP	LC	$\sigma_{P(LP)}^{(1)}$	$\sigma_{P(LC)}^{(1)}$	$U_{m\acute{a}x}^{(2)}$	$m_{m\acute{a}x}^{(2)}$
MN	0-5	0,46	0,26	89,4	215,5	0,29**	0,37**
	10-15	0,35	0,28	167,5	222,4	0,26**	0,36**
PC	0-5	0,32	0,21	216,6	273,4	0,22*	0,39*
	10-15	0,34	0,20	198,0	322,1	0,24**	0,38**
PD1	0-5	0,33	0,22	171,8	251,2	0,21**	0,45**
	10-15	0,35	0,22	159,8	307,8	0,26**	0,33**
PD4	0-5	0,33	0,25	215,6	263,0	0,25**	0,45**
	10-15	0,35	0,28	204,9	261,3	0,28**	0,31**
PD5	0-5	0,32	0,28	101,5	124,6	0,23**	0,41**
	10-15	0,34	0,29	258,1	297,4	0,26**	0,34**
PD12	0-5	0,28	0,27	162,0	169,4	0,26**	0,50**
	10-15	0,28	0,26	201,9	218,0	0,27**	0,37**

MN: Mata Nativa; PC: Plantio Convencional; PD1: Plantio Direto com 1 ano; PD4: Plantio Direto com 4 anos; PD5: Plantio Direto com 5 anos; PD12: Plantio Direto com 12 anos.

⁽¹⁾ Estimado pelas equações desenvolvidas nos tratamentos e profundidades em estudo (Quadro 12).

⁽²⁾ Estimado pelas equações desenvolvidas nos tratamentos e profundidades em estudo (Quadro 15).

(**) e (*) significativos no nível de 1 a 5% respectivamente.

A importância da indicação do limite superior de umidade na zona de friabilidade, indica acima do qual o solo não deve ser trabalhado sem sofrer compactação

(Hillel, 1982), ou seja o início da faixa de plasticidade. Porém, neste conceito, não estão estabelecidos os níveis de pressões suportados pelo solo nesta faixa de umidade, o que pode estar ocasionando compactação adicional pela aplicação de pressões além da capacidade de suporte de carga. Desta forma, no caso de operações com máquinas agrícolas, será possível utilizar-se de tratores e outros equipamentos que proporcionam uma tensão no solo em torno de 101,5 kPa, sem causar compactação adicional em todos os tratamentos do presente estudo.

Machado & Trein (2000) constataram que se o tráfego de máquinas agrícolas for realizado dentro da faixa de friabilidade, em um Planossolo e em um Latossolo Vermelho Escuro, podendo ser utilizados tratores que proporcionem uma tensão, no solo, em torno de 85 kPa, sem trazer prejuízos ao solo em termos de compactação dos mesmos. Castro Neto (2001), em estudo em um Latossolo Roxo, encontrou uma pressão de contato pneu-solo da ordem de 116,9 kPa, utilizando-se de um trator com implemento montado (arado de discos) e constatou que o tempo de espera para realização de tráfego de forma a não aumentar a compactação está na faixa de 4 a 6 dias após uma chuva. Nota-se coerência e proximidade com os dados obtidos no presente estudo e os dados de literatura.

Analisando todos os tratamentos estudados, observa-se que os valores do limite de plasticidade (limite superior da faixa de friabilidade) foram maiores do que a umidade máxima ($U_{m\acute{a}x}$) na qual ocorreu o $m_{m\acute{a}x}$ (Quadro 16). É importante ressaltar que, sem levar em consideração a capacidade de suporte de carga dos solos, poderá estar ocorrendo compactação adicional, mesmo dentro da faixa de umidade indicada para as operações de preparo, ou seja, na zona de friabilidade do solo.

A profundidade de 10-15 cm nas áreas agricultáveis apresentou maiores $U_{m\acute{a}x}$ e menores $m_{m\acute{a}x}$ do que a profundidade de 0-5 cm. As áreas de PD12 e PD4, apresentaram na superfície as maiores $U_{m\acute{a}x}$, com valores de 0,26 e 0,25 $kg\ kg^{-1}$ respectivamente, entretanto, o tratamento PD12 apresenta maior $m_{m\acute{a}x}$, sendo portanto, mais suscetível a compactação (Figura 18, 19 e Quadro 16). A explicação se deve ao maior espaço poroso, representado pela menor densidade do solo (Quadro 5) e pela maior macroporosidade (Quadro 9) e conseqüentemente, ao menor número de pontos de contato entre as partículas sólidas, que resulta em menor atrito ao deslocamento e rearranjo das partículas do solo.

Analisando o Quadro 5 e o Quadro 16, observa-se que o índice de compressão máximo foi inversamente proporcional à densidade inicial do solo, principalmente nas áreas agricultáveis, resultados também observados por Silva (1999).

6.12 Sugestões para trabalhos futuros

Para futuros trabalhos relacionados ao conteúdo desta pesquisa, pode-se sugerir:

Realização de um maior controle de tráfego em áreas experimentais, delimitando áreas específicas para o tráfego, com o objetivo de melhor caracterizar a influência das máquinas no processo de compactação do solo.

Realização dos ensaios de compressibilidade para a profundidade que apresente maior estado de compactação. Para esta avaliação prévia sugere-se utilizar o penetrômetro hidráulico eletrônico com DGPS (Sistema de posicionamento global diferencial) para posterior localização dos pontos amostrados.

Com os resultados da capacidade de suporte de carga através do ensaio de compressibilidade, associado aos outros atributos do solo, confeccionar mapas de trafegabilidade das áreas através da geoestatística.

Realização da avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes teores de água e correlação com os resultados dos modelos de compressibilidade do solo.

Redefinir o referencial em termos de talhões de maior produtividade (visto que em determinados usos a compactação é benéfica).

7 CONCLUSÕES

O tempo de adoção no sistema plantio direto promoveu melhorias na condição química dos solos avaliados na profundidade de 0-5 cm.

Constatou-se que o tempo de adoção no sistema plantio direto promoveu modificações na densidade do solo máxima e na umidade ótima de compactação.

O tempo de adoção no sistema plantio direto proporcionou diminuição na densidade do solo e no grau de compactação na profundidade de 0-5 cm e não causou alterações na densidade do solo na profundidade de 10-15 cm.

O diâmetro médio geométrico (DMG) e a percentagem de agregados maiores do que 2 mm foram crescentes com o tempo de adoção no sistema plantio direto na profundidade de 0-5 cm e a mata nativa (MN) apresentou maior DMG em ambas as profundidades.

A resistência do solo à penetração não apresentou tendência predominante de variação com o tempo de adoção no sistema plantio direto e também em relação ao tipo de preparo.

O tempo de adoção no sistema plantio direto não promoveu diferenciação na porosidade total. O PD12 (plantio direto com 12 anos) na profundidade de 0-5 cm apresentou maior macroporosidade e menor microporosidade.

Os tratamentos PD1 (plantio direto com 1 ano) e PD4 (plantio direto com 4 anos) se destacaram entre os tratamentos sob plantio direto pela maior retenção de água no solo.

Os tratamentos PD12 e MN apresentaram maiores velocidades de infiltração tridimensional de água no solo e condutividade hidráulica do solo saturado.

O tempo de adoção no sistema plantio direto alterou o comportamento compressivo dos solos em ambas as profundidades (0-5 e 10-15 cm), por meio das mudanças no índice de compressão e na pressão de preconsolidação.

A profundidade de 0-5 cm apresentou menor capacidade de suporte de carga, do que a profundidade 10-15 cm.

A profundidade de 0-5 cm, em todos os tratamentos, mostrou ser mais suscetível à compactação em relação à profundidade de 10-15 cm.

Os tratamentos com plantio direto e convencional apresentaram a capacidade de suporte de carga crescente na seguinte ordem: $PD5 < PD12 < PD1 < PD4 + PC$, para a profundidade 0-5 cm e para a profundidade 10-15 cm: $MN + PD12 < PC + PD4 < PD5$. Já o tratamento PD1 apresentou um comportamento diferenciado.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRÃO, P.U.R., GOEPFERT, C.F., GUERRA, M., ELTZ, F.L.F., CASSOL, E.A. Efeitos de sistemas de preparo do solo sobre características de um Latossolo Roxo distrófico. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.3, p.169-72, 1979.

AL-ADAWI, S.S., REEDER, R.C. Compaction and subsoiling effects on corn and soybean yields and soil physical properties. *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng)*, v.39, n.5, p.1641-49, 1996.

ALBUQUERQUE, J.A., REINERT, D.J., FIORIN, J.E. Variação temporal da estabilidade estrutural em Podzólico Vermelho-Escuro. *Ciênc. Rur.*, v.24, p.275-80, 1994.

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. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.19, p.115-9, 1995.

ALVARENGA, R.C., COSTA, L.M., FILHO, W.M., REGAZZI, A.J. Crescimento de raízes de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.20, p.319-26, 1996.

- 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 do milho. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.10, p.273-7, 1986.
- ALVES, R.N., ANDRADE, A.G. de, SILVA, C.A., MACHADO, P., GUIMARÃES, C.M. Estabilidade de agregados de Latossolo Vermelho epiutrófico de cerrado sob sistema de plantio direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 13, 2000, Ilhéus. *Resumos...* Ilhéus: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. (Editado em CD-ROM).
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Soil cone penetrometer. In: *ASAE Standards 1999: standards engineering practices data*. 46. ed. St. Joseph, 1999. p.834-835 (ASAE S313.1)
- ANGERS, D.A. Changes in soil aggregation and organic carbon under corn and alfafa. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.56, p.1244-9, 1992.
- ANJOS, J.T., UBERTI, A.A.A., VIZZOTTO, V.J., LEITE, G.B., KRIEGER, M. Propriedades físicas em solos sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.18, p.139-45, 1994.
- ARZENO, J.L. *Avaliação física de diferentes manejos de solo em Latossolo Roxo distrófico*. Piracicaba, 1990. 259p. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- BAYER, C., MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A., CAMARGO, F.A.O. (Eds) *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. Porto Alegre: Genesis, 1999. p.9-26.
- BELTRAME, L.F.S., TAYLOR, J.C. Causas e efeitos da compactação do solo. *Lav. Arrozeira*, v.33, n.318, p.59-62, 1980.

- BENGOUGH, A.G., MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *J. Soil Sci.*, v.41, p.341-58, 1990.
- BERTONI, J., LOMBARDI NETO, F. *Conservação do solo*. São Paulo: Ícone, 1990. 355p.
- BEUTLER, A.N. *Produtividade de culturas e atributos físicos de Latossolo Vermelho-Escuro fase cerrado sob diferentes sistemas de manejo*. Lavras, 1999. 69p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras.
- BEUTLER, A.N., SILVA, M.L.N., CURI, N., FERREIRA, M.M., CRUZ, J.C. PEREIRA FILHO, I.A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob diferentes sistemas de manejo na região dos cerrados. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.25, p.167-77, 2001a.
- 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 relacionada com o manejo na região dos cerrados no estado de Minas Gerais. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.25, p.129-36, 2001b.
- BICUDO, S.J., SANTOS, J.R. Arranjos de preparo de solo: características físicas e cobertura vegetal do solo na produtividade da cultura do milho (*Zea mays* L). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 28, 1999, Pelotas. *Trabalhos publicados...* Pelotas: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1999. (Editado em CD-ROM).
- BLAKE, G.R. Particle density. In: BLACK, C.A. *Methods of soil analysis, physical and mineralogical properties including statistics of measurement and sampling*. Part 1. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p.371-3. (Agronomy, 9).
- BOONE, F.R. Weather and other environmental factors influencing crop responses to tillage and traffic. *Soil Tillage Res.*, v.11, p.283-24, 1988.

- BORGES, G. de O. Resumo histórico do plantio direto no Brasil. In: EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Trigo. *Plantio direto no Brasil*. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1993. Cap.1, p.13-7.
- BOUYOUCOS, G.J. The hydrometer method for studying soils. *Soil Sci.*, v.25, p.265-371, 1927.
- BRADFORD, J.M. Penetrability. In: KLUTE, A. (Ed.) *Methods of soil analysis, physical, chemical and mineralogical methods*. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p.463-78.
- BRADFORD, J.M., GUPTA, S.C. Compressibility. In: KLUTE A. (Ed.) *Methods of soil analysis*. 2nd. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p.279-92 (Agronomy monograph, 9).
- BRAGAGNOLO, N., MIELNICZUK, J. Cobertura do solo por resíduos de oito sequências de culturas e seu relacionamento com a temperatura e umidade do solo, germinação e crescimento inicial do milho. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.14, p.91-8, 1990.
- CADIMA, Z.A., LIBARDI, P.L., REICHARDT, K. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica em um Latossolo Vermelho-Amarelo textura média, no campo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.4, p.63-6, 1980.
- CALEGARI, A. Plantas de cobertura/adubos verdes para formação de cobertura no sistema de plantio direto. In: GRUPO PLANTIO DIRETO. (Coord.) *Guia para plantio direto*. Ponta Grossa: Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha, 2000. p.30-7.
- CAMARGO, O.A. de., ALLEONI, L.R.F. *Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas*. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/Universidade de São Paulo, 1997. 132p.

- CAMPOS, B.C. de., REINERT, D.J., NICOLODI, R., RUEDELL, J., PETRERE, C.
Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.19, p.121-6, 1995.
- CAMPOS, B.C., REINERT, D.J., NICOLODI, R., CASSOL, L.C. Dinâmica da agregação induzida pelo uso de plantas de inverno para cobertura do solo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.23, p.383-91, 1999.
- CANARACHE, A. PENETR - a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. *Soil & Tillage Res.*, v.16, p.51-70, 1990.
- CARPENEDO, V. *Compressibilidade de solos em sistemas de manejo*. Porto Alegre, 1994. 106p. Tese (Doutorado em Agronomia/Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- CARPENEDO, V., MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.14, p.99-105, 1990.
- CARVALHO JÚNIOR, I.A., FONTES, L.E.F., COSTA, L.M. Modificações causadas pelo uso e formação de camadas compactadas, e, ou, adensadas em um Latossolo Vermelho-Escuro textura média, na região do Cerrado. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.22, p.505-14, 1998.
- CARVALHO, E.J.M., FIGUEIREDO, M. de S., COSTA, L.M. da. Comportamento físico-hídrico de um Podzólico Vermelho-Amarelo Câmbico fase terraço sob diferentes sistemas de manejo. *Pesqui. Agropecu. Bras.*, v.34, p.257-65, 1999.
- CARVALHO, W.A., ESPÍNDOLA, C.R., PACCOLA, A.A. Levantamento de solos da Fazenda Lageado - Estação Experimental "Presidente Médici". *Bol. Cient. Fac. Ciênc. Agron. UNESP (Botucatu)*, n.1, p. 1-95, 1983.

- CASAGRANDE, A. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1936, Cambridge. *Proceedings...* Cambridge: ICSMFE, 1936. v.3, p.60-4.
- CASTRO FILHO, C., MUZILLI, O., PODANOSCHI, A.L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.22, p.527-38, 1998.
- 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 (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.
- CASTRO NETO, P., NAGAOKA, A.K., LANÇAS, K.P. Agricultura de precisão: sistema de processamento de dados para elaboração de mapas de isocompactação. SIMPÓSIO EM ENERGIA NA AGRICULTURA, 1, 1999, Botucatu. *Anais...* Botucatu: Universidade Estadual Paulista, 1999. p.449-53.
- CASTRO, O.M. de. *Comportamento físico e químico de um Latossolo Roxo em função do seu preparo na cultura do milho (Zea mays L.)*. Piracicaba, 1995. 174p. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- CASTRO, O.M., VIEIRA, S.R., MARIA, I.C. Sistemas de preparo do solo e disponibilidade de água. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE ÁGUA NA AGRICULTURA, 1987, Campinas. *Anais...* Campinas: Fundação Cargill, 1987. p.27-51.

- CENTURION, J.F., MORAES, M.H., DELLA LIBERA, C.L.F. Comparação de métodos para determinação da curva de retenção de água em solos. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.21, p.173-9, 1997.
- CHAN, K.Y., HEENAN, D.P. Surface hydraulic properties of a red earth under continuous cropping with different management practices. *Aust. J. Soil Res.*, v.31, p.13-24, 1993.
- COLETI, J.T., DEMATTÊ, J.L.I. Compactação artificial em solos: experiências e dados informativos. *Álcool & Açúcar*, v.2, p.34-9, 1982.
- CORRÊA, J.C. Características físicas de um Latossolo Amarelo muito argiloso (Typic Acrorthox) do Estado do Amazonas, sob diferentes métodos de preparo do solo. *Pesqui. Agropecu. Bras.*, v.20, p.1381-7, 1985.
- CORRÊA, J.C. Efeito de sistemas de cultivo na estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho-Amarelo em Querência, MT. *Pesqui. Agropecu. Bras.*, v.37, n.2, p.203-9, 2002.
- CORRÊA, L.A., CRUZ, J.C. Plantio direto. *Inf. Agropecu.*, v.13, n.147, p.46-52, 1987.
- COSTA, F.S., ALBUQUERQUE, J.A., BAYER, C., VIEIRA, S.M., WOBETO, C. Sistemas de manejo do solo e propriedades físicas de um Latossolo Bruno: efeito de 20 anos. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 3, 2000, Pelotas. *Resumos...* Pelotas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, 2000, p.259-267, (Editado em CD-ROM).
- COSTA, J.B. *Caracterização e constituição do solo*. 29.ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1979. 527p.

CUNHA, A.R., KLOSOWSKI, E.S., GALVANI, E., J.F., ESCOBEDO, MARTINS, D.

Classificação climática para o município de Botucatu, SP, segundo Köppen. In: SIMPÓSIO EM ENERGIA NA AGRICULTURA, 1, 1999, Botucatu. *Anais...* Botucatu: Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, 1999. p.487-91.

CUNHA, T.J.F., MACEDO, J.R., RIBEIRO, L.P., PALMIERI, F., FREITAS, P.L. de.,

AGUIAR, A. de C. Impacto do manejo convencional sobre propriedades físicas e substâncias húmicas de solos sob cerrado. *Ciê. Rur.*, v.31, p.27-36, 2001.

DA ROS, C.O., LOPES, C.E.L., SECCO, D., PASA, L. Influência do tempo de adoção no

sistema de plantio direto nas características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 1, 1996, Lages. *Resumos...* Pelotas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, 1996. p.153-5.

DA ROS, C.O., SECCO, D., FIORIN, J.E., PETRERE, C., CADORE, M.A., PASA, L.

Manejo do solo a partir de campo nativo: efeito sobre a forma de estabilidade da estrutura ao final de cinco anos. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.21, p.241-7, 1997.

DANIEL, L.A., RAUNOUD, C.L., DUTOIT, C.L. Tráfego controlado em parcelas

motomecanizadas com os sistemas convencional e plantio direto: avaliação preliminar da resistência do solo à penetração. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22, 1993, Ilhéus. *Anais...* Ilhéus: Fundação Banco do Brasil, 1993. p.2090-101.

DANIELSON, R.E., SUTHERLAND, P.L. Porosity. In: KLUTE, A. (Ed.) *Methods of soil*

analysis. Madison: American Society Agronomy, 1986. v.1, p.545-66.

DERPSCH, R., SIDIRAS, N., ROTH, C.H. Results of studies made from 1977 to 1984 to

control erosion by cover crops and tillage techniques in Paraná, Brazil. *Soil & Tillage Res.*, v.8, p.253-63, 1986.

- DERPSCH, R. Histórico, requisitos, importância e outras considerações sobre plantio direto no Brasil. In: *PLANTIO DIRETO NO BRASIL*. Campinas: Fundação Cargill, 1984. p.1-7.
- DERPSCH, R. Expansão mundial do plantio direto. *Rev. Plantio Direto*, Passo Fundo, n.59, p.32-40, 2000.
- DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. *Soil & Tillage Res.*, v.11, p.199-238, 1988.
- DIAS JUNIOR, M. de S. *Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic*. Michigan, 1994. 114. Tese (Doctor of Philosophy - Department of Crop and Soil Sciences) - Michigan State University, East Lansing.
- DIAS JUNIOR, M. de S. *Notas de aulas de física do solo*. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 1996. 168p. (Curso de pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas)
- DIAS JUNIOR, M. de S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F. de., ALVAREZ V., V.H., SCHAEFER, C.E.G.R. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.55-94.
- DIAS JUNIOR, M. de S., ESTANISLAU, W.T. Grau de compactação e retenção de água de Latossolos submetidos a diferentes sistemas de manejo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.23, p.45-51, 1999.
- DIAS JUNIOR, M. de S., FERREIRA, M.M., FONSECA, S. da., SILVA, A.R., FERREIRA, D.F. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural dos solos em sistemas florestais na região de Aracruz-ES. *Rev. Árvore*, v.23, p.371-80, 1999.
- DIAS JUNIOR, M. de S., MIRANDA, E.E.V. de. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de Lavras (MG). *Ciênc. e Agrotec.*, v.24, p.337-46, 2000.

- DIAS JUNIOR, M. de S., PIERCE, F.J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. *Soil Technol.*, v.8, p.139-51, 1995.
- DIAS JUNIOR, M. de S., PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.20, p.1-8, 1996.
- DICK, W.A., MCCOX, E.L., EDWARDS, W.M., LAL, R. Continuous application of no-tillage to Ohio soils. *Agron. J.*, v.38, p.65-73, 1991.
- EKWUE, E.J., STONE, R.J. Organic matter effects on the strength properties of compacted agricultural soils. *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng)*, v.38, p.357-65, 1995.
- EKWUE, E.J., STONE, R.J. Density-moisture relations of some Trinidadian soils incorporated with sewage sludge. *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng)*, v.40, p.317-23, 1997.
- ELTZ, F.L.F., PEIXOTO, R.T.G., JASTER, F. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Bruno álico. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.13, p.259-67, 1989.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análise de solo*. 2 ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- FARIAS, G.S., CASSOL, E.A., MIELNICZUK, J. Efeito de sistemas de cultivo sobre a porosidade e retenção de água em um solo Laterítico Bruno-Avermelhado distrófico (Paleudult). *Pesqui. Agropecu. Bras.*, v.20, p.1389-93, 1985.

FERNANDES, B., GALLOWAY, H.M. Efeito das rodas do trator em propriedades físicas de dois solos. *Rev. Ceres*, v.34, p.562-8, 1987.

FERNANDES, J.M.C. As doenças das plantas e o sistema plantio direto. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DO SISTEMA PLANTIO DIRETO, 2, 1997, Passo Fundo. *Anais...* Passo Fundo: EMBRAPA, 1997. p.43-80.

FERREIRA, M.M., DIAS JUNIOR, M.S. *Física do solo*. Lavras: Universidade Federal de Lavras/Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão, 1999. 63p.

FIGUEIREDO, L.H.A. *Propriedades físicas e mecânicas de um Latossolo Roxo submetido a diferentes sistemas de manejo*. Lavras, 1998. 68p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras.

FIGUEIREDO, L.H.A., DIAS JUNIOR, M.S., FERREIRA, M.M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.24, p.487-93, 2000.

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

FORSYTHE, W.M. *Física de suelos: manual de laboratório*. San José: Instituto Interamericano de Ciências Agrícolas, 1975. 212p.

GALHEGO, H.R., ESPÍNDOLA, C.R. Estudo mineralógico de solos da região Botucatu – São Manuel, SP. I – A fração argila de perfis de Latossolo Vermelho Escuro–fase arenosa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 15, 1976, Campinas. *Anais...* Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1976. p.439-44.

- GERARD, C.J., MEHTA, H.C., HINOJOSA, F. Root growth in a clay soil. *Soil Sci.*, v.114, p.37-49, 1972.
- GROHMANN, F., ARRUDA, H. V. de. Influência do preparo do solo sobre a estrutura da Terra Roxa-legítima. *Bragantia*, v.20, p.1203-9, 1961.
- GUERRA, S.P.S., LANÇAS, K.P., MAZETTO, F.R. Utilização do GPS e do penetrômetro hidráulico eletrônico para localização de pontos e avaliação da compactação do solo. In: REUNIÃO CIENTÍFICA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS DO LAGEADO, 7, 2000, Botucatu. *Resumos...* Botucatu: Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, 2000. p.85.
- GUIMARÃES, E.C. *Variabilidade espacial de atributos de um Latossolo Vermelho Escuro textura argilosa da região do cerrado, submetido ao plantio direto e ao plantio convencional*. Campinas, 2000. 89p Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola/Água e Solo) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.
- HÅKANSSON, I., MEDVEDEV, V.W. Protection of soils from mechanical overloading by establishing limits for stresses caused by heavy vehicles. *Soil & Tillage Res.*, v.35, p.85-97, 1995.
- HÅKANSSON, I., REEDER, R.C. Subsoil compaction by vehicles with high axle load-extent, persistence and crop response. *Soil & Tillage Res.*, v.29, p.277-304, 1994.
- HÅKANSSON, I., VOORHEES, W.B. Chapter on soil compaction. In: LAL, R. et al. *Methods for assessment of soil degradation*. (s.n.), 1996.
- HARRIS, R.F., CHESTERS, G., ALLEN, O.N. Dynamics of soil aggregation. *Adv. Agron.*, v.18, p.107-69, 1966.

- HENDERSON, C.W.L. Using a penetrometer to predict the effects of soil compaction on the growth and yield of wheat on uniform sandy soils. *Aust. J. Agric. Res.*, v.40, p.497-508, 1989.
- HENKLAIN, J.C. Influência do tempo no manejo do sistema de semeadura direta e suas implicações nas propriedades físicas do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26, 1997, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. (Editado em CD-ROM).
- HENKLAIN, J.C., VIEIRA, M.J., OLIVEIRA, E.L. de. Resistência do solo pelo efeito dos métodos de preparo. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13, 1996, Águas de Lindóia. *Anais...* Piracicaba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Sociedade LatinoAmericana de Ciência do Solo, 1996. (Editado em CD-ROM).
- HERNANI, L.C. et al. Adubos verdes de outono/inverno no Mato Grosso do Sul. *Doc. Cent. Pesqui. Agropecu. Oeste*. EMBRAPA, n.4, p.1-93, 1995.
- HILLEL, D. *Introduction to soil physics*. San Diego: Academic Press, 1982. 365p.
- HILL, R.L., HORTON, R., CRUSE, R.M. Tillage effects on soil water retention and pore size distribution of two Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.49, p.1264-70, 1985.
- HOLTZ, R.D., KOVACS, W.D. *An introduction to geotechnical engineering*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1981. 733p.
- HORN, R., DOMIZAL, H., SLOWINSKA-JURKIEWIEZ, A., van OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and environment. *Soil & Tillage Res.*, v.35, p.23-36, 1988.

- HOUSSEINI, E., GALLICHAND, J., CARON, J. Comparison of several interpolators for smoothing hydraulic conductivity data in south west Iran. *Am. Soc. Agric. Eng.*, v.36, p.1687-93, 1993.
- ITABORAHY, C.R., CARVALHO, D.F. de., MATOS, A.T. de, RUIZ, H.A. Densidade máxima de proctor em amostras de solos arenoso e argiloso com adição de vermiculita expandida. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26, 1997, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. (Editado em CD-ROM).
- JABRO, J.D. Estimation of saturated hydraulic conductivity of soils from particle size distribution and bulk density data. *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.)*. v.35, p.557-60, 1992.
- JORGE, J.A. *Compactação do solo: causas, conseqüências e maneiras de evitar sua ocorrência*. Campinas: Instituto Agrônômico, 1983. 22p. (Circular, 117).
- JOSÉ, M.R. *Atributos físicos de Latossolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes sistemas de manejo na região de Lavras-MG*. Lavras, 2000. 58p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras.
- KEMPER, W.D., CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A. *Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties including statistics of measurement and sampling*. Madison: American Society of Agronomy, 1965. v.1, p.499-510.
- KIEHL, E.J. *Manual de edafologia: relações solo: planta*. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262p.
- KLEIN, V.A., BOLLER, W. Avaliação de diferentes manejos de solo e métodos de semeadura em áreas sob sistema de plantio direto. *Ciênc. Rural*, v.25, p.395-8, 1995.

- KLEIN, V.A., LIBARDI, P.L., SILVA, A.P. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. *Eng. Agríc.*, v.18, p.45-54, 1998.
- KONDO, M.K. *Compressibilidade de três Latossolos sob diferentes usos*. Lavras, 1998. 121p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras.
- KONDO, M.K., DIAS JUNIOR, M.S. Compressibilidade de três latossolos em função da umidade e uso. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.23, p.211-8, 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. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.23, p.773-82, 1999b.
- LANÇAS, K.P. A compactação do solo agrícola. Botucatu: Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, 1996. 23p.
- LANÇAS, K.P., SANTOS, C.A. Penetrômetro hidráulico-eletrônico equipado com DGPS para avaliação da compactação do solo. In: BALBUENA, R.H., BENEZ, S.H., JORAJURIA, D. *Ingeniería rural y mecanización agraria en el ámbito latinoamericano*. La Plata, 1998. p.570-6.
- LANÇAS, K.P., UPADHYAYA, S.K. *Pneus radiais para tratores: guia para seleção correta da pressão de inflação*. Botucatu, Energia na agricultura, 1997. 33p. (Boletim técnico nº 1).
- LANDERS, J.N. Evolução do plantio direto no cerrado. In: LANDERS, J.N. *Fascículo de experiências de plantio direto no cerrado*. Goiânia: Associação de Plantio Direto no Cerrado, 1994. Cap.1, p.3-5.
- LEITE, J.A., MEDINA, B.F. Efeito de sistemas de manejo sobre as propriedades físicas de um Latossolo Amarelo do Amazonas. *Pesqui. Agropecu. Bras.*, v.19, p.1417-22, 1984.

- LEVIEN, R. *Condições de cobertura e métodos de preparo do solo para implantação da cultura do milho (Zea mays L)*. Botucatu, 1999. 305p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.
- LIMA, C.L.R. de, PAULETTO, E.A., GOMES, A. da S., LIMA, A.C.R. de., HARTWIG, M.P., PASSIANOTO, C.C., SANTOS, E.L. dos. Distribuição do tamanho de agregados em diferentes sistemas e profundidades como indicador físico da qualidade de um Planossolo. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 3, 2000, Pelotas. *Resumos...* Pelotas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, 2000. p.187-91. (Editado em CD-ROM).
- LINSTRON, M.J., VOORHEES, W.B. Responses of temperate crops in North America to soil compaction. In: SOANE, B.D., van OUWERKERK, C. *Soil compaction in crop production*. London: Elsevier, 1994. p.265-86 (Developments in agricultural engineering, 2).
- LIPIEC, J., HÅKANSSON, I., TARKIEWICZ, S., KOSSOWSKI, W. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. *Soil & Tillage Res.*, v.19, p.307-17, 1991.
- LOMBARDI NETO, F., CASTRO, O.M. de., DECHEN, S.C.F., VIEIRA, S.R., DE MARIA, I.C. *Manual de coleta de amostras e análises físicas para fins de experimentação em conservação do solo*. Campinas: Seção de Conservação do Solo, Instituto Agrônômico, 1993. 77p.
- LUCARELLI, J.R.F. de. *Alterações em características de um Latossolo Roxo submetido a diferentes sistemas de manejo*. Campinas, 1997. 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola/Água e Solo) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.

- MACEDO, V.R.M. *Compressibilidade de um Podzólico Vermelho-Escuro fisicamente degradado e recuperado*. Porto Alegre, 1993. 88p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- MACHADO, J.A., BRUM, A.C.R. Efeito do sistema de cultivo em algumas propriedades físicas do solo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.2, p.81-4, 1978.
- MACHADO, A.L.T, TREIN, C.R. Determinação da compressibilidade em dois tipos de solos do Rio Grande do Sul. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 3, 2000, Pelotas. *Resumos...* Pelotas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, 2000. p.287-93. (Editado em CD-ROM).
- MAGALHÃES, P.S.G. Manejo de solo e seus efeitos sobre a compactação. *Lav. Arrozeira*, v.43, n.392, p.14-7, 1990.
- MANTOVANI, E.C. Compactação do solo. *Inf. Agropecu.*, v.13, n.147, p.52-5, 1987.
- MANTOVANI, E.C., SANS, L.M.A., RESENDE, M. Relação entre o teor de umidade e a compactação do solo para diferentes classes de latossolos. In: *EMBRAPA. Relatório técnico anual do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo: 1988-1991*. Brasília, p.197-8, 1992.
- MARQUES, J.P. *Manejo da vegetação espontânea para implantação da cultura do milho (Zea mays L.) em plantio direto e preparo convencional do solo*. Botucatu, 1999. 98p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.
- MATA, J. de D.V. da. *Relações entre características físicas e os níveis de compactação de alguns latossolos paranaenses*. Curitiba, 1988. 105p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Ciência do Solo) - Universidade Federal do Paraná.

- MATERECHERA, S.A., DEXTER, A.R., ALSTON, A.M. Penetration of very strong soils by seedling of different plant species. *Plant soil*, v.135, p.31-41, 1991.
- MIRANDA, E.E.V. de. *Avaliação da sustentabilidade da estrutura de um Latossolo sob cultivo de cafeeiro na região dos cerrados*. Lavras, 2001. 57p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras.
- MOREIRA, J.A.A., SANTOS, A.B., DINIZ, A.J. Relação massa/volume e retenção de água de um Latossolo Vermelho-Amarelo de Jussara, GO. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25, 1995, Viçosa. *Resumos...* Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1995. p.2154-56.
- MUZZILI, O. Princípios e perspectivas de expansão. In: FUNDAÇÃO INSTITUTO AGRÔNOMICO DO PARANÁ. *Plantio direto no Estado do Paraná*. Londrina: Instituto Agrônomo do Paraná, 1981. p.11-17. (Circular, 23).
- NOGUEIRA, J.B. *Mecânica dos solos: ensaios de laboratório*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1995. 248p.
- NOVAK, L.R., MANTOVANI, E.C., MARTYN, P.J., FERNANDES, B. Efeito do tráfego de trator e da pressão de contato pneu/solo na compactação de um latossolo vermelho-escuro álico, em dois níveis de umidade. *Pesqui. Agropecu. Bras.*, v.27, p.1587-95, 1992.
- OHU, J.O., FOLORUNSO, O.A. The effect of machinery traffic on the physical properties of a sandy loam soil and on the yield of sorghum in north-eastern Nigeria. *Soil & Tillage Res.*, v.13, p.399-405, 1989.
- OLIVEIRA, G.C. de. *Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo submetido a diferentes sistemas de manejo por 20 anos no cerrado*. Lavras, 2002. 78p. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras.

- PACHECO, A.A.R.C., DIAS JUNIOR, M. de S. Estudo comparativo de métodos de campo e laboratório aplicados à confecção de blocos em adobe. *Ciênc. Prát.*, v.14, p.176-90, 1990.
- PALADINI, F.L.S., MIELNICZUK, J. Distribuição de tamanho de agregados de um solo Podzólico Vermelho-Escuro afetado por sistema de culturas. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.15, p.135-40, 1991.
- PALMEIRA, P.R.T., PAULETTO, E.A., TEIXEIRA, C.F.A., GOMES, A.S., SILVA, J.B. Agregação de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.23, p.189-95, 1999.
- PEDROTTI, A., PAULETTO, E.A., CRESTANA, S., FERREIRA, M.M., DIAS JUNIOR, M.S., GOMES, A.S., TURATTI, A.L. Resistência mecânica à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.25, p.521-9, 2001.
- PERDOK, U.D., ARTS, W.B.M. The performance of agricultural tyres in soft soil conditions. *Soil & Tillage Res.*, v.10, p.319-30, 1987.
- PEREIRA, I. da S., RESCK, D.V.S., GUEDES, H.M., SILVA, J.E. da., CASTRO, L.H.R. Efeito de diferentes sistemas de manejo na distribuição de macro e microagregados e no teor de carbono orgânico em Latossolo Vermelho-Escuro na região dos cerrados, Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 8, 1996, Planaltina. *Anais...* Planaltina: EMBRAPA, 1996. p.367-71.
- PLATAFORMA PLANTIO DIRETO. *Histórico do sistema plantio direto*. Disponível em: <<http://www.embrapa.br/plantiodireto>>. Acesso em: 20 jun. 2001.
- RAGHAVAN, G.S.V., McKYES, E., AMIR, I., CHASSE, M., BROUGHTON, R.S. Prediction of soil compaction due to off-road vehicle traffic. *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng)*, v.19, p.610-3, 1976.

- REICHARDT, K. *Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas*. 2.ed. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1996. 505p.
- REICOSKY, D.C., KEMPER, W.D., LANGDALE, G.W., DOUGLAS JR, C.L.; RASMUSSEN, P.E. Soil organic matter changes resulting from tillage and biomass production. *J. Soil Water Cons.*, v.50, p.253-61, 1995.
- REINERT, D.J. *Soil structural form and stability induced by tillage in a typic hapludalf*. Michigan, 1990. 128. Tese (Doctor of Philosophy - Department of Crop and Soil Sciences) - Michigan State University.
- REINERT, D.J., MUTTI, L.S.M., ZAGO, A., AZOLIN, M.A.D., HOFFMANN, C.L. Efeito de diferentes métodos de preparo do solo sobre a estabilidade de agregados em solo Podzólico Vermelho-Amarelo. *Rev. Centro Ciênc. Rur.*, v.14, p.19-25, 1984.
- RESENDE, M., CURTI, N., REZENDE, S.B., CORRÊA, G.F. *Pedologia: base para distinção de ambientes*. 2 ed. Viçosa: Núcleo de Estudo de Planejamento e Uso da Terra, 1997. 367p.
- REYNOLDS, W. D., ELRICK, D. E. In-situ measurement of field - saturated hydraulic conductivity, sorptivity and α parameter using the Ghelph permeameter. *Soil Sci.*, v.140, p.292-302, 1985.
- REZENDE, R.C.A., GUIMARÃES, E.C., MORAES, A.S., BORGES, E.N. Tamanho de amostra para estimar a condutividade hidráulica do solo saturado nos sistemas de manejo convencional e de plantio direto, utilizando o permeâmetro de Guelph. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 27, 1999, Brasília. *Resumos...* Brasília: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999. (Editado em CD-ROM).
- RICHARDS, L.A. Physical conditions of water in soil. In: BLACK, C.A. (Ed.) *Methods of soil analysis*. Madison: American Society of Agronomy, American Society for Testing and Materials, 1965. Part 1, 770p. (Agronomy, 9).

- ROSOLEM, C.A., FURLANI JR., E., BICUDO, S.J., MOURA, E.G., BULHÕES, L.H.
Preparo do solo e sistema radicular do trigo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.16, p.115-20, 1992.
- ROTH, C.H., CASTRO FILHO, C. de, MEDEIROS, G.B. de. Análise de fatores físicos e químicos relacionados com a agregação de um Latossolo Roxo distrófico. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.15, p.241-8, 1991.
- ROTH, C.H., MEYER, B., FREDE, M.G., DERPSCH, R. Effect of mulch rates and tillage systems on infiltrability and other soil physical properties of an oxisol in Paraná, Brazil. *Soil & Tillage Res.*, v.11, p.81-91, 1988.
- RUSANOV, V.A. Effects of wheel and track traffic on the soil on crop growth and yield. *Soil & Tillage Res.*, v.19, p.131-43, 1991.
- SÁ, J.C.M., CERRI, C.C., DICK, W.A., LAL, R. Plantio direto: recupera a matéria orgânica do solo e reduz a emissão de CO₂ para a atmosfera. *Rev. Plantio Direto*, n. 59, p.41-5, 2000.
- SANTOS, H.P. dos, TOMM, G.O., LHAMBY, J.C.B. Plantio direto versus plantio convencional: efeito na fertilidade do solo e no rendimento de grãos de culturas em rotação com a cevada. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.19, p.449-54, 1995.
- SANTOS, G. A. dos. *Graus de compactação e adubação fosfatada no crescimento e nutrição do milho (Zea mays L.) em solos distintos*. Lavras, 2001. 80p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras.
- SANTOS, J.R. *Produção de grãos, estabilidade de agregados e frações do fósforo e da matéria orgânica do solo em função do manejo e da aplicação de calcário, gesso e vinhaça*. Botucatu, 2000. 120p. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista.

SARVASI, F. de O.C. *Dinâmica da água, erosão hídrica e produtividade das culturas em função do preparo do solo*. Piracicaba, 1994. 147p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

SAS Institute. *SAS language and procedure: usage*. Version 6. Cary, 1995. 373p.

SATURNINO, H.M. Evolução do plantio direto e as perspectivas nos cerrados. *Inf. Agropecu.*, v.22, n.208, p.5-12, 2001.

SATURNINO, H.M., LANDERS, J.N. O que é plantio direto? In: SATURNINO, H.M.; LANDERS, J.N. (Ed.) *O meio ambiente e o plantio direto*. Goiânia: Associação de Plantio Direto no Cerrado, 1997. p.16-8.

SCHULTZ, L.A. *Manual do plantio direto: técnicas e perspectivas*. Porto Alegre: Editora Agropecuária, 1978. 84p.

SIDIRAS, N., VIEIRA, M.J. Comportamento de um Latossolo Roxo Distrófico, compactado pelas rodas do trator na semeadura - rendimentos de três culturas. *Pesqui. Agropecu. Bras.*, v.19, p.1285-93, 1984

SIDIRAS, N., VIEIRA, S.R., ROTH, C.H. Determinação de algumas características físicas de um Latossolo Roxo distrófico sob plantio direto e preparo convencional. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.8, p.265-8, 1984.

SILVA, A.P. da, LIBARDI, P.L., CAMARGO, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois latossolos. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.10, p.91-5, 1986.

- SILVA, A.R.B. da. *Comportamento de variedades/híbridos de milho (Zea mays L.) em diferentes tipos de preparo de solo*. Botucatu, 2000. 95p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.
- SILVA, H.P. da. *Infiltração de água em um podzólico vermelho-escuro fisicamente degradado em processo de recuperação*. Porto Alegre, 1986. 105p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SILVA, I. de F. da., MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.21, p.113-7, 1997a.
- SILVA, I.F. da, MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.21, p.313-9, 1997b.
- SILVA, I.F., MIELNICZUK, J. Sistemas de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.22, p.311-7, 1998.
- SILVA, M.L.N., CURI, N., BLANCANEUX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. *Pesqui. Agropecu. Bras.*, v.35, p.2485-92, 2000a.
- SILVA, R.B. da. *Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de um Latossolo sob diferentes intensidades de uso na região dos cerrados*. Lavras, 2002. 142p. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras.
- SILVA, V. R. da. *Compressibilidade de um podzólico e um latossolo em função do estado inicial de compactação e saturação em água*. Santa Maria, 1999. 116p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Biodinâmica de Solos) - Universidade Federal de Santa Maria.

- SILVA, V.R. da., REINERT, D.J., REICHERT, J.M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. *Ciênc. Rural*, v.30, p.795-801, 2000b.
- SILVA, V.R., REINERT, D.J., REICHERT, J.M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.24, p.239-49, 2000c.
- 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. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.26, p.1-8, 2002.
- SNEDECOR, G.W., COCHRAN, W.G. *Statistical methods*. 8.ed. Ames: Iowa State University Press, 1989. 503p.
- SOANE, B.D., BLACKWELL, P.S., DICKSON, J.W., PAINTER, D.J. Compaction by agricultural vehicles: A review. I. Soil and wheel characteristics. *Soil & Tillage Res.*, v.1, p.207-37, 1981.
- SOIL SURVEY STAFF. *Soil survey manual*. Washington: USDA, SCS. U.S. Gov. Print. Office, 1993. 437p. (Handbook, 18).
- SOUZA, J.L.G. *Estudo da fração argila da Terra Roxa Estruturada do Município de Botucatu (SP) para fins de gênese e classificação de solos*. Botucatu, 1973. 73p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Médicas e Biológicas de Botucatu, Universidade Estadual Paulista.
- SOWERS, G.F. Consistency. In: BLACK, C.A. (Ed). *Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling*. Madison: American Society of Agronomy, 1965. Part 1, cap. 31, p.391-9. (Agronomy, 9).

- STONE, R.J., EKWUE, E.I. Maximum bulk density achieved during soil compaction as effected by the incorporation of three organic materials. *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng)*, v.36, p.1713-9, 1993.
- STONE, R.J., EKWUE, E.I. Compressibility of some Trinidadian soils as affected by the incorporation of peat. *J. Agric. Eng. Res.*, v.60, p.15-24, 1995.
- STONE, J.A., LARSON, W.E. Rebond of five one dimensionally compressed unsaturated granular soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.44, p.819-22, 1980.
- SVERZUT, C.B., DANIEL, L.A., PECHE FILHO, A., GOMES, J.A., KLIMIONTE, M.A., VIEIRA, R.C.S., MANTOVANI, E.C., MAFFIAZZI JÚNIOR, H., SANTOS NETO, C.R., COSTA, C.M. Resistência a penetração de um Latossolo Vermelho distrófico em função de diferentes formas de preparo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30, 2001, Foz do Iguaçu. *Trabalhos publicados...* Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2001. (Editado em CD-ROM).
- TAYLOR, J.C., BELTRAME, L.F.S. Por que, quando e como utilizar a subsolagem. *Lavoura Arrozeira*, mai./jun., p.34-44, 1980.
- TIJINK, F.G.J., DOLL, H., VERMEULEN, G.D. Technical and economic feasibility of low ground pressure running gear. *Soil & Tillage Res.*, v.35, p.99-110, 1995.
- TISDALL, J.M., OADES, J.M. Stabilization of soil aggregates by the root systems of ryegrass. *Aust. J. Soil Res.*, v.17, p.429-41, 1979.
- TISDALL, J.M., OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.*, v.33, p.141-63, 1982.

- TORMENA, C.A. Efeito do tráfego de máquinas em propriedades físicas do solo. In: CURSO SOBRE MANEJO DO SOLO NO SISTEMA PLANTIO DIRETO, 1, 1995, Castro. *Anais...* Castro: Fundação ABC, 1996. p.52-77.
- TORMENA, C.A. *Resistência à penetração e porosidade em plantio direto influenciados por preparos pré-implantação e tráfego*. Curitiba, 1991. 159p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Paraná.
- TORMENA, C.A., ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.20, p.333-9, 1996.
- TORMENA, C.A., ROLOFF, G., SÁ, J.C.M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.22, p.301-9, 1998.
- TORRES, E., SARAIVA, O.F. *Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja*. Londrina: Embrapa Soja, 1999. 58p. (Circular técnica, 23).
- TREIN, C.R., BERGAMASCHI, H. Influência da compactação pelo pneu do trator no rendimento do milho em plantio direto sob irrigação. In: ENCONTRO NACIONAL DE PLANTIO DIRETO NA PALHA, 6, 1998, Brasília. *Separata...* Brasília: Associação de Plantio Direto no Cerrado), 1998.
- URCHEI, M.A. *Efeitos do plantio direto e do preparo convencional sobre alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Escuro argiloso e no crescimento e desenvolvimento do feijoeiro (Phaseolus vulgaris L.) sob irrigação*. Botucatu, 1996. 131p. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.
- VARGAS, M. *Introdução à mecânica dos solos*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977. 509p.

- VIEIRA, C., FRAZIER, R.D. Cultivo mínimo: nova técnica de agricultura tratorizada. *Rev. Ceres*, v.11, n.65, p.240-6, 1961.
- VIEIRA, M.J. Propriedades físicas do solo. In: FUNDAÇÃO INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. *Plantio direto no Estado do Paraná*. Londrina: Instituto Agronômico do Paraná, 1981. p.19-30. (Circular, 23).
- VOORHEES, W.B., LINDSTROM, M.J. Soil compaction constraints on conservation tillage in the northern corn belt. *J. Soil Water Conserv.*, v.38, p.307-11, 1983.
- WAGNER, L.E., AMBE, N.M., DING, D. Estimating a Proctor density curve from intrinsic soil properties. *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng)*, v.37, p.1121-5, 1994.

APÉNDICE

Apêndice 1. Resumo da análise de variância da análise química do solo para pH, P (fósforo), H + Al (hidrogênio + alumínio), K (potássio), Ca (cálcio), Mg (magnésio), SB (soma de bases), CTC (capacidade de troca de cátions) e V (saturação de bases) do Nitossolo Vermelho distroférico para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.

Quadrado médio										
F.V.	G.L.	pH	P	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V
Tratamento	5	0,348**	813,2**	81,52**	2,439**	4879**	182**	5208**	5883**	140,76**
Prof.	1	2,723**	3782**	210,3**	25,00**	12063**	1308**	22851**	18451**	1482,3**
Trat*Prof.	5	1,421**	818,8**	170,9**	2,10**	4781**	274**	6458**	4718**	501,38**
Erro	24									
CV (%)		2,3	6,9	15,7	3,7	11,9	19,7	13,3	10,8	5,3

** Significativo a 1%,

* Significativo a 5%

NS Não significativo

Apêndice 2. Resumo da análise de variância da textura do solo (argila, silte e areia) do Nitossolo Vermelho distroférico para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.

Quadrado médio				
F.V.	G.L.	Argila	Silte	Areia
Tratamento	5	446,2981**	33,6093**	528,3481**
Prof.	1	118,2315**	26,0092**	33,3333**
Trat*Prof.	5	7,1426 NS	5,0315 NS	4,3556**
Erro	96			
CV (%)		3,0	13,3	7,1

** Significativo a 1%

* Significativo a 5%

NS Não significativo

Apêndice 3. Resumo da análise de variância dos limites de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e limite de contração (LC) do Nitossolo Vermelho distroférico para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.

Quadrado médio				
F.V.	G.L.	LL	LP	LC
Tratamento	5	181,8398**	93,8799**	59,7334**
Prof.	1	20,9459**	3,6290 NS	3,6100 NS
Trat*Prof.	5	39,0395**	35,5515**	5,3748 NS
Erro	24			
CV (%)		1,75	3,17	5,81

** Significativo a 1%

* Significativo a 5%

NS Não significativo

Apêndice 4. Resumo da análise de variância da densidade de partículas, umidade ótima de compactação e densidade do solo máxima do Nitossolo Vermelho distroférico para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.

Quadrado médio				
F.V.	G.L.	Densidade de partículas	Uótima	Densidade do solo máxima
Tratamento	5	0,017989**	42,03044**	0,030224**
Prof.	1	0,083136**	27,38778**	0,052900**
Trat.*Prof.	5	0,0211094**	19,96778**	0,013513**
Erro	24			
CV (%)		1,4	1,6	0,96

** Significativo a 1%

* Significativo a 5%

NS Não significativo

Apêndice 5. Resumo da análise de variância para a densidade do solo inicial e grau de compactação do Nitossolo Vermelho distroférico para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.

Quadrado médio			
F.V.	G.L.	Densidade do solo inicial	Grau de compactação
Tratamento	5	0,23036**	883,72282**
Prof.	1	4,76768**	9202,71554**
Trat.*Prof.	5	0,10167**	1044,94924**
Erro	528		
CV (%)		6,6	6,5

** Significativo a 1%,

* Significativo a 5%

NS Não significativo

Apêndice 6. Resumo da análise de variância do DMG e das diferentes classes de agregados (> 2 mm, < 2 mm, 2-1 mm e < 1 mm) e da matéria orgânica do Nitossolo Vermelho distroférico para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.

Quadrado médio							
F.V.	G.L.	DMG	> 2 mm	< 2 mm	2-1 mm	< 1 mm	MO
Tratamento	5	30,23672**	10996,85**	10997,24**	974,6601**	6974,743**	5192,778**
Prof.	1	7,64271**	3335,22**	3334,56**	912,0539**	872,278**	5208,333**
Trat*Prof.	5	4,67057**	2187,52**	2187,66**	293,5499**	1185,817**	1737,200**
Erro	96						
CV (%)		13,79	14,18	17,52	20,31	25,98	15,25

** Significativo a 1%,

* Significativo a 5%

NS Não significativo

Apêndice 7. Resumo da análise de variância para a resistência do solo à penetração e umidade gravimétrica por ocasião da determinação da resistência do solo à penetração do Nitossolo Vermelho distroférico para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.

Quadrado médio				
F.V.	G.L.	Resistência à penetração	G.L.	Umidade gravimétrica
Tratamento	5	32961978,0**	5	0,00259**
Prof	3	129129861,6**	1	0,01000**
Trat.*Prof.	15	7568150,8**	5	0,000373 NS
Erro	156		24	

** Significativo a 1%

* Significativo a 5%

NS Não significativo

Apêndice 8. Resumo da análise de variância da macroporosidade, microporosidade e porosidade total do Nitossolo Vermelho distroférico para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.

Quadrado médio				
F.V.	G.L.	Macroporosidade	Microporosidade	Porosidade total
Tratamento	5	85,47378**	107,24328**	20,62683 NS
Prof.	1	1771,47000**	410,28009**	476,7001**
Trat*Prof.	5	45,90133**	11,27054 NS	27,61454*
Erro	96			
CV (%)		23,55	5,52	5,73

** Significativo a 1%

* Significativo a 5%

NS Não significativo

Apêndice 9. Resumo da análise de variância para retenção de água do Nitossolo Vermelho distroférico para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.

Quadrado médio			
F.V.	G.L.	0-5 cm	10-15 cm
Tratamento	5	351,8859**	433,2147**
Tensão	6	1677,5387**	1436,4882**
Trat.*Tensão	30	13,4671**	4,8292 NS
Erro	336		
CV (%)		4,4	5,5

** Significativo a 1%

* Significativo a 5%

NS Não significativo

Apêndice 10. Resumo da análise de variância para a condutividade hidráulica do solo saturado e de infiltração tridimensional do Nitossolo Vermelho distroférico para os diferentes sistemas de manejo e tempo de adoção no sistema plantio direto.

Quadrado médio			
F.V.	G.L.	Cond. hidráulica	Infiltração tridimensional
Tratamento	5	7,11235**	2,15350**
Erro	174		
CV (%)		30,13	6,54

** Significativo a 1%

* Significativo a 5%

NS Não significativo