

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**TEMPO DE IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA PLANTIO
DIRETO E PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE
UM LATOSSOLO**

TESE DE DOUTORADO

Vanderleia Trevisan da Rosa

**Santa Maria, RS, Brasil.
2009**

**TEMPO DE IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA PLANTIO DIRETO
E PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE UM
LATOSSOLO**

por

Vanderleia Trevisan da Rosa

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Processos físicos e morfogenéticos do solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutora em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. José Miguel Reichert

Santa Maria, RS, Brasil

2009

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**TEMPO DE IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA PLANTIO DIRETO E
PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE UM LATOSSOLO**

elaborada por
Vanderleia Trevisan da Rosa

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Ciência do Solo

Comissão Examinadora:

José Miguel Reichert, PhD.
(Presidente/Orientador)

Dalvan José Reinert, PhD (UFSM)
(Co-orientador)

Luís Carlos Timm, Dr (UFPEl)

Jean Paolo Gomes Minella (UFSM)

Claudia Liane Rodrigues de Lima, Dr^a (UFPEl)

Santa Maria, 23 de dezembro de 2009

Dedico
A minha família, especialmente ao meu marido David e meu filho Pedro Henrique.

AGRADECIMENTOS

Aos professores José Miguel Reichert e Dalvan José Reinert, pela troca de conhecimentos durante todo este período, orientação e amizade.

Ao professor Jackson Adriano Albuquerque, pelas orientações e estímulos prestados durante a tese, bem como discussões de métodos e análises, os quais foram essenciais para sua realização.

À CAPES, pela concessão da bolsa durante a maior parte da execução deste trabalho.

À EMBRAPA Trigo pelo apoio financeiro, área concedida, auxílio e disposição prestados, em especial aos pesquisadores, Rainoldo Alberto Kochhann e José Eloir Denardin pela co-orientação e ao pesquisador Arcenio Sattler pelo incentivo e auxílio na coleta dos dados.

Ao Tarcísio Uberti, secretário do Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo e Flavio Fontinelli funcionário do Laboratório de Física do Solo, pela cooperação nos momentos precisos, bem como sua amizade e conselhos.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Física do Solo, pelos momentos de trabalho, descontração e amizade.

Um agradecimento especial aos bolsistas da graduação e aos colegas de pós-graduação e amigos que foram essenciais para a coleta das amostras e análise de laboratório, Marcelo Ivan Mentges, Davi Alexandre Vieira, Claudia Alexandra Barros, Eracilda Fontanela e Paulo Gubiani.

Ao grupo de amigadas Monaliza Pelegrini e João Pelegrini, Simone NoreMBERG e Marcelo Kunz, Eliane Soares e João Batista, Denise Cecconi e Igor Polleto, Débora e Rodrigo Jaques, Gilvan, Jane, Ângela, Leonir e Vanessa pelos momentos de descontração, conversas e apoio nos momentos alegres e difíceis proporcionados, dos quais sinto saudades.

A minha família, meus pais Hélio e Maria Trevisan que sempre acreditaram em mim, a minha irmã Ionete e meu cunhado Avelino Guadagnin, meu irmão Ismael e cunhada Eliane e minhas sobrinhas Patrícia, Maria Carolina e Nicole, que sempre me apóiam mesmo a distância.

Em especial, a meu marido David Peres da Rosa, que esteve a meu lado desde o início deste projeto, pensando desde a sua concepção, desenvolvimento,

bem como, participando ativamente da coleta das amostras, análises, e discussão dos resultados obtidos, estando sempre a meu lado nos momentos bons ou ruins, sem o qual a realização da tese teria sido muito mais difícil, meu muito obrigado.

Finalizando, à Universidade Federal de Santa Maria, por me acolher durante este período importante da minha vida.

RESUMO

Tese de Doutorado

Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo

Universidade Federal de Santa Maria.

TEMPO DE IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA PLANTIO DIRETO E PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE UM LATOSSOLO

Autor: Vanderleia Trevisan da Rosa

Orientador: José Miguel Reichert

Santa Maria, dezembro de 2009

Resumo

Qual o efeito do sistema plantio direto nas propriedades físico-mecânicas ao longo do tempo? com essa questão, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito do sistema plantio direto ao longo do tempo nas propriedades físico-mecânicas do solo, bem como, o comportamento das propriedades compressivas ao longo do uso de um Latossolo Vermelho distrófico. Os tratamentos foram distribuídos em blocos ao acaso em esquema bi-fatorial 5x2, possuindo cinco diferentes tempos de implantação do sistema plantio direto e dois níveis de tráfego. Os tempos de implantação do sistema plantio direto usados foram: SD0 – 0 anos (2 meses); SD2 – 2 anos; SD4 – 4 anos; SD5.5 – 5,5 anos e SD14 – 14 anos. Os níveis de tráfego eram sem e com tráfego. Foram coletadas amostras de solo em três camadas: 0,0-0,06 m, 0,07-0,14 m e 0,15-0,22 m. O SD0 apresentou elevada macroporosidade o que resultou numa elevada condutividade hidráulica do solo saturado, proporcionando maior condutividade ao ar, em todas as camadas de solo estudadas. O aumento do tempo de implantação do sistema plantio direto aumentou a microporosidade e o teor de carbono orgânico, na camada 0,00 – 0,06 m. O SD5.5 e SD14 foram os tratamentos que retiveram mais água independentemente do tráfego de máquinas. No início do sistema plantio direto houve uma menor densidade do solo e ocorrência de maiores deformações relativas, e, após alguns anos, houve uma elevação da densidade e redução da deformação que se estende até o quinto ano e meio, onde há novamente uma redução da densidade e da deformação até o 14º ano. O tráfego não gerou diferença suficiente no coeficiente de compressão, tensão de pré-consolidação, densidade do solo e no grau de saturação inicial desse

solo a 33 kPa. Nos 0,07 – 0,14 m de solo houve uma elevação da densidade do solo e redução do índice de vazios independente do tempo de implantação do sistema plantio direto. O grau de saturação inicial possuiu influência na deformação até o 5º ano e meio de uso de sistema plantio direto, após isso, ação do manejo à estrutura reduziu o seu efeito no solo.

Palavras- chave: Compressibilidade, tráfego, condutividade ao ar e água.

ABSTRACT

Doctor Science Thesis
Graduate Program in Soil Science
Federal University of Santa Maria.

IMPLANTATION TIME OF NO-TILL SYSTEM AND SOIL PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES IN OXISOL

Author: Vanderleia Trevisan da Rosa

Advisor: José Miguel Reichert

Santa Maria, December 2009

Which the effect of no-tillage system on the soil physical and mechanical properties along the time? With this question, the objective this study was to evaluate the effect of the no-tillage system along the time on the physical and mechanical properties of the soil, as well as, the behavior of the compressive properties along the use of Oxisol Red. The experimental design used was of randomized block with bi-factorial 5 x 2, with five different times of implantation management and two levels of traffic. The implantation times of the no-tillage used were: SD0 - 0 years (2 months); SD2 - 2 years; SD4 - 4 years; SD5.5 – 5.5 years and SD14 - 14 years. The level of traffic was without and with traffic. Soil samples were collected in three layers: 0.0 – 0.06 m, 0.07 – 0.14 m and 0,15 – 0.22 m. The SD0 demonstrated increase macroporosity that resulted in high saturated hydraulic conductivity thus increased the air permeability, in all the soil layers studied. With the increase of the time implantation of the no-tillage system, increased of microporosity and organic carbon, in the layer 0.00 – 0.06 m. The SD5.5 and SD14 was the treatments that retain more water independently of the traffic from machines. In the beginning of the no-tillage system had a smaller bulk density and occurrence of larger relative deformations, while after some years, there are an elevation of the bulk density and the reduction of deformation that extends until the fifth and a half year, where, there is a reduction of the bulk density and deformation to the 14th year. The traffic doesn't generate enough differences in the compression index, pré-consolidation tension, bulk density and the degree of water saturation that soil to 33 kPa. In the 0.07 – 0.14 m of soil,

occurred an elevation of the bulk density and reduction of the avoid ratio independently of the time implantation of no-tillage. The degree of water saturation influenced the deformation until the 5th and a half year of use of no-tillage, after that, action of the structure reduced your effect in the soil.

Key word: Compressibility, Air and water conductivity, Traffic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Regiões de tráfego: metade do bloco é semeado com disco desconcentrado e a outra com facão como mecanismos sulcadores de hastes.	32
Figura 2 - Área experimental, a) declividade do local; b) palhada sobre a superfície.	33
Figura 3 - a) cilindros utilizados na coleta de solos na área experimental; b) coleta à campo das amostras de solo.	34
Figura 4 - Perfil do Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto. (caixa demarcada na figura demonstra a camada compactada pelo tráfego de máquinas).....	35
Figura 5 - Aparelho para medir a condutividade ao ar do solo em amostras com estrutura preservada.	39
Figura 6 - Curva de retenção de água do Latossolo Vermelho sob diferentes tempos de implantação do plantio direto ao longo das camadas em estudo.	42
Figura 7 - Relação entre a condutividade do solo ao ar (K_a) e a tensão matricial (Ψ_m) do Latossolo Vermelho com diferentes tempos de implantação do sistema plantio direto.....	46
Figura 8 - Prensa uniaxial usada no teste de compressão.....	60
Figura 9 - Curva de compressão do Latossolo Argiloso sob SD ao longo das camadas de solo.	66
Figura 10 - Variação ao longo do tempo da deformação relativa (DFR) e grau de saturação inicial (a, b, c) e do índice de vazios (d, e, f) (IV) do Latossolo Vermelho nas camadas em estudo.	73
Figura 11 - Variação da densidade (D_s) do Latossolo Vermelho ao longo do tempo de uso em sistema plantio direto ao longo das camadas em estudo.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Rotação de culturas empregada no experimento	34
Tabela 2 – Granulometria de um Latossolo Vermelho sob plantio direto ao longo das camadas 0,00 - 0,06 m, 0,07 - 0,14 m e 0,15 - 0,22 m.	37
Tabela 3 – Porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), densidade do solo (Ds), carbono orgânico (Co) e condutividade hidráulica em solo saturado (K_{θ}) médios na camada 0,00 – 0,06 m.....	48
Tabela 4 – Porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), densidade do solo (Ds), carbono orgânico (Co) e condutividade hidráulica em solo saturado (K_{θ}) médios na camada 0,07 – 0,14 m.....	49
Tabela 5 – Porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), densidade do solo (Ds), carbono orgânico (Co) e condutividade hidráulica em solo saturado (K_{θ}) médios na camada 0,15 – 0,22 m.....	51
Tabela 6 – Interação entre manejo x tráfego, quanto a carbono orgânico (Co), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), densidade do solo (Ds) e condutividade hidráulica em solo saturado (K_{θ}) nas três camadas de solo.....	52
Tabela 7 – Densidade do solo (Ds), Coeficiente de compressão (Cc), grau de saturação inicial (GSI) e tensão de pré-consolidação (σ_p) do Latossolo argiloso sob sistema plantio direto ao longo das camadas em estudo.	63
Tabela 8 – Deformação relativa (DFR), índice de vazios (IV) e densidade (Ds) do Latossolo argiloso submetido a 50 kPa ao longo das camadas de solo.	69
Tabela 9 – Deformação relativa (DFR), índice de vazios (IV) e densidade (Ds) do Latossolo argiloso submetido a 100 kPa ao longo das camadas de solo.	71
Tabela 10 – Deformação relativa (DFR), índice de vazios (IV) e densidade (Ds) do Latossolo argiloso submetido a 200 kPa.....	72
Tabela 11 - Matriz de correlação de Pearson das variáveis físicas e mecânicas do Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto	76

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	12
SUMÁRIO	13
1. INTRODUÇÃO	15
2. HIPÓTESE	17
3. OBJETIVOS GERAL	18
4. REVISÃO DE LITERATURA	19
4.1. EVOLUÇÃO DO SISTEMA PLANTIO DIRETO NO BRASIL E NO MUNDO.....	19
4.2. RETENÇÃO DE ÁGUA DO SOLO MANEJADO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO	20
4.3. EFEITO DO MANEJO NA CONDUTIVIDADE DE AR E ÁGUA DO SOLO	22
4.4. POROSIDADE, DENSIDADE E CARBONO ORGÂNICO EM SOLO MANEJADO COM SISTEMA PLANTIO DIRETO.....	24
4.5. USO DA COMPRESSIBILIDADE DE SOLOS SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO NA DETECÇÃO DE COMPACTAÇÃO	26
5. CAPÍTULO 1. TEMPO DE IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA PLANTIO DIRETO E PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DE UM LATOSSOLO ARGILOSO TRAFEGADO	29
5.1. INTRODUÇÃO.....	29
5.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	32
5.2.1. <i>Característica da área experimental e tratamentos</i>	32
5.2.2. <i>Carbono Orgânico</i>	35
5.2.3. <i>Análise granulométrica do solo</i>	36
5.2.4. <i>Curva de retenção de água</i>	37
5.2.5. <i>Condutividade ao ar</i>	38
5.2.6. <i>Condutividade hidráulica de solo saturado</i>	39
5.2.7. <i>Porosidade e densidade</i>	40
5.2.8. <i>Análise estatística</i>	40
5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41

5.3.1. Retenção de água em Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto ao longo do tempo	41
5.3.2. Condutividade ao ar do solo ao longo do tempo sob sistema plantio direto	44
5.3.3. Condutividade hidráulica em solo saturado, porosidade, densidade e carbono orgânico	47
6. CAPÍTULO 2. COMPACTAÇÃO INDUZIDA E NATURAL EM LATOSSOLO ARGILOSO EM DIFERENTES TEMPOS DE IMPLANTAÇÃO DE SISTEMA PLANTIO DIRETO	55
6.1. INTRODUÇÃO.....	55
6.2. MATERIAL E MÉTODOS	59
6.2.1. Dados gerais	59
6.2.2. Determinações realizadas.....	59
a) Compressibilidade do solo	59
6.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	62
7. CONCLUSÕES	79
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	81
9. REFERÊNCIAS	83

1. INTRODUÇÃO

O uso intensivo do solo com cultivo na região do planalto gaúcho, aliado à declividade natural do terreno, acarretou em grandes perdas de solo propiciadas pela erosão, que repercute na diminuição da produtividade. Para minimizar esses danos, no final da década de setenta e meados da década de oitenta, ações conservacionistas do solo (HERNANI; SALTON, 1998), como a manutenção dos resíduos culturais na lavoura (BRAIDA; CASSOL, 1999) a rotação de culturas e a redução da intensidade de preparo foram implementadas, culminando no desenvolvimento do sistema plantio direto no início da década de noventa.

O cultivo intensivo dos solos nas regiões tropicais e subtropicais, começou a ser trocado a partir da década de 80 pelo sistema plantio direto, que se tornou uma das tecnologias de cultivo de maior expressividade e qualidade da região (DERPSCH et al., 1991). Isso foi resultado, segundo estes pesquisadores à conscientização dos agricultores e da opinião pública em função da necessidade de preservação dos recursos naturais, bem como, por este sistema de condução ser mais econômico a médio e longo prazo.

O sistema plantio direto tornou-se o sistema mais difundido no Brasil nas últimas décadas, sob o “*slogan*” de um sistema conservacionista, ocupando mais de 25 milhões de hectares em 2006 (FEBRPDP, 2009). Contudo, com o passar do tempo, surgem dúvidas se o sistema plantio direto está conseguindo reverter os danos provocados à estrutura física e se sua qualidade física é melhorada.

Nos últimos anos, tem-se repensado o uso do sistema plantio direto, pois solos sob esse tipo de sistema apontam para problemas de compactação (REICHERT et al., 2009; SILVEIRA et al., 2008; COLLARES et al., 2008), que repercutem nas máquinas agrícolas (ROSA et al., 2008), pela maior demanda de tração; as plantas, pela maior resistência oferecida a penetração das raízes (STRECK et al., 2004; COLLARES et al., 2008) e, em problemas de deficiência hídrica em épocas de secas no verão, que é quando as plantas estão em pleno período vegetativo. Outro problema oriundo da compactação do solo está na redução da área explorada pelas raízes (JORAJURIA; DRAGHI, 2000; SEIXAS et al., 2005; ROSA, 2009), onde essas não conseguem romper a camada compactada, que se encontra a poucos centímetros de profundidade (REICHERT et al., 2009),

impedindo assim, que as raízes das plantas cheguem até a água que se encontra nas camadas sub-superficiais do solo.

Outro fator contribuinte aos danos estruturais dá-se na condição do teor de água do solo no período de implantação das culturas, quando normalmente o solo apresenta-se com umidade acima do ponto de friabilidade; assim ao ocorrer tráfego de veículos mecanizados, potencializa-se o efeito da compactação do solo.

2. HIPÓTESE

Solos submetidos ao sistema plantio direto têm suas condições físicas alteradas inicialmente, condicionando a condições piores quando comparadas com sistema convencional. Com o passar do tempo, contudo, as mesmas são melhoradas gradativamente, mesmo quando submetido ao tráfego de máquinas, com exceção da densidade do solo e da tensão de pré-consolidação, as quais aumentam, mas sem causar danos às propriedades físicas importantes como a condutividade do solo ao ar e água, indicadores de boa qualidade estrutural.

3. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste estudo foi avaliar o efeito do sistema plantio direto ao longo do tempo nas propriedades físico-hídricas do solo, bem como, o comportamento das propriedades compressivas ao longo do tempo de uso de um Latossolo Vermelho.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1. Evolução do sistema plantio direto no Brasil e no mundo

O sistema plantio direto em pequenas áreas é praticado há muito tempo, desde o surgimento da agricultura. Porém, em grandes áreas e em áreas comerciais motomecanizadas, a primeira lavoura com esse sistema de que se tem notícia foi implementada por Harry Young e Lawrence Young em 1966, em Herndon, Kentucky, EUA (PHILLIPS; YOUNG, 1973). No Brasil, a introdução do sistema plantio direto é atribuída aos pesquisadores da UFRGS Newton Martins e Luiz Fernando Coelho de Souza, os quais semearam um hectare de sorgo, sem preparo prévio do solo, mantendo os restos culturais remanescentes da cultura de inverno. Isso ocorreu no município de Não-Me-Toque no Rio Grande do Sul, no ano de 1969, com a utilização de uma semeadora, da marca Buffalo, importada dos Estados Unidos (CASSOL et al., 2007).

A evolução do sistema plantio direto no Brasil está claramente relacionada com a evolução tecnológica, que procedeu por etapas, conforme descrito por Denardin (1998):

A primeira etapa transcorreu entre meados da década de sessenta e final da década de setenta, quando as tecnologias de manejo do solo implementadas envolveram a melhoria da fertilidade do solo, via calagem e adubações potássica e fosfatada, o terraceamento e a semeadura de contorno.

A segunda etapa do processo evolutivo ocorreu no período compreendido entre o final da década de setenta e meados da década de oitenta, quando além do terraceamento observaram-se ações conservacionistas no solo como a manutenção de resíduos culturais na lavoura, a redução da intensidade de preparo de solo e a condenação do pousio de inverno.

A terceira etapa ocorreu entre o período compreendido entre a metade da década de oitenta e início da década de noventa, quando no sul do Brasil houve a implementação do Programa Estadual de Microbacias Hidrográficas, objetivando o desenvolvimento integrado de comunidades rurais, e pela criação e proliferação dos clubes Amigos da Terra, principalmente nas escolas.

A quarta etapa se destaca pelo processo evolutivo que ocorreu do início da década de noventa até meados dos anos dois mil, com trabalhos de pesquisa e desenvolvimento do plantio direto tendo sido consolidado o sistema no Brasil.

Atualmente, o sistema se encontra em evolução, tendo na agricultura de precisão sua evolução, com o uso de insumos de acordo com a necessidade específica de cada local da lavoura, com uma distribuição geo-referenciada.

Resultado da evolução das pesquisas, esse sistema é amplamente adotado em todo território nacional, ocupando 32 milhões de hectares, ou 70% das lavouras de grãos, segundo dados apresentados pela Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) em novembro de 2009. O cultivo da soja é o principal, com 61%, seguido do milho 1ª safra (16,1%) e 2ª safra (14,3%) e do trigo, com 7% da área (CULTIVAR, 2009). Atualmente, existem várias empresas fabricantes de máquinas e implementos específicas para o sistema, nos mais variados tamanhos e de acordo com a necessidade de cada propriedade agrícola.

O sistema plantio direto está consolidado como um sistema de cultivo que preserva o solo e diminui as perdas por erosão, as dúvidas que surgem agora dizem respeito à qualidade do solo, física e biológica.

4.2. Retenção de água do solo manejado em sistema plantio direto

O conhecimento do movimento da água no perfil de um solo é de fundamental importância para a solução de problemas envolvendo irrigação, drenagem, armazenamento e transporte de água e nutrientes, bem como o escoamento superficial e o controle da infiltração. A planta através de seu sistema radicular retira do solo a água e os nutrientes necessários para o seu crescimento e desenvolvimento (REICHARDT, 1990).

A manutenção da estrutura devido ao não revolvimento do solo no sistema plantio direto resulta em condições adequadas de infiltração e retenção de água no solo, quando o sistema é manejado em condições adequadas, ou seja, rotação de culturas e controle do tráfego (HÅKANSSON, 2005).

Os sistemas de preparo do solo promovem alterações nas propriedades físicas, como a agregação do solo (CASTRO FILHO et al., 1998), a densidade e a porosidade do solo (De MARIA et al., 1999).

Solos manejados com sistema plantio direto adquirem condições físicas diferentes daqueles solos submetidos ao preparo convencional (REINERT et al., 1984), onde as principais alterações verificadas são: redução da erosão hídrica devido ao aumento na infiltração de água no solo (DAO, 1993; FRANZLUEBBERS, 2002), aumento na densidade e diminuição no volume de macroporos na camada superficial. Essa última alteração pode se tornar restritiva ao crescimento radicular

das plantas, devido à redução na porosidade de aeração e menor disponibilidade de água, nutrientes e oxigênio, proporcionando queda no rendimento de grãos (SECCO et al., 2005).

Após dois anos de implantação do sistema plantio direto em Argissolo, Petry et al. (2007) não encontraram diferenças quanto ao armazenamento e à disponibilidade de água às plantas quando comparado ao sistema convencional. Contudo, em três anos de uso desse sistema, Cruz et al. (2003) observaram que o sistema plantio direto demonstrou maior conteúdo de carbono orgânico na camada superficial, mas sem apresentar melhoras na agregação. Com sete anos de implantação do sistema, Silva et al. (2006c) encontraram redução da amplitude térmica do solo, demonstrando que as melhorias com a implantação do sistema em Argissolo Vermelho-Amarelo acontecem com o passar do tempo.

Os sistemas plantio direto e cultivo mínimo podem contribuir para uma melhor condição físico-hídrica do solo, que segundo Salton & Mielniczuk (1995) é expresso pelo estabelecimento de uma porosidade contínua (bioporos), promovido pela atividade biológica da fauna edáfica e à ação das raízes em um Argissolo Vermelho.

O intenso tráfego de máquinas, associado ao não-revolvimento do solo, usualmente ocasiona a compactação da camada superficial do solo, reduzindo o teor de água do solo (TORMENA et al., 1998), pois o aumento do grau de compactação leva à redução da macroporosidade e da condutividade hidráulica de solo saturado (SUZUKI et al., 2007). Por conseguinte, o maior armazenamento de água no solo sob sistema plantio direto pode não representar na maior disponibilidade de água às plantas, principalmente devido à ocorrência de limitações físicas ao crescimento das raízes e, conseqüentemente, da parte aérea das plantas.

No sistema plantio direto, a ausência ou revolvimento mínimo do solo favorece a manutenção de teores de água mais elevados em virtude da manutenção dos resíduos culturais, bem como o tráfego sistemático de máquinas pode promover compactação excessiva na superfície do solo (TORMENA; ROLOFF, 1996), principalmente nos solos de elevados teores de argila. A compactação gerada pelo tráfego de pneus agrícolas pode ser superficial, quando provocada pelo uso errôneo da pressão de insuflagem, e sub-superficial, quando originada pelo excesso de peso por eixo dos tratores, colhedoras e/ou máquinas agrícolas (SALIRE et al., 1994; HÅKANSSON; VOORHEES, 1996). Segundo Daniel & Maretti (1990), a profundidade máxima de efeito da compactação imposta por máquinas e

implementos agrícolas, independentemente do tipo de solo e do peso da maquinaria, não excede 50 cm. Porém, isso varia com as características texturais do solo, pois em estudos realizados por Håkansson & Reeder (1994) demonstraram que a uma carga de 4 Mg aplicada ao solo pode originar uma camada compacta até os 0,30 m de profundidade, 0,4 m quando for 6 Mg, e 0,6 m ou mais quando a massa for igual ou superior a 15 Mg.

Do ponto de vista hídrico, as curvas de retenção de água e água disponível podem não ser afetadas pelos sistemas de preparo do solo, conforme estudos de Silva et al. (2005b). A adoção do sistema plantio direto aumentou os teores de carbono orgânico (BRAIDA et al., 2008) na camada superficial do solo e também, da resistência à penetração do solo em superfície (TORMENA; ROLOFF, 1996). Segundo estudos de Braida et al. (2008), o revolvimento do solo não influencia a porosidade total e a distribuição do tamanho de poros, porém aumenta a condutividade hidráulica saturada na superfície de Argissolo Vermelho. Ressalta-se que isso pode não ocorrer em solo de textura argilosa, conforme estudos de Costa et al. (2003) em Latossolo Vermelho. O incremento da microporosidade com a compactação aumenta a retenção de água no solo, mas esse aumento não se expressa em termos de conteúdo de água disponível no solo. Nesse contexto, temos a condutividade hidráulica e a resistência à penetração do solo como as propriedades mais sensíveis aos efeitos da compactação (SILVA et al., 2006).

De acordo com Cavalieri et al. (2006), a retenção de água no solo não é influenciada pelos sistemas de preparo, mas é afetada sim pela densidade do solo e teor de argila. Sendo que isso é independente da tensão do solo e da matéria orgânica (BEUTLER, et al., 2002).

4.3. Efeito do manejo na condutividade de ar e água do solo

A dinâmica da água é dependente de características internas e externas do solo. Dentre as internas citam-se: a textura, porosidade, profundidade do lençol freático, tipo de argilominerais, matéria orgânica, dentre outras, e as externas cobertura do solo, densidade de plantas, precipitação, temperatura e a relação solo-planta-atmosfera (MUSY; SOUTTER, 1991).

O movimento de água no solo e sua retenção, importantes na manutenção do suprimento de água para o desenvolvimento das raízes, dependem da tensão matricial e da condutividade hidráulica do solo. Nesse contexto, Darcy (1856 apud REICHARDT; TIMM, 2004) explica que a densidade de fluxo de água é proporcional ao gradiente de potencial hidráulico no solo, ou seja, quanto maior for esse gradiente, maior será o fluxo de água. O conhecimento dessas propriedades físico-hídricas do solo é fundamental para entender o processo dinâmico que influencia também no movimento dos solutos no solo. As variáveis mais usadas para descrever o fluxo de água no solo incluem a taxa de infiltração, a condutividade hidráulica e o teor e a tensão de água no solo (WANG et al., 1998).

Outras propriedades físicas do solo, como a textura e a estrutura também determinam o fluxo de água no solo (KLEIN; LIBARDI, 2002). Nesse sentido, Ellies et al. (1997) destacam a importância da funcionalidade do sistema poroso do solo, que é influenciado pela quantidade, tamanho, morfologia, continuidade e orientação dos poros. Todas estas propriedades do espaço poroso, que influenciam a condutividade, podem ser reunidas no termo único “geometria porosa dos solos” (LIBARDI, 2000).

Em Argissolo Vermelho distrófico, Silva et al. (2005b) determinaram na camada superficial uma condutividade hidráulica em solo saturado superior no plantio convencional em relação aos sistemas de preparo reduzido e sistema plantio direto. Esse comportamento foi atribuído ao efeito da mobilização do solo realizada pela ação do arado de disco e das duas gradagens realizadas, que geram macroporos, poros responsáveis pela entrada de água no solo.

A condutividade hidráulica pode também revelar diferenças entre sistemas de manejo (COQUET et al., 2005), pois o incremento da pressão aplicada por máquinas agrícolas pode reduzir os valores de condutividade hidráulica do solo saturado (HORN et al., 2003), enquanto que a estrutura tem um efeito pronunciado na condutividade de ar, como demonstrado e discutido por Moldrup et al. (2001) para solos de estrutura preservada.

Pode ocorrer decréscimo da condutividade hidráulica dos solos devido à ação acumulada das chuvas, sendo estabelecido num processo de dois estágios: o primeiro, caracterizado por um decréscimo acentuado, e o segundo, caracterizado por um decréscimo lento (SILVA; KATO, 1997).

Os poros que conduzem água quando o solo está saturado também são responsáveis pela passagem do ar quando o solo é drenado. Quanto maior a tensão aplicada ao solo, maior o espaço poroso livre de água proporcionando maior aeração ao solo.

A estrutura do solo tem efeito pronunciado na condutividade ao ar (MOLDRUP; OLESEN, 2001). Para um mesmo tipo de solo, diferentes práticas de manejo poderão afetar diretamente suas propriedades, incluindo processos de agregação (CASTRO FILHO, 1998).

A condutividade do solo ao ar (K_a) é a medida do espaço poroso não obstruído, ou seja, é dependente da continuidade de poros no solo. A condutividade ao ar descreve, em função de fatores geométricos dos poros (COREY, 1986), sendo uma medida sensível à compactação do solo, a densidade, a porosidade total, a distribuição do tamanho e a continuidade de poros (FONTANELA, 2008). A descontinuidade de poros é responsável pela redução significativa da condutividade do solo a água (BEUTLER, 2001) e ao ar.

É importante conhecermos o comportamento da condutividade do solo, pois alterações na estrutura, oriundas principalmente da compactação, provocam mudanças na porosidade, afetando os fluxos de ar e de água do solo.

4.4. Porosidade, densidade e carbono orgânico em solo manejado com sistema plantio direto

Os diferentes sistemas de manejo de solo alteram o conteúdo de carbono orgânico. As alterações nesse conteúdo modificam as propriedades físicas do solo, ou seja, interferem na formação dos agregados estáveis, densidade do solo, aeração, retenção de água, drenagem e consistência do solo (GOMAR et al., 2002; BRANCALIÃO; MORAES, 2008), o que afeta a produtividade das culturas. O conhecimento dessa mudança é importante para predizer os efeitos sobre o ecossistema e para estabelecer estratégias de manejo que permitam obter uma produção sustentável (RASMUSSEN; COLLINS, 1991).

A sucessão de culturas com grande aporte de resíduos pode favorecer o acúmulo de elevado do conteúdo de carbono orgânico (Co) (LAL, 2004), onde no sistema plantio direto manejado com a rotação de culturas de alta adição de

resíduos vegetais ricos em carbono e nitrogênio resulta num balanço positivo de Co no solo (COSTA et al., 2008).

Os benefícios nas propriedades físicas proporcionados pelo enriquecimento de material orgânico na camada superficial de solos manejados com sistema plantio direto também são refletidos na resistência à compactação, conforme estudos de Merten & Mielniczuk (1991) e Amado et al. (2001), proporcionando ao solo uma maior capacidade de suporte ao tráfego de máquinas. Segundo estudos de Braida et al. (2008) e Brandt (2005), a adição da palha à superfície do solo ajuda no amortecimento da tensão gerada pelo tráfego. Essas constatações ressaltam a importância da rotação de culturas e da proteção da superfície do solo.

O estudo da porosidade drenável é vital para o entendimento da condutividade hidráulica do solo saturado e na sua infiltração (MELLO et al., 2002). Determinações de porosidade e densidade são comumente usadas para identificar camadas compactadas no solo (STRECK et al., 2004; SILVA et al., 2005b; SILVA et al., 2005a; REICHERT et al., 2009). A propriedade de transmissão de água pelos macroporos pode exercer considerável influência na infiltração e na drenagem da água no solo (ABREU et al., 2004).

A compactação do solo geralmente reduz a quantidade de água disponível para as plantas, pois provoca a redução dos macroporos e dos microporos, resultando em poros ainda menores. A redução da macroporosidade leva à diminuição da porosidade total e aumento da microporosidade, resultando em diminuição da quantidade de água retida próximo à capacidade de campo e aumento da quantidade de água retida em maiores tensões, ou seja, próximo ao ponto de murcha permanente, o que dificulta o aproveitamento de água pelas raízes (BRADY; WEIL, 2002).

A intensidade do uso do solo além de resultar nas alterações da porosidade, gera também modificações na densidade e redução do teor de carbono orgânico (MACHADO, et al., 2008). As amplitudes da densidade do solo impostas pelo uso e manejo resultam na necessidade de maior conteúdo de água para manter os valores de resistência do solo à penetração igual ou inferior ao valor crítico ao desenvolvimento de raízes de 2 MPa (BLAINSKI, et al., 2008).

O tráfego é o principal fator na alteração das propriedades físicas do solo, sendo que a compactação gerada pelo tráfego de máquinas reduz a porosidade de aeração para valores abaixo do limite crítico de $0,1 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ (TORMENA et al., 1998).

Para um mesmo tipo de solo, o que apresenta maior densidade de solo está, a priori, mais compactado.

A compactação do solo é um processo em que a porosidade e a condutividade são reduzidas (SOANE; OUWERKERK, 1994), onde alterações nessas propriedades resultam em modificações nas propriedades hídricas (SECCO et al., 2004).

Alguns estudos indicam que há compactação no solo sob sistema plantio direto (HÅKANSSON & MEDVEDEV, 1995; KLEIN & BOLLER, 1995), provocada pelo efeito cumulativo do tráfego de máquinas e acomodação natural das partículas sólidas. Esta condição foi observada em trabalhos realizados por Håkansson et al. (1988), Reinert (1990), Silva & Kay (1997); contudo, o tempo de uso do sistema não foi levado em consideração. Nesse sentido, Stone et al. (2002), Silveira et al. (2003) e Oliveira et al. (2004) ressaltam que o uso contínuo do sistema plantio direto gera redução da densidade do solo, origem dos benefícios do sistema quanto à melhoria da agregação, maior teor de carbono orgânico e maior continuidade e estabilidade de poros.

4.5. Uso da compressibilidade de solos sob sistema plantio direto na detecção de compactação

Como abordado, após alguns anos, o solo sob o sistema plantio direto está apresentando problemas de compactação sub-superficial, os quais vêm se agravando pela falta de revolvimento do solo (restrito à linha de semeadura), umidade inadequada quando na implantação das culturas (SILVA et al., 1984) e manejo de máquinas e utilização inadequada da pressão de insuflagem dos pneus agrícolas (RICHART et al., 2005; TESSIER; LAGUE, 1991; HÅKANSSON; DANFORS, 1981).

O efeito da compactação pode estar armazenado no banco de memórias de tensões do solo. Conforme explicam Holtz & Kovacs (1981), a estrutura armazena o histórico de tensões e processos naturais sofridos, que pode ser identificado pela compressibilidade do solo. Assim sendo, tem-se no estudo da compressibilidade, a possibilidade da análise desse histórico, sendo amplamente utilizado para determinar a capacidade de suporte de carga (LEBERT; HORN, 1991; DIAS Jr;

PIERCE, 1995), bem como delimitar as áreas de deformações plásticas (o solo ao ser submetido a uma força normal consegue retornar ao seu estado de origem) e elásticas (o solo não consegue retornar ao seu estado origem ao ser submetido a uma força normal).

A elasticidade do solo é afetada pela variação da sua umidade, assim como pelo teor de Co e pela densidade. Aumentos no teor de carbono resultam em aumento da elasticidade do solo (BRAIDA et al., 2008), ou seja, deformações elásticas.

Mediante a curva de compressão, que considera o índice de vazios ou a densidade com o logaritmo da pressão aplicada, obtém-se a tensão de pré-consolidação (σ_p), que é um parâmetro indicativo da capacidade de suporte de pressão do solo (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996), e o coeficiente de compressão (C_c), que é um indicativo da susceptibilidade à compactação (LARSON et al., 1980).

A pressão de pré-consolidação aumenta de forma exponencial com o aumento da densidade do solo, para determinado grau de saturação do solo, sendo que em Argissolo, o revolvimento do solo provoca uma redução nos valores de tensão de pré-consolidação de até quatro vezes, na faixa de densidade do solo de 1,31 a 1,60 Mg m⁻³, comparado ao sistema plantio direto (SILVA et al., 2002).

Os parâmetros de compressibilidade são influenciados pelo teor de água do solo, verificando-se que, à medida que há aumento da umidade do solo, há redução da tensão de pré-consolidação e aumento do coeficiente de compressão, indicando menor capacidade de suporte de carga e maior susceptibilidade do solo à compactar (SILVA; CABEDA, 2006).

As tensões de água e os sistemas de uso ou manejo influenciam nas deformações de solo, as quais se mostram mais elevadas nas tensões mais baixas e na condição de solo mais poroso, evidenciando a necessidade de um controle do teor de água do solo na tomada de decisão da entrada de máquinas em áreas agrícolas (OLIVEIRA et al., 2003). As tensões de água no solo afetam a tensão de pré-consolidação, sendo que os valores mais elevados ocorrem nas tensões mais baixas (OLIVEIRA et al., 2003).

No sistema plantio direto sob efeito da compactação adicional via tráfego de máquinas, Lima et al. (2006) encontraram os maiores e menores valores, respectivamente, de densidade e coeficiente de compressão do solo. Segundo os

autores, essas propriedades são consistentes e sensíveis para detectar alterações à estrutura do solo.

O tempo de adoção do sistema plantio direto altera o comportamento compressivo dos solos por meio de mudanças na tensão de pré-consolidação (ASSIS; LANÇAS, 2005), proporcionando, assim, alterações nas propriedades físico-hídricas. Solos sob sistema plantio direto com maior densidade inicial apresentam menor susceptibilidade à compactação e menor deformação, quando submetidos a pressões externas, sendo que, quanto maior a deformação total da amostra de solo no teste de compressão uniaxial, mais susceptível à compactação e menor sua capacidade de suporte de carga (SUZUKI et al., 2008).

A mudança na compactação pode ser prevista em função do estado inicial do solo; da pressão aplicada; do teor de água; e da tensão de pré-consolidação, os quais, segundo Pereira et al. (2001), mostram que é possível prever a resistência do solo causada pelos sistemas de cultivo.

A compactação do solo pode também ocorrer na consistência de friabilidade do solo, que é indicada como a melhor condição para ocorrer o tráfego de máquinas; desde que sejam aplicadas ao solo pressões maiores do que a sua capacidade de suporte de carga, a tensão de pré-consolidação.

A aplicação de tráfego aumenta a densidade e a resistência do solo à penetração, sendo que essa condição reduz a porosidade total e a macroporosidade, porém não afeta a microporosidade (STRECK et al., 2004). O aumento do grau de compactação leva à redução linear da macroporosidade e da condutividade hidráulica em solo saturado e ao aumento da resistência do solo à penetração (SUZUKI, et al., 2007).

5. CAPÍTULO 1.

TEMPO DE IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA PLANTIO DIRETO E PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DE UM LATOSSOLO ARGILOSO TRAFEGADO

5.1. Introdução

O sistema plantio direto tornou-se o sistema de manejo mais difundido no Brasil, onde cada vez mais as pesquisas vêm buscando expandir esse sistema para culturas que ainda empregam o revolvimento intensivo do solo, como exemplo tem-se a cana de açúcar, batata, mandioca, e algumas lavouras de feijão e algumas hortaliças. Essa expansão é resultada da evolução das pesquisas e das máquinas e equipamentos agrícolas, onde se ressalta que no ano de 2009, há mais de 32 milhões de hectares do território nacional manejados com este sistema (CULTIVAR, 2009). Assim, o sistema plantio direto está consolidado como um sistema de cultivo que protege e preserva o solo, advindo das reduções consideráveis de perdas por erosão (DERPSCH et al., 1991), estabilização de agregados proporcionado pelo aumento da matéria orgânica (CARPENEDO; MIELNICZUK, 1990; PALADINI; MIELNICZUK, 1991) e da ação da microfauna através da produção de elementos que também auxiliam a estabilização dos agregados (HENKLAIN, 1997). Porém, nos dias atuais, as dúvidas que surgem dizem a respeito da compactação do solo, se ela existe ou não, e se esse sistema está melhorando as propriedades do solo.

Várias pesquisas apontam para efeitos nocivos da compactação em solos sob sistema plantio direto. Klein & Boller (1995) encontraram na camada superficial (0,0 - 0,05 m) de um Latossolo Vermelho escuro, densidade maior no solo manejado com sistema plantio direto do que com sistema de preparo convencional, contudo, na camada de 0,05 - 0,20 m esta situação inverteu-se, o sistema de preparo convencional demonstrou a maior densidade, demonstrando ação da soleira dos implementos na compactação dessa camada, o chamado pé-de-arado. Ainda nesse estudo, o solo manejado com sistema plantio direto demonstrou uma produtividade 25,3 % maior do que o solo cultivado em preparo convencional, porém, não foi suficiente para gerar diferença estatística.

Em Latossolo Vermelho cultivado com sistema plantio direto contínuo e descontínuo no estado de Goiás, Silveira et al. (2008) analisando o comportamento da densidade e da porosidade ao longo do tempo, encontraram que na camada 0,0 - 0,1 m, os maiores valores de densidade foram encontrados nos tratamentos de sistema plantio direto contínuo há 14 anos ($D_s=1,39 \text{ Mg m}^{-3}$), sendo que esta propriedade diminuiu com o aumento da frequência de revolvimento com arado, em que o solo que passou pela aração a cada três anos apresentou $1,36 \text{ Mg m}^{-3}$, contra os $1,33 \text{ Mg m}^{-3}$ do solo arado a cada dois anos e $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$ do solo que sofreu aração anual. Nesta pesquisa ainda, foi encontrado maior valor de densidade no solo cultivado com sistema plantio direto contínuo, que foi diferente dos demais tratamentos, sendo que os pesquisadores atribuíram este comportamento ao efeito do tráfego acumulado. Comportamento similar foi encontrado por Genro Jr et al. (2009) no mesmo tipo de solo manejado com sistema plantio direto no Rio Grande do Sul, onde os pesquisadores encontraram um elevado grau de compactação, manifesto pela densidade do solo acima e volume de macroporos abaixo do limite crítico para a classe textural muito argiloso (REICHERT et al., 2009).

Em São Paulo, Silva et al. (2008) concluíram que após 6 anos de cultivo com sistema plantio direto, o mesmo não conseguiu melhorar a qualidade física de um Latossolo, expressa pela condutividade hidráulica do solo saturado, macroporosidade e conteúdo de matéria orgânica. No Paraná, Tormena et al. (1998) encontraram efeitos da compactação em um Latossolo Vermelho manifestos pela redução da porosidade de aeração, que afetou a disponibilidade de água, sendo que os pesquisadores atribuíram ao efeito do tráfego. Similarmente, a estas constatações, Goedert et al. (2002) concluíram que houve compactação em Latossolo Vermelho manejado com sistema plantio direto no Distrito Federal.

No Brasil há pesquisas apontando para tais efeitos nocivos a estrutura do solo, contudo, poucas pesquisas se detiveram para quantificação e/ou qualificação do efeito ao longo do tempo do uso do sistema plantio direto, desde que seja empregado com os pressupostos básicos de sua condução. Neste sentido, no Rio Grande do Sul, Veiga et al. (2008) encontraram que as alterações da estrutura do solo são reduzidas ao longo do tempo em função da consolidação natural do solo, desde que, não haja aplicação de cargas elevadas, principalmente, cargas menores que a tensão de pré-consolidação. No Paraná, o sistema plantio direto melhorou as condições estruturais de um Latossolo Bruno, evidenciados pelos estudos de Costa

et al. (2003) através da redução da densidade em sub-superfície e pelo aumento da estabilidade de agregados nas camadas mais superficiais do solo.

O objetivo desse estudo foi avaliar efeito do sistema de plantio direto ao longo do tempo nas propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho, analisando se o uso contínuo desse sistema de manejo gera melhorias a estrutura do solo.

5.2. Material e Métodos

5.2.1. Característica da área experimental e tratamentos

O trabalho foi realizado utilizando-se amostras de solo coletadas no dia 15 de dezembro de 2006, em área experimental pertencente à EMBRAPA Trigo, no município de Coxilha, próximo à cidade de Passo Fundo (28°10'00"S, 52°22'00"O, altitude aproximada de 686m). O solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico (EMBRAPA, 2006).

O local é caracterizado pela ocorrência de precipitação pluvial mínima de 60 mm mensais, distribuídos ao longo de todos os meses do ano, sendo que o clima da região enquadra-se na classificação de Köppen nas zonas Cfa e Cfb (MORENO, 1981). Ressalta-se que os solos dessa região apresentam expressiva propensão à degradação estrutural em decorrência da elevada frequência com que os solos apresentam umidade acima do ponto de friabilidade no período de estabelecimento das culturas.

O experimento foi implantado em maio de 2001, tendo o tráfego controlado, ou seja, o maquinário utilizado para as tarefas agrícolas percorria sempre o mesmo trajeto. Assim, as parcelas possuíam regiões com tráfego e regiões sem tráfego, conforme podemos visualizar na Figura 2. Para controlar o tráfego foram utilizadas barras delimitadoras horizontais na frente do trator para guiá-lo de tal forma que a ponta ficasse margeando a parcela (12 x 12 m).

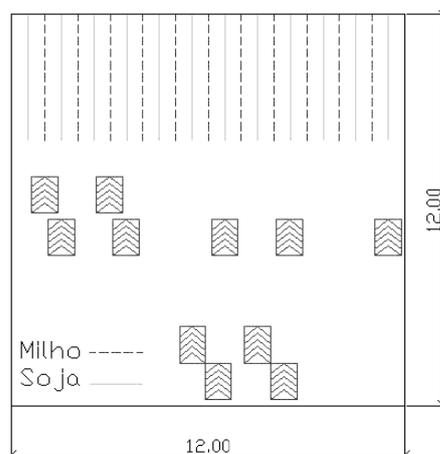


Figura 1 -Regiões de tráfego: metade do bloco é semeado com disco desconcentrado e a outra com facão como mecanismos sulcadores de hastes.

Metade da parcela foi semeada utilizando como mecanismo sulcador da semeadora tipo disco defasado, e a outra metade com sulcador tipo facão canadense. Para este estudo as coletas foram realizadas na parte que empregou o sulcador disco defasado.

Os tratamentos foram distribuídos em blocos ao acaso em esquema bifatorial 5x2, possuindo cinco diferentes tempos de implantação do sistema plantio direto e dois níveis de tráfego, totalizando 10 tratamentos. Na Figura 2a pode-se observar o experimento, bem como na Figura 2b a quantidade de palhada sobre a superfície.

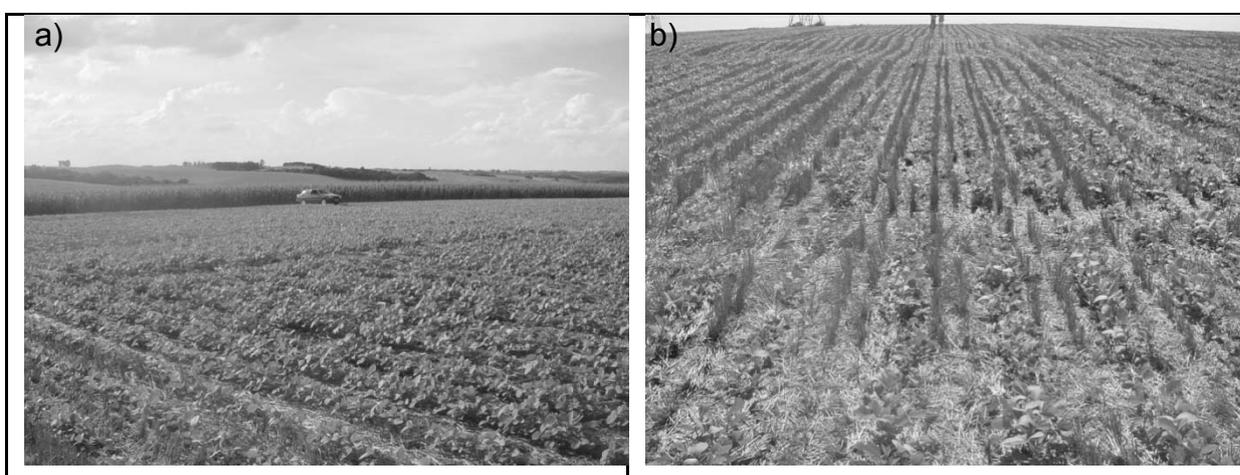


Figura 2 - Área experimental, a) declividade do local; b) palhada sobre a superfície.

Os tempos de implantação do sistema plantio direto usados foram: SD0 – sistema plantio direto há 0 anos (2 meses); SD2 – sistema plantio direto há 2 anos; SD4 – sistema plantio direto há 4 anos; SD5.5 – sistema plantio direto há 5.5 anos e SD14 – sistema plantio direto há 14 anos. Os níveis de tráfego são sem e com tráfego, sendo que o sistema plantio direto há 14 anos tem o tráfego controlado desde 2001. As culturas

Para semeadura de verão foi utilizado um espaçamento entre linhas de 200mm e, 500mm para cultura de inverno. A rotação de culturas foi realizada conforme descrição sequencial da tabela a seguir (Tabela 1):

Tabela 1 – Rotação de culturas empregada no experimento

Ano agrícola	Cultura	
	Inverno	Verão
2001/2002	Trigo	Soja
2002/2003	Ervilhaca	Milho
2003/2004	Aveia branca	Soja
2004/2005	Trigo	Soja
2005/2006	Nabo	Milho
2006/2007	Aveia Branca	Soja

A área experimental encontrava-se sob sistema plantio direto desde 1992 e desde o ano de 2001 o tráfego começou a ser controlado em toda área experimental.

Em cada parcela foi aberta uma trincheira na entrelinha de cultivo (Figura 3a) para a coleta das amostras de solo com estrutura deformada para avaliação da granulometria, carbono orgânico, e amostras com estrutura preservada para os testes de condutividade hidráulica do solo saturado, de condutividade ao ar, porosidade, densidade do solo, compressibilidade e curva de retenção de água no solo. As amostras foram coletadas em três camadas do solo: 0,0 – 0,06 m, 0,07 – 0,14 m e 0,15 – 0,22 m. A seguir está descrita a metodologia utilizada nas análises.

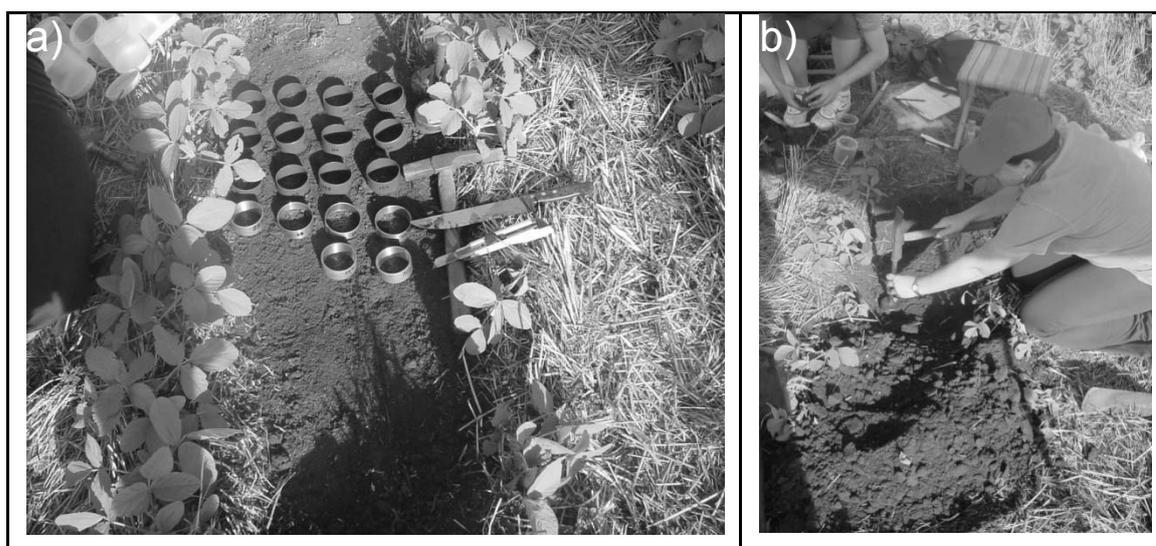


Figura 3 -a) cilindros utilizados na coleta de solos na área experimental; b) coleta à campo das amostras de solo.

Em cada camada foram coletadas três amostras por determinação a ser realizada e por tratamento, sendo que esta coleta foi realizada em cilindros de aço inoxidável cujas dimensões serão descritas a seguir.

Para a escolha das camadas a serem estudadas abriu-se uma trincheira a campo e, de forma visual, buscou-se uma primeira camada onde há atuação do sulcador da semeadora, a segunda em função da camada de maior concentração do tráfego (Figura 4), e a terceira vem a ser a camada posterior à compactada.

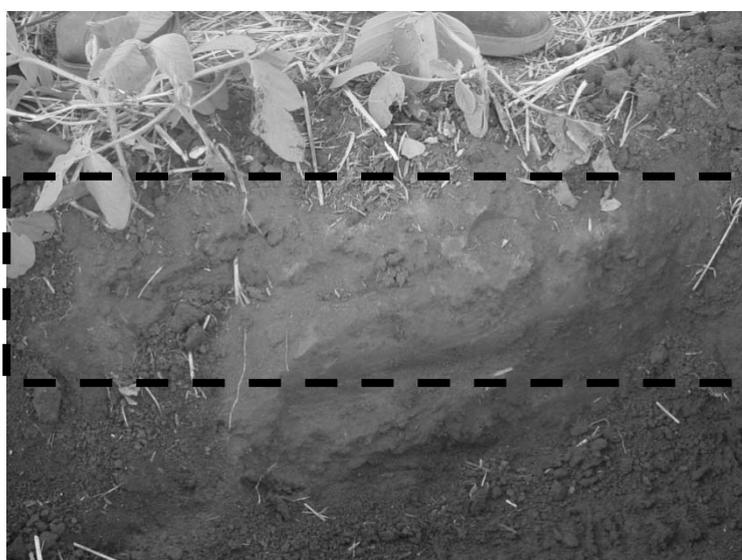


Figura 4 - Perfil do Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto. (caixa demarcada na figura demonstra a camada compactada pelo tráfego de máquinas)

5.2.2. Carbono Orgânico

Para a determinação do teor de carbono orgânico (C) foi utilizado o método de combustão de Walkey-Black, descrito por Tedesco et al. (1995), no qual o C orgânico é oxidado a CO_2 pelo ácido crômico produzido pela reação entre $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (dicromato de potássio) e H_2SO_4 (ácido sulfúrico) – $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 3\text{C}^0 + 16\text{H}^+ \Rightarrow 4\text{Cr}^{3+} + 3\text{CO}_2 + 8\text{H}_2\text{O}$, que são adicionados ao solo. Foram utilizado 0,5 g de solo de cada amostra passada na peneira de malha de 2,00 mm, sendo que o C foi calculado através da expressão descrita abaixo (1):

$$C = \frac{(meK_2Cr_2O_7 - meFeSO_4)}{M_{ss}} \times 0,4 \times 10 \quad (1)$$

onde:

C = teor de carbono orgânico (g kg⁻¹);

meK₂Cr₂O₇ = miliequivalente de K₂Cr₂O₇ adicionados à amostra: me = volume (mL) x normalidade;

meFeSO₄ = miliequivalente de FeSO₄ gastos na titulação da amostra;

M_{ss} = massa de solo seco (0,5 g).

5.2.3. Análise granulométrica do solo

Com a amostra de solo de estrutura alterada procedeu-se a análise granulométrica seguindo o método da pipeta (EMBRAPA, 1997). A dispersão foi realizada com auxílio de um agitador horizontal (120 rpm) de solo com dispersante químico NaOH 6 % (10 mL) durante 4 h. Tal conteúdo encontrava-se em *snap cap* de 100 mL, o qual foi completado com 50 mL de água destilada e duas esferas de nylon de massa individual de 3,04 g, diâmetro 17,1 mm e densidade de 1,11 Mg m⁻³ (SUZUKI et al., 2004). As esferas têm a função de auxiliar na dispersão da fração argila na amostra de solo.

Tabela 2 – Granulometria de um Latossolo Vermelho sob plantio direto ao longo das camadas 0,00 - 0,06 m, 0,07 - 0,14 m e 0,15 - 0,22 m.

Camada (m)	Argila	Silte g kg ⁻¹	Areia
SD0 ¹			
0,00 - 0,06	436	247	317
0,07 - 0,14	430	255	315
0,15 - 0,22	430	259	311
SD2 ²			
0,00 - 0,06	447	249	304
0,07 - 0,14	426	272	302
0,15 - 0,22	444	264	292
SD4 ³			
0,00 - 0,06	422	252	326
0,07 - 0,14	430	248	322
0,15 - 0,22	428	254	319
SD5.5 ⁴			
0,00 - 0,06	432	268	300
0,07 - 0,14	423	279	298
0,15 - 0,22	420	284	297
SD14 ⁵			
0,00 - 0,06	442	256	301
0,07 - 0,14	429	273	298
0,15 - 0,22	444	252	304

¹SD0 – sistema plantio direto há 0 anos; ²SD2 – sistema plantio direto há 2 anos; ³SD4 – sistema plantio direto há 4 anos; ⁴SD5.5 – sistema plantio direto há 5.5 anos e ⁵SD14 – sistema plantio direto há 14 anos;

5.2.4. Curva de retenção de água

A curva foi determinada com amostras de estrutura preservada nas quais foram encaminhadas para mesa de tensão de areia para equilíbrio nos potenciais de -0,001, -0,006 MPa e 0,01. Após, com auxílio da Câmara de Richards, as amostras foram submetidas aos demais pontos (-0,033, -0,1, -0,3, -0,5 e -1,5 MPa) (KLUTE, 1986). Com os valores da umidade volumétrica do solo e a tensão matricial, ajustou-se a equação (2) de van Genuchten (van GENUCHTEN, 1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \Psi_m)^n]^m} \quad (2)$$

onde:

θ = umidade volumétrica, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

θ_r = umidade volumétrica na tensão de 1500 KPa, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

θ_s = umidade volumétrica do solo saturado, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

Ψ_m = potencial mátrico da água no solo, em kPa;

α , m , n = parâmetros empíricos de ajuste da equação de van Genuchten .

Após aplicar cada tensão, as amostras foram pesadas e, em seguida, submetidas sucessivamente a tensão superior, quando finalmente as amostras foram, então, colocadas em estufa para obtenção da massa seca da amostra.

Com os valores da umidade volumétrica do solo e a tensão matricial, ajustou-se a equação de van Genuchten (van GENUCHTEN, 1980).

5.2.5. Condutividade ao ar

Para quantificar o efeito do sistema plantio direto ao longo do tempo no espaço poroso do solo, coletaram-se amostras para a determinação da condutividade do solo ao ar, com o auxílio do aparelho específico chamado de aparato K_1 , o qual é mostrado nas Figuras 5. As amostras foram coletadas em cilindros de 5,8 cm de diâmetro e 3,0 cm de altura. As amostras utilizadas foram às mesmas empregadas na determinação da curva de retenção de água no solo, tendo sido feita a medição da condutividade ao ar em cada amostra sempre que a mesma chegava ao equilíbrio da tensão matricial aplicada no teste da curva de retenção de água do solo descritas anteriormente.

Com a amostra no aparelho, só então a válvula de ar é aberta. A pressão de entrada de ar deve ser igual a 1 cm de coluna de água, onde a leitura é feita por tentativa, abrindo primeiramente a válvula de menor pressão de ar e, assim sucessivamente, até que a pressão estabilize-se em 1 cm de coluna d'água, quando a leitura é efetuada (VOSSBRINK, 2004 apud STRECK, 2007).

. A condutividade ao ar foi calculada pela equação (3):

$$K_a = \rho_l \times g \times \frac{\Delta V \times l}{\Delta t \times \Delta p \times A} \quad (3)$$

onde:

K_a = condutividade ao ar, em μm^2 ;

ρ_l = densidade do ar, em kg m^{-3} ;

g = força da gravidade ($9,81\text{m s}^{-2}$);

ΔV = volume de ar que passa pela amostra durante o tempo Δt , em m^3 ;

Δt = intervalo de tempo, em min;

l = comprimento da amostra de solo, em m;

Δp = pressão do ar aplicada, em hPa;

A = área da amostra, em m^2 .

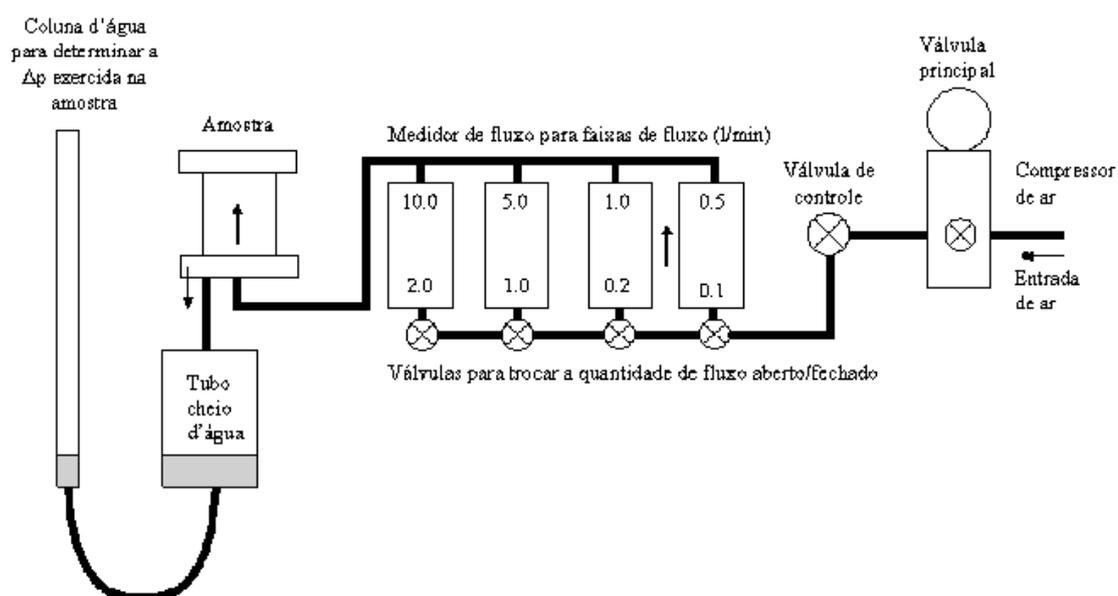


Figura 5 - Aparelho para medir a condutividade ao ar do solo em amostras com estrutura preservada.

5.2.6. Condutividade hidráulica de solo saturado

Avaliou-se a condutividade hidráulica em solo saturado (K_e) em laboratório, utilizando, amostras com estrutura preservada, coletadas em cilindros de 5,8 cm de diâmetro por 3 cm de altura, em três camadas de solo (usaram-se as mesmas amostras utilizadas para a determinação da curva de retenção de água no solo e a condutividade ao ar). Essas amostras foram saturadas em água durante 24 horas. A

K_{θ} foi determinada por meio de um permeâmetro de carga decrescente, o qual foi conectado ao topo da amostra conforme descrito em Hartge & Horn (1992).

A condutividade hidráulica saturada (K_{θ}) foi determinada de acordo com uma adaptação da equação de Darcy (4) a seguir:

$$K_{\theta} = \frac{aL}{A(\Delta t)} \ln\left(\frac{H_1}{H_2}\right) \quad (4)$$

Onde:

$\Delta t = t_2 - t_1$; é o intervalo de tempo para a diferença potencial total entre os extremos da amostra diminuir de H_1 (altura 1) para H_2 (altura 2), em h;

A = área da seção transversal da coluna de solo, em cm^2 ;

L = comprimento da amostra de solo, em cm;

a = diâmetro do tubo capilar utilizado, em cm.

5.2.7. Porosidade e densidade

Para as determinações de macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo foram utilizadas as mesmas amostras de solo coletadas nos cilindros empregados na determinação da condutividade hidráulica em solo saturado, condutividade ao ar e curva de retenção de água no solo. O método utilizado foi o da mesa de tensão segundo EMBRAPA (1997).

A densidade do solo (D_s) representa a relação entre a massa de solo seco em estufa (105-110°C) e o volume total do solo, ou seja, o volume das partículas mais o volume dos poros.

5.2.8. Análise estatística

A análise estatística foi feita pelo teste F e comparação de médias pelo teste de Tukey com 5% de significância através do programa computacional ESTAT (1992).

5.3. Resultados e discussão

5.3.1. Retenção de água em Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto ao longo do tempo

As curvas de retenção de água ao longo das camadas do Latossolo Vermelho encontram-se na Figura 6. Observa-se que na camada superficial (0,0 – 0,06 m) do solo não trafegado (Figura 6a), que nas situações de maior nível de saturação, os solos que perdem água mais rapidamente são os manejados com sistema plantio direto há menos tempo, SD0 ST, cerca de 2 meses, e o SD5.5 ST. Isso ocorre ao inverso no solo a 14 anos manejados com SD, conforme demonstrado no solo SD14 ST, ou seja, há uma drenagem mais lenta inicialmente.

A maior retenção de água no tratamento SD14 ST pode estar relacionada à manutenção da estrutura do solo devido à ausência de revolvimento, expresso pela maior microporosidade e um dos maior teores de carbono orgânico dentre os demais tratamentos, conforme pode ser verificado nos dados dessas propriedades na Tabela 3 (Pg. 48), sendo que tais propriedades foram as mais expressivas no SD14 ST do que os demais tratamentos. Esta afirmação está em consonância com os estudos de Beutler et al. (2002) e Costa et al. (2003). No estudo realizado por Costa et al. (2003) as boas melhorias estruturais do Latossolo Bruno, provem do maior nível de teor de água na camada de 0,0 - 0,1 m durante todo o período de desenvolvimento da cultura da soja. Segundo esses, o sistema favoreceu a maior infiltração de água, e menor evaporação, função da cobertura sobre a superfície.

No geral, ao longo de todas as camadas de solo, independentemente do tráfego, o solo sob sistema plantio direto há 14 anos (SD14 ST) foi o que mais reteve água nas tensões de 6 e 10 kPa, embora a umidade de saturação não tenha sido a maior.

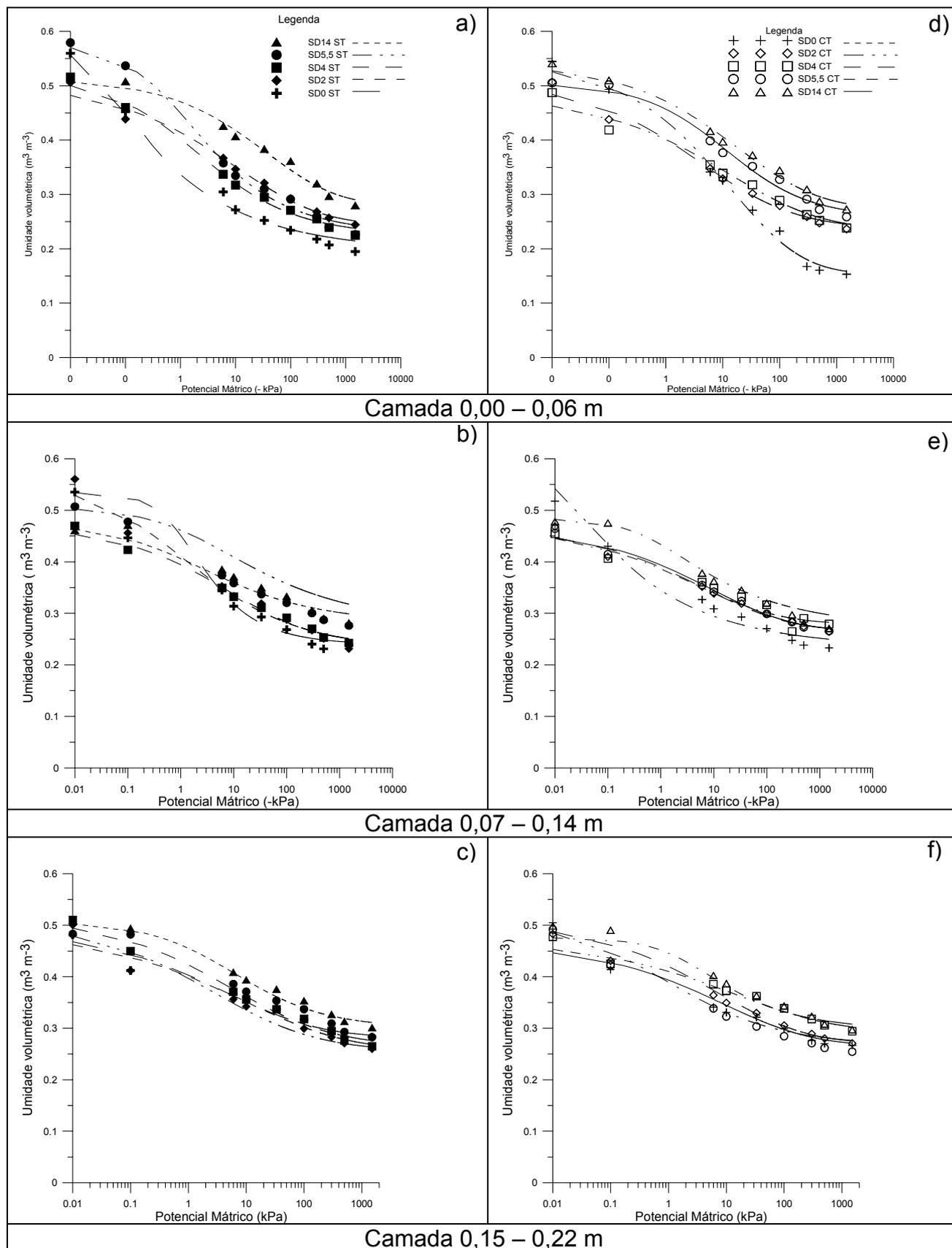


Figura 6 - Curva de retenção de água do Latossolo Vermelho sob diferentes tempos de implantação do plantio direto ao longo das camadas em estudo. (SD0 – sistema plantio direto há 0 anos; SD2 – sistema plantio direto há 2 anos; SD4 – sistema plantio direto há 4 anos; SD5.5 – sistema plantio direto há 5.5 anos e SD14 – sistema plantio direto há 14 anos; índice “ST” é sem tráfego (a,b,c) e “CT” é com tráfego (d,e,f)

Constatações semelhantes a este estudo foram encontradas por Silva et al. (2008), onde o Latossolo Vermelho cultivado há mais tempo (6 anos), demonstrou maior retenção de água do que os solos manejados a 4 e dois anos, sendo que isto também ocorreu ao longo de todas as camadas.

Ao analisar as áreas sem tráfego (Figuras 6 a, b e c) pode ser constatado que na camada superficial a umidade de saturação variou de $0,51 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no SD14 ST e SD2 ST, $0,58 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no SD5.5 ST. O tratamento SD5.5 ST é o que mais retém água na tensão matricial 0 kPa, seguido do SD0 ST, porém, em ambos há uma queda rápida do conteúdo de água na medida em que há aumento da tensão aplicada, o que pode ser explicado, como ocorrido no solo sem ação do tráfego, por sua elevada microporosidade (Tabela 3, Pg. 48).

Na camada de 0,07 – 0,14 m (Figura 6 e), o SD0 CT apresentou a maior umidade de saturação, seguido do SD14 CT, porém, o SD 0 CT drena a água muito rapidamente, o que pode ser observado na tensão 0,1 kPa, na qual é verificado que os tratamentos SD5.5 CT, SD4 CT, SD 2 CT apresentam a maior retenção de água ao longo do processo de secagem do solo. Continuando esse processo, visualiza-se que a partir da tensão de 6 kPa, o SD14 CT passa a ser o solo com maior retenção dentre os tratamentos, demonstrando novamente nessa camada os benefícios do sistema plantio direto à estrutura física do solo. Esse mesmo comportamento é observado na camada 0,15 – 0,22 m. Esse comportamento é explicado pela maior macroporosidade nas duas camadas dos solos manejados com SD0 CT e SD2 CT, o que lhes proporcionam uma drenagem rápida, conforme demonstrado nas curvas de retenção de água. Efeito da macroporosidade na curva de retenção de água é comumente relatado na bibliografia brasileira. Neste sentido, citam-se os estudos realizados em Argissolo Vermelho por Abreu et al. (2004), que encontraram uma menor retenção de água no solo manejado sob sistema plantio direto do que cultivo mínimo com crotalaria e solo descoberto sem preparo. Isso foi função, segundo os pesquisadores, da maior macroporosidade advinda da ação radicular da cultura da soja, que também favoreceu a maior condutividade hidráulica do solo saturado.

Na camada superficial dos tratamentos trafegados (Figura 6 d, e, f) observa-se que o tratamento SD0 CT apresenta a maior umidade de saturação juntamente com o SD14 CT, contudo, o solo SD0 CT, novamente, drena a água rapidamente, sendo que na tensão 6 kPa, esse solo é o que menos retém água. Isso se repete em

tensões maiores, devido à maior macroporosidade e menor microporosidade (Tabela 3, Pg. 48).

Os solos manejados com SD14 CT e SD5.5 CT apresentam maior retenção de água nas tensões 0,1, 6 e 10 kPa, o que pode ser explicado pelo maior teor de carbono orgânico (Tabela 3, Pg. 48), fato também ocorrido no solo sem ação de tráfego. A maior retenção de água está associada à diminuição da macroporosidade em solos compactados pelo uso agrícola, que segundo Bertol & Santos (1995) isto resulta em muitas vezes, no condicionamento do aumento da microporosidade.

Ao longo das camadas observa-se uma tendência de maior retenção no solo trafegado, isto pode ser resultado das alterações do espaço poroso do solo pelo tráfego. Nesse contexto, Streck et al. (2004) verificaram que aplicação de tráfego sobre o solo aumentou a densidade e a resistência do solo à penetração, repercutindo em reduções da porosidade total e da macroporosidade, contudo, não afetou a microporosidade.

Na camada de 0,15 – 0,22 m todos os tratamentos apresentam a umidade de saturação muito próximas, sendo que o SD0 CT continua sendo o tratamento que drena água mais rapidamente, enquanto os sistemas SD14 CT e SD4 CT apresentam maior retenção de água com o aumento da tensão.

De acordo com o exposto acima, evidencia-se que o aumento do tempo de implantação do sistema plantio direto gerou uma maior retenção de água no solo. Isso é independente do tráfego sendo passível de ocorrência ao longo dos 0,22 m de profundidade, evidenciando assim, para uma possível compactação do solo devido à acomodação natural das partículas sólidas. Essa acomodação foi abordada pelos estudos executados por Veiga et al. (2008) e Souza et al. (2005).

5.3.2. Condutividade ao ar do solo ao longo do tempo sob sistema plantio direto

A relação entre a condutividade do solo ao ar e a tensão matricial de água no solo está apresentada na Figura 7. Todas as curvas apresentaram comportamento similar, demonstrando um incremento da condutividade do solo ao ar com o aumento da tensão de água do solo.

A condutividade do solo ao ar (K_a) apresentou elevada variabilidade de dados em todos os manejos do solo e em todas as camadas. O maior incremento da K_a ocorreu nas maiores tensões, quando ocorre a drenagem dos poros maiores, confirmando a relevância dos macroporos na condutividade ao ar. Aumentando a tensão para 33 kPa e, posteriormente, para 100 kPa, a seqüência lógica de esvaziamento dos poros que permitiram a passagem do ar e, o aumento da K_a , se manteve, mas com menor variação.

Na área sem tráfego observa-se que nas camadas 0,0 – 0,06 m e 0,07 – 0,14 m o SD0 ST apresentou a maior K_a em todas as tensões. Isso pode ser explicado pela retenção de água, pois, observa-se que o SD0 ST apresentou uma das maiores umidade de saturação (Figura 6) e a água é drenada rapidamente com o aumento da tensão aplicada, restando uma grande quantidade de poros vazios, o que facilita a passagem do ar. Tal fato é atribuído à ação de revolvimento na aração, a qual ocorreu cerca de 2 meses anterior a coleta das amostras, propiciando o aumento da macroporosidade na camada superficial do solo, constatação concordante com Silva et al. (2005).

A maior condutividade apresentada pelo SD0 ST e SD0 CT pode ser prejudicial ao desenvolvimento da planta, pois este solo ao longo das camadas estudadas apresentou baixa retenção de água, que acompanhado da alta condutividade apresentada na Figura 7 ao longo do processo de secagem do solo irá resultar em baixa disponibilidade de água para as raízes. Tormena et al. (1998) atribuíram em seus estudos que aração do solo gera menor disponibilidade de água no solo em função das alterações ocorridas na porosidade de aeração do solo, onde há os poros responsável pela entrada de água do solo.

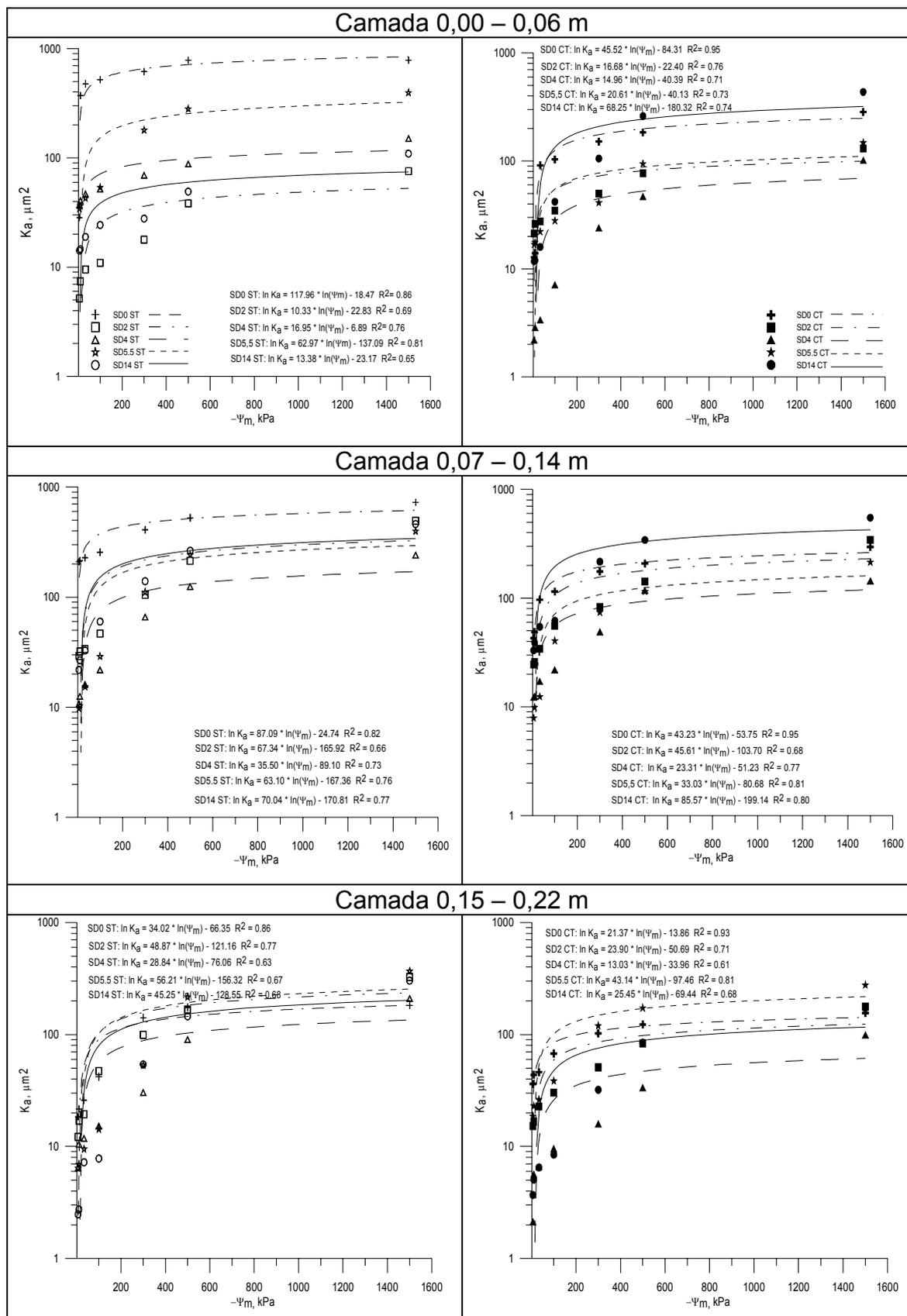


Figura 7 - Relação entre a condutividade do solo ao ar (K_a) e a tensão matricial (Ψ_m) do Latossolo Vermelho com diferentes tempos de implantação do sistema plantio direto. (SD0 – sistema plantio direto há 0 anos; SD2 – sistema plantio direto há 2 anos; SD4 – sistema plantio direto há 4 anos; SD5.5 – sistema plantio direto há 5.5 anos e SD14 – sistema plantio direto há 14 anos; índice “ST” é sem tráfego (a,b,c) e “CT” é com tráfego (d,e,f))

Na área trafegada, os tratamentos SD0 CT e SD14 CT apresentaram a maior K_a seguidos dos sistemas SD2 CT, SD5.5 CT e SD4 CT nas camadas 0,00 – 0,06 m e 0,07 – 0,14 m, com menor variação das curvas na segunda camada. Isso pode ser explicado pela maior macroporosidade no SD0 CT nas três camadas e pelo elevado teor de carbono orgânico no SD14 CT na primeira camada e elevada microporosidade na segunda camada.

5.3.3. Condutividade hidráulica em solo saturado, porosidade, densidade e carbono orgânico

Ao observarmos os diferentes tempos de adoção do sistema plantio direto, percebe-se que na camada superficial o sistema há zero anos (SD0) o qual apresenta revolvimento do solo recente, apresenta a maior K_e , o que pode ser explicado pelo fato de que com a mobilização do solo, inicialmente, há a predominância de macroporos o que facilita a infiltração e redistribuição de água no solo, essa constatação é concordante a Silva et al. (2005b). Fato que é alterado, ou seja, com a implantação do sistema plantio direto essa condição muda, diminuindo a quantidade de macroporos o que ocasionou um decréscimo acentuado na K_e com a implantação do sistema (Tabela 3).

O tráfego controlado de máquinas foi significativo sobre a densidade do solo e o teor de carbono orgânico, na camada superficial, sendo que as áreas sob tráfego apresentaram maior densidade e menor teor de carbono orgânico enquanto que a interação manejo x tráfego foi significativa apenas sobre o teor de carbono orgânico. O solo sob SD5.5 apresentou o maior teor de carbono com relação aos tratamentos.

Tabela 3 – Porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), densidade do solo (Ds), carbono orgânico (Co) e condutividade hidráulica em solo saturado (K_θ) médios na camada 0,00 – 0,06 m.

Manejo	Pt	Ma	Mi	Ds	Co	K _θ
	-----%-----			(Mg m ⁻³)	%	(mm h ⁻¹)
Camada 0,00 – 0,06 m						
SD0	69,17 a	35,98 a	33,19 c	1,17 ns	1,98 b	469,82 a
SD2	51,74 b	16,00 b	35,74 bc	1,32	1,72 c	77,52 b
SD4	52,56 b	18,46 b	34,10 bc	1,23	1,74 c	137,5 b
SD5.5	54,56 b	17,52 b	37,04 b	1,24	2,24 a	135,33 b
SD14	53,85 b	11,97 b	41,88 a	1,27	2,13 ab	71,99 b
Tráfego						
Sem	57,00 ns	21,29 ns	35,08 ns	1,20 b	2,03 a	192,98 ns
Com	55,76	18,67	35,70	1,29 a	1,89 b	163,89
Teste F						
Manejo (M)	**	**	**	ns	**	**
Tráfego (T)	ns	ns	ns	**	**	ns
M x T	ns	ns	ns	ns	*	ns
DP	4,69	5,30	2,13	6,82	0,07	97,89
CV (%)	8,34	26,53	0,09	6,82	3,63	54,86

Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% () ou 1% (**) de probabilidade. SD0 – sistema plantio direto há 0 anos (2 meses); SD2 – sistema plantio direto há 2 anos; SD4 – sistema plantio direto há 4 anos; SD5.5 – sistema plantio direto há 5,5 anos e SD14 – sistema plantio direto há 14 anos; DP – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; ns – não significativo.

A microporosidade e a macroporosidade foram alteradas ao longo do tempo de uso do sistema plantio direto, em que houve um aumento inicial da macroporosidade e redução da microporosidade chegando à 14 anos a uma condição inversa, ou seja, redução da macro e aumento da microporosidade, explicando a maior retenção de água demonstrada na curva de retenção de água na Figura 6.

Na camada intermediária, de 0,06 - 0,14 m, (Tabela 4) também podem ser observados maior valor de condutividade hidráulica em solo saturado no sistema SD0, o mesmo também não diferiu dos sistemas em uso há dois anos (SD2) e há quatorze anos (SD14), demonstrando efeito do revolvimento do solo no SD0 e ação da agregação física no SD14, em função do elevado tempo sem revolvimento.

Nessa camada observa-se ainda, que o manejo apresentou diferenças significativas em todos os parâmetros observados. O sistema SD0 apresentou às maiores Pt, Ma e K θ e a menor Ds em comparação aos sistemas SD4 e SD5.5. Observa-se que com o aumento do tempo de implantação do sistema a Ds vai aumentando até atingir a estabilidade por volta dos 4 a 5 anos, porém 14 anos após a implantação do sistema, a mesma decresceu, apontando para uma melhoria nessa condição devido principalmente a descompactação biológica do solo, ou seja, ação do sistema radicular das culturas. O uso contínuo do sistema plantio direto gerou redução da densidade do solo, sendo que a origem desse benefício deve estar relacionado à melhoria da agregação, maior teor de carbono orgânico e maior continuidade e estabilidade de poros, como ressaltado por Stone et al. (2002) e Oliveira et al. (2004).

Tabela 4 – Porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), densidade do solo (Ds), carbono orgânico (Co) e condutividade hidráulica em solo saturado (K θ) médios na camada 0,07 – 0,14 m.

Manejo	Pt	Ma	Mi	Ds	Co	K θ
	-----%-----			(Mg m ⁻³)	%	(mm h ⁻¹)
Camada 0,06 – 0,14 m						
SD0	60,08 a	26,87 a	33,21 b	1,27 b	1,63 bc	328,83 a
SD2	51,43 b	16,21 b	35,23 ab	1,34 ab	1,84 a	162,44 ab
SD4	46,83 c	11,35 c	35,49 a	1,41 a	1,77 ab	79,91 b
SD5.5	48,57 b	12,15 bc	36,42 a	1,41 a	1,58 c	50,05 b
SD14	47,96 bc	10,65 c	37,32 a	1,36 ab	1,63 bc	153,90 ab
Tráfego						
Sem	53,43 a	17,61 a	35,82	1,34	1,75 a	187,35
Com	48,52 b	13,27 b	35,24	1,38	1,63 b	114,17
Teste F						
Manejo (M)	**	**	**	*	**	*
Tráfego (T)	**	**	ns	ns	**	ns
M x T	**	*	ns	ns	*	ns
DP	2,31	2,67	1,24	0,08	0,08	135,97
CV (%)	4,53	17,32	3,49	5,60	4,59	90,19

Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% () ou 1% (**) de probabilidade. SD0 – sistema plantio direto há 0 anos (2 meses); SD2 – sistema plantio direto há 2 anos; SD4 – sistema plantio direto há 4 anos; SD5.5 – sistema plantio direto há 5,5 anos e SD14 – sistema plantio direto há 14 anos; DP – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; ns – não significativo.

Até os 0,14m de solo percebe-se um comportamento do teor de carbono orgânico, há um decréscimo e após um aumento, sendo que na primeira camada esse aumento começa no 5º ano, já na segunda camada começa no segundo ano. Isso é devido principalmente ao grande aporte de resíduos favorecendo o acúmulo de Co fato também constatado por Lal (2004) e Costa et al. (2008), onde no sistema plantio direto manejado com a rotação de culturas de alta adição de resíduos vegetais ricos em C e N resultou num balanço positivo de C no solo. O teor elevado de Co no SD0 pode ser explicado pelo fato de que anteriormente a área estava sob sistema plantio direto há 14 anos, como o revolvimento ocorreu a cerca de 2 meses os restos culturais deixados em superfície ainda não foram mineralizados.

O efeito do revolvimento do solo também foi observado na camada de 0,15 – 0,22 m onde o SD0 apresentou à maior K_e enquanto o SD14 apresentou à menor K_e .

Nota-se que o tempo de implantação do sistema não afetou o teor de carbono na camada de 0,15 - 0,22 m (Tabela 5),

Tabela 5 – Porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), densidade do solo (Ds), carbono orgânico (Co) e condutividade hidráulica em solo saturado (K_θ) médios na camada 0,15 – 0,22 m.

Manejo*	Pt		Ma		Mi		Ds		Co		K _θ	
	-----%----- (Mg m ⁻³) % (mm h ⁻¹)											
Camada 0,15 – 0,22 m												
SD0	50,30	ns	14,83	a	35,47	c	1,45	ns	1,60	ns	106,26	a
SD2	50,12		13,94	a	36,18	bc	1,35		1,54		49,49	b
SD4	49,32		11,79	ab	37,54	b	1,39		1,66		25,85	bc
SD5.5	49,21		12,65	ab	36,57	bc	1,38		1,50		47,76	bc
SD14	49,21		9,27	b	39,94	a	1,39		1,51		10,96	c
Tráfego												
Sem	49,77	ns	12,08	a	37,69	a	1,40	ns	1,62	a	38,97	b
Com	49,50		12,91	a	36,58	b	1,38		1,50	b	57,15	a
Teste F												
Manejo (M)	ns		*		**		ns		ns		**	
Tráfego (T)	ns		ns		*		ns		**		*	
M x T	ns		*		*		*		ns		*	
DP	2,75		2,67		1,12		0,07		0,08		21,33	
CV (%)	5,55		21,35		3,02		4,84		5,23		44,38	

Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% () ou 1% (**) de probabilidade. SD0 – sistema plantio direto há 0 anos (2 meses); SD2 – sistema plantio direto há 2 anos; SD4 – sistema plantio direto há 4 anos; SD5.5 – sistema plantio direto há 5,5 anos e SD14 – sistema plantio direto há 14 anos; DP – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; ns – não significativo.

Comparando os sistemas sem e com tráfego dentro de um mesmo sistema de manejo os sistemas SD2, SD4 e SD5.5 apresentaram maior teor de carbono orgânico nas áreas sem tráfego com relação às áreas trafegadas.

Em função da interação existente entre o manejo e o tráfego em algumas propriedades físicas ao longo das camadas em estudo, montou-se a tabela 6 que separa o manejo e o tráfego. Esta interação foi significativa na porosidade total, macroporosidade e carbono orgânico sendo que os tratamentos sem tráfego apresentaram os maiores valores. Comparando-se os diferentes sistemas, a porosidade total no SD0 apresentou os valores maiores. Comparando-se áreas sem e com tráfego os sistemas SD0, SD2 e SD5.5 apresentaram maior Pt nas áreas sem tráfego. As alterações na armazenagem de água são esperadas quando a aplicação de tráfego ao solo proporciona aumento da densidade do solo, e redução da

porosidade total e da macroporosidade (STRECK et al., 2004; TORMENA; ROLOFF, 1998).

Tabela 6 – Interação entre manejo x tráfego, quanto a carbono orgânico (Co), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), densidade do solo (Ds) e condutividade hidráulica em solo saturado (K θ) nas três camadas de solo.

		SD0	SD2	SD4	SD5.5	SD14
Camada 0,0 – 0,06 m						
Co	Sem T	1,92 a BC	1,87 a C	1,86 a C	2,33 a A	2,16 a AB
	Com T	2,05 a A	1,57 b B	1,61 b B	2,14 b A	2,10 a A
Camada 0,07 – 0,14 m						
Pt (%)	Sem T	65,97 a A	56,05 a B	46,96 a C	50,71 a BC	47,48 a C
	Com T	54,19 b A	46,82 b B	46,71 a B	46,43 b B	48,44 a B
Ma (%)	Sem T	31,52 a A	20,80 a B	12,04 a C	13,33 a C	10,38 a C
	Com T	22,22 b A	11,62 b B	10,65 a B	10,96 a B	10,92 a B
Co (%)	Sem T	1,65 a BC	1,99 a A	1,90 a AB	1,64 a BC	1,60 a C
	Com T	1,61 a A	1,69 b A	1,65 b A	1,52 a A	1,66 a A
Camada 0,15 – 0,22 m						
Ma (%)	Sem T	13,02 a	13,00 b	14,35 a	9,63 a	10,39 a
	Com T	16,64 a A	14,89 a AB	9,22 b BC	15,66 a AB	8,16 a C
Mi (%)	Sem T	36,34 a B	36,15 B	37,23 a B	38,30 a AB	40,43 a A
	Com T	34,60 a C	36,21 BC	37,84 a AB	34,83 b C	39,44 a A
Ds (Mg m ⁻³)	Sem T	1,46 a	1,41 a	1,32 b	1,44 a	1,39 a
	Com T	1,45 a	1,29 b	1,45 a	1,32 b	1,40 a
K θ (mm h ⁻¹)	Sem T	70,45 b A	45,34 a AB	37,10 a AB	32,26 a AB	9,72 a B
	Com T	142,06 a A	53,64 a B	14,61 a B	63,26 a B	12,21 a B

Médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem quanto ao manejo, médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferiram quanto ao tráfego, estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% () ou 1% (**) de probabilidade. SD0 – sistema plantio direto há 0 anos (2 meses); SD2 – sistema plantio direto há 2 anos; SD4 – sistema plantio direto há 4 anos; SD5.5 – sistema plantio direto há 5,5 anos e SD14 – sistema plantio direto há 14 anos; DP – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; ns – não significativo.

A macroporosidade foi maior no SD0 que nos demais sistemas sendo que o SD2 também diferiu dos restantes com valor superior. Já na área trafegada o SD0 foi maior que todos os demais. Esse efeito é devido a o revolvimento, o qual aumenta inicialmente a porosidade total e principalmente a macroporosidade, com diminuição dos mesmos com o passar do tempo. Estudos apontam para maior nível de compactação originado pelo re-arranjo das partículas e alterações na estrutura do solo devido ao efeito acumulativo do tráfego de máquinas e

acomodação natural das partículas ocorridas com uso do sistema plantio direto (KLEIN; BOLLER, 1995).

Comparando-se áreas trafegadas e não trafegadas, o SD0 e SD2 apresentaram maior macroporosidade em áreas não trafegadas, nos demais sistemas não foi observada diferença.

Quanto ao carbono orgânico nas áreas sem tráfego o sistema SD2 foi superior seguido do SD4 sendo que o SD14 foi o tratamento que apresentou o menor teor de carbono orgânico, enquanto que na área trafegada não houve diferença entre os tratamentos. Com relação ao tráfego, os tratamentos que apresentaram maior teor de Co foram os tratamentos SD2 e SD4 com valores superiores em áreas não trafegadas.

Na camada de 0,15 – 0,22 m (Tabela 6), as propriedades Pt, Ds e Co não apresentaram diferença quanto ao manejo. Nos sistemas SD0 e SD2 foram observados os maiores valores de Ma em comparação ao SD14. Quanto a Mi o SD14 apresentou os maiores valores em comparação aos demais tratamentos observados, sendo que o menor valor de Mi foi observado no SD0. Enquanto que a Ke no SD0 apresentou maior valor com relação aos demais, já o SD14 apresentou o menor valor, o que já era esperado devido à maior Ma observada neste sistema. A área sem tráfego apresentou maior Mi e Co e menor Ke com reação a área trafegada. Analisando a interação manejo x tráfego, observa-se que houve interação nos parâmetros Ma, Mi, Ds e Ke.

A Ma na área sem tráfego não apresentou diferenças decorrentes do manejo, enquanto na área trafegada o SD0 apresentou o maior valor em relação ao SD14; comparando-se áreas trafegadas e não trafegadas dentro de um mesmo sistema de manejo o SD2 apresentou maior Ma na área sob tráfego, comportamento inverso ao SD4. Quanto a Mi na área sem tráfego o SD14 não diferiu do SD5.5, sendo superior aos demais tratamentos.

Na área trafegada também o SD14 apresentou maiores valores de Mi não diferindo do SD4 o qual foi superior ao SD0 e SD5.5. O tráfego no solo sob SD5.5 proporcionou a maior Mi na área sem tráfego.

A Ds dentre os sistemas de manejo não apresentou diferença, porém a diferença foi proporcionada pelo tráfego, onde os sistemas SD2 e SD5.5 apresentaram a maior densidade em áreas sem tráfego enquanto o SD4 apresentou maior densidade na área trafegada.

Na área sem tráfego o SD0 apresentou o maior valor de $K\theta$ diferindo somente do SD14, já na área trafegada o SD0 também apresentou o maior valor de $K\theta$ s diferindo de todos os demais tratamentos.

6. CAPÍTULO 2.

COMPACTAÇÃO INDUZIDA E NATURAL EM LATOSSOLO ARGILOSO EM DIFERENTES TEMPOS DE IMPLANTAÇÃO DE SISTEMA PLANTIO DIRETO

6.1. Introdução

O sistema plantio direto foi um dos maiores avanços no meio agrícola, pois possui uma série de vantagens ao solo como melhoria da qualidade de sua estrutura e à redução dos processos erosivos. Contudo, em alguns locais, principalmente na região de clima subtropical úmido do Rio Grande do Sul, em decorrência da intensidade com que as operações agrícolas eram realizadas no sistema de preparo convencional, alterações nocivas à estrutura física na camada superficial do solo não foram sanadas, acreditando-se que o sistema plantio direto seria a solução imediata. Tais alterações são observadas pelo aumento da densidade e da resistência do solo à penetração, e na redução da macroporosidade e porosidade do solo, que repercutem na redução da infiltração de água no solo e na deformação morfológica das raízes das plantas (DENARDIN, 1992; SPERA et al., 2001; SPERA et al., 2003; COLLARES, et al., 2008). Aliado a estes efeitos, têm-se um aumento de tração da semeadora (ROSA et al., 2008) que gera aumento da potência exigida ao trator, que nem sempre tem disponível reserva de torque para vencer estes obstáculos.

A potencialização desses problemas na região surge em razão de que o solo, frequentemente, apresenta teor de água acima do ponto de friabilidade no período de estabelecimento das culturas, onde há o maior tráfego de máquinas agrícolas nesse tipo de manejo. Esse fator é um dos principais contribuintes ao aumento da compactação (HORN; FLEIGE, 2003).

Os problemas gerados por essa compactação pode se estender em cerca de 25,5 milhões de hectares que são manejados com sistema plantio direto (FEBRAPDP, 2009), sendo que este número deve estar maior, visto que são dados de 2006. No Rio Grande do Sul, em torno de 5,3 milhões de hectares de área

cultivada com culturas comerciais em 2008 (IBGE, 2008), onde se acredita que a maioria devia utilizar sistema plantio direto.

O aumento do nível de compactação em solos sob sistema plantio direto é reportado por vários pesquisadores, como Håkansson (2005), Silva et al. (2000a), Silva et al. (2003), Klein & Boller (1995), Håkansson & Medvedev (1995), porém há estudos demonstrando que há uma melhoria da estrutura do solo com o avanço do uso do sistema plantio direto (SILVEIRA et al. 2008; VEIGA et al., 2008; STONE et al., 2002), desde que seja realizada rotação de culturas e levando em consideração o não tráfego e elevado teor de água. Esse aumento da compactação, principalmente pronunciada nas camadas superficiais (0,07 a 0,15 m) (REICHERT et al., 2009), tem levado alguns agricultores a fazer revolvimento do solo utilizando escarificadores (Rosa et al., 2008) ou até a executar mobilizações com aração e gradagens (TORMENA et al., 1998; TORMENA; ROLOFF, 1996). Assim sendo, os estudos científicos devem levar em consideração o efeito do sistema plantio direto ao longo do tempo, onde a caracterização dos efeitos da compactação é necessária para planejar técnicas de minimização e/ou remediação.

Como principal controlador dessa compactação, tem-se o controle da intensidade do tráfego (HÅKANSSON, 2005) e de características da máquina (HORN; FLEIGE, 2003). Segundo Håkansson (2005), é iminente a reconfiguração da máquina ou do seu manejo, para minimizar seu efeito danoso ao solo quando em situações errôneas de utilização. Uma técnica que vem sendo empregada neste sentido é o controle do tráfego por meio das propriedades compressivas, ou seja, a tensão de pré-consolidação e o coeficiente de compressão, que fornece a capacidade de suporte do solo e sua susceptibilidade a compactar. Como exemplos têm-se os estudos realizados por Arvidsson et al. (2000 apud ARVIDSSON; KELLER, 2004) que calcularam o risco de compactação pelo tráfego em diferentes anos baseando-se nas propriedades compressivas.

Definida como a facilidade em que um solo não saturado decresce seu volume quando há aplicação de pressões (LARSON et al., 1980), a compressibilidade pode fornecer informações sobre o histórico de tensão sofrida pelo solo e sua capacidade de suporte de cargas, servindo como indicador da pressão limite que pode ser aplicada ao solo sem que haja deformação. No ensaio de compressão obtêm-se dois parâmetros: a tensão de pré-consolidação, que representa o valor máximo que o solo pode sofrer sem haver compactação adicional

(HOLTZ; KOVACS, 1981) e o coeficiente de compressão que indica o decréscimo de volume do solo, quando este é submetido à aplicação de uma força externa (KOOLEN, 1994).

Utilizando parâmetros compressivos para avaliação da compactação em Latossolo Vermelho submetido a cultivo mínimo e sistema plantio direto, Suzuki (2005) concluiu que o sistema de manejo de cultivo mínimo recente ofereceu maior deslocamento da curva de compressão, resultando em maior susceptibilidade à compactação; porém, o sistema plantio direto ofereceu a menor deformação, em função do maior acúmulo de tensões em seu histórico. Horn et al. (2000) demonstraram que pequenas alterações estruturais que geraram melhorias nos poros do solo podem ocorrer somente se a ação da pressão do tráfego for igual ou menor que a tensão de pré-consolidação.

O uso da tensão de pré-consolidação também foi empregado em solo de textura arenosa por Brandt (2005), que a utilizou como parâmetro de controle de manejo de um Argissolo Vermelho sob sistema plantio direto. O autor encontrou que a pressão exercida pelo trator não gerou compactação adicional; contudo, no solo sob sistema de manejo convencional e cultivo mínimo, a pressão exercida pelo trator excedeu a capacidade de suporte, proporcionando aumento de sua susceptibilidade à compactação adicional. Similarmente, em Latossolo Vermelho sob cerrado, Oliveira et al. (2003) também encontraram maior susceptibilidade à compactação no solo que sofreu revolvimento do que sob sistema plantio direto. Nesse estudo, os pesquisadores encontraram maior tensão de pré-consolidação no solo sob sistema plantio direto.

Sendo assim, além do uso da compressibilidade, na detecção da compactação deve-se levar em consideração o tempo de adoção do sistema plantio direto, já que com a alteração do comportamento físico do solo (SILVEIRA et al., 2008; DA ROS et al., 1996; ROSA, 2007) haverá, também, alteração do comportamento compressivo do solo ao longo do tempo, conforme constatado por Assis & Lanças (2005) em Nitossolo Vermelho. Esses autores encontraram alterações na tensão de pré-consolidação ao longo do tempo de uso de sistema plantio direto em todas as camadas de solo.

Esses efeitos da compactação podem se estender até a redução dos fluxos de água e nutrientes para as plantas (TACKETT; PEARSON, 1964), trazendo prejuízos ao seu desenvolvimento. Assim sendo, a minimização desses efeitos

segundo Arvidsson & Keller (2004) é a recomendação do controle da compactação via dados compressivos, ou seja, utilizar a tensão de pré-consolidação e o coeficiente de compressão do solo como norteadores do manejo mecânico do solo. Tais recomendações, segundo os autores, podem ser baseadas em estudos empíricos ou predições realizadas por modelos mecânicos de compactação.

As práticas de manejo do solo e das culturas provocam alterações nas propriedades do solo, que geralmente são pronunciadas em sua estrutura, as quais, segundo Bertol et al. (2001), podem ser permanentes ou temporárias. Segundo esses pesquisadores, as alterações manifestadas nas propriedades físicas do solo podem ocorrer de diversas maneiras, influenciando o desenvolvimento das plantas. Seguindo esse raciocínio, há poucos estudos sobre o efeito do sistema plantio direto ao longo do tempo para solos da região sul do Brasil, onde estudos nessa linha poderão contribuir para a resposta da pergunta se há necessidade ou não de revolver solos que foram compactados pelas operações do sistema convencional.

O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito ao longo do tempo do sistema plantio direto na compressibilidade de um Latossolo Vermelho e, verificar se há presença de compactação oriunda do tráfego de máquinas agrícolas ao solo.

6.2. Material e métodos

6.2.1. Dados gerais

O experimento, os tratamentos, o solo e os delineamentos estatísticos empregados são os mesmos descritos no Capítulo 1.

6.2.2. Determinações realizadas

a) Compressibilidade do solo

Para verificar se há presença da compactação e os efeitos do sistema plantio direto ao longo do tempo, coletaram-se amostras de solo com estrutura preservada para a verificação da compressibilidade do solo. As amostras foram coletadas nas camadas 0,00 – 0,06 m, 0,07 – 0,14 m, 0,15 – 0,22 m em anel de aço inoxidável (6,1 cm de diâmetro e 2,5 cm de altura).

Em laboratório, essas amostras foram saturadas por capilaridade durante 24 h, e posteriormente foram submetidas à sucção de 33 kPa em câmara de pressão de Richards, para homogeneizá-las quanto a tensão matricial e trabalhar com amostra com umidade próxima a capacidade de campo. Após o equilíbrio da tensão matricial, as amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial. O ensaio foi realizado através de um consolidômetro do Laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos da UFSM, modelo S-450 Terraload da Durham Geo-Interprises (Figura 8), com indicador digital da carga aplicada e com leitura analógica da deformação da amostra.

O ensaio empregado seguiu os pressupostos da NBR12007 (ABNT, 1990) com alteração no tempo de aplicação de carga, que foi utilizado cinco minutos, período suficiente para atingir 99 % da deformação máxima (SILVA et al., 2000b). Durante o ensaio, as amostras foram submetidas a uma aplicação sucessiva e contínua das pressões de 12,5, 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa, e, após isso, foram encaminhadas à estufa para secagem a 105 °C por 24 horas. Com a massa seca e o volume do solo em cada aplicação de carga, calculou-se a densidade para cada pressão aplicada. Ao final, plotou-se a curva de compressão uniaxial.

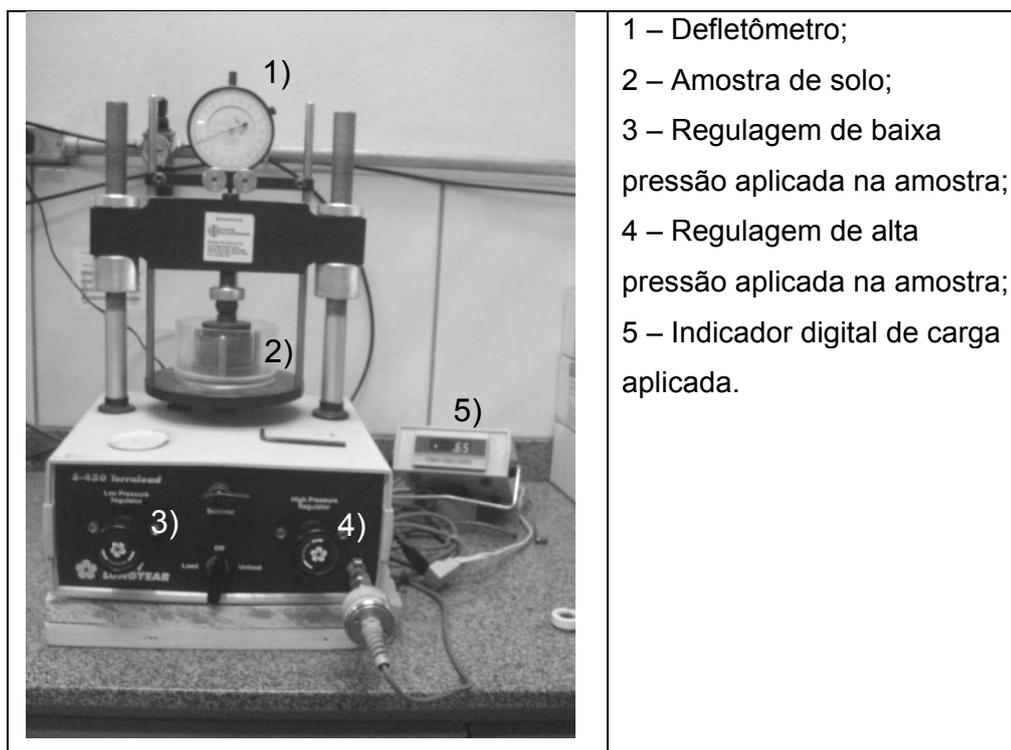


Figura 8 - Prensa uniaxial usada no teste de compressão.

A tensão de pré-consolidação e o coeficiente de compressão foram determinados pelo método de Casagrande (1936), utilizando o ajuste semi-automático da curva de compressão através do software *Compress* (REINERT et al., 2003). Nesse programa também foram determinados a densidade do solo, o índice de vazios, a deformação relativa e o grau de saturação do solo antes e após cada aplicação de carga.

Para eliminar o efeito da compactação inicial do solo na curva de compressão, dividiu-se a densidade do solo ao final da aplicação de cada carga no teste de compressão pela densidade inicial (D_s/D_{si}), fazendo assim que todas as curvas começassem da D_s igual a $1,0 \text{ Mg m}^{-3}$.

Após a obtenção das propriedades citada acima, realizou-se uma análise separada dos dados de deformação relativa, índice de vazios e grau de saturação inicial resultantes da aplicação de 50, 100 e 200 kPa, para avaliar o efeito de uma carga baixa até alta proporcionada pelo tráfego de máquinas agrícolas.

A análise estatística foi realizada pelo software ESTAT (1992), empregando-se um estudo de delineamento blocos ao acaso em esquema bi-fatorial, com o manejo do solo como fator A e o tráfego como fator B.

6.3. Resultados e Discussão

Os valores de coeficiente de compressão, de grau de saturação inicial e tensão de pré-consolidação do Latossolo Vermelho encontram-se na Tabela 7. O tráfego não proporcionou diferença significativa ao longo das camadas nessas propriedades compressivas, mas o manejo do solo ofereceu diferenças na susceptibilidade à compactação e grau de saturação inicial na camada 0,00 – 0,06 m. A possibilidade de compactação foi maior no solo manejado recentemente com o sistema de manejo (SD0), pois ofereceu a maior susceptibilidade, expresso pelo maior coeficiente de compressão.

Após dois anos (SD2), a susceptibilidade do solo a compactar reduziu, diferindo do solo com manejo recente e não apresentando diferença do solo com 14 anos (SD14) sob este sistema. A ação do tráfego também não foi encontrada em Argissolo de textura franca arenosa sob sistema plantio direto por Brandt (2005), que atribuiu este fato ao aumento da capacidade de suporte do solo. Similarmente, Suzuki (2005) encontrou num Latossolo Vermelho com elevado tempo de implantação de sistema plantio direto uma menor susceptibilidade a compactar do que os solos recentes, o que pode ser esperado em função da re-organização natural da estrutura física do solo.

O grau de saturação inicial foi maior no solo SD2, SD4 e SD14, que diferiram do SD0 que apresentou o menor grau. Esse parâmetro irá oferecer maior nível de compactação quando o seu valor for elevado. O elevado grau de saturação dos tratamentos SD2, SD4 e SD14 pode estar relacionado ao sistema plantio direto, que favorece ao maior teor de água (SALTON; MIELNICZUK, 1995; CENTURION; DEMATTÊ, 1985).

Na segunda e terceira camada não ocorreram diferenças para todas as propriedades mecânicas estudadas, demonstrando que as condições impostas pelo manejo e tráfego não foram suficientes para gerar diferenças nos parâmetros em análise.

Tabela 7 – Densidade do solo (Ds), Coeficiente de compressão (Cc), grau de saturação inicial (GSI) e tensão de pré-consolidação (σ_p) do Latossolo argiloso sob sistema plantio direto ao longo das camadas em estudo.

Trat.	Camada de 0,00 – 0,06 m				Camada de 0,07 – 0,14 m				Camada de 0,15 – 0,22 m			
	Ds (Mg m ⁻³)	Cc	GSI (%)	σ_p (kPa)	Ds (Mg m ⁻³)	Cc	GSI (%)	σ_p (kPa)	Ds (Mg m ⁻³)	Cc	GSI (%)	σ_p (kPa)
SD0	1,10 ns	0,52 a	42,9 c	37,3 ns	1,06 ns	0,30 ns	48,7 ns	47,0 ns	1,18 ns	0,20 ns	58,7 ns	60,4 ns
SD2	1,11	0,33 b	62,5 ab	68,1	1,31	0,30	65,9	64,7	1,35	0,29	64,4	73,5
SD4	1,36	0,28 b	66,0 ab	66,4	1,12	0,26	52,8	72,9	1,16	0,23	59,6	83,2
SD5.5	1,20	0,40 ab	53,8 bc	51,2	1,12	0,23	54,4	48,1	1,41	0,25	70,0	84,1
SD14	1,05	0,32 b	76,5 a	61,9	1,41	0,23	70,5	71,9	1,40	0,24	72,1	63,8
Tráfego												
Sem	1,23 ns	0,36 ns	57,8 ns	56,1 ns	1,12 ns	0,28 ns	55,3 ns	59,7 ns	1,29 ns	0,25 ns	64,7 ns	67,4 ns
Com	1,10	0,38	62,9	57,9	1,28	0,25	61,6	62,1	1,30	0,24	65,2	78,6
Teste F												
Manejo(M)	ns	**	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Tráfego(T)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
M x T	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
DP	0,36	0,74	8,37	21,21	0,40	0,13	18,78	32,62	0,37	0,09	18,95	33,28
CV (%)	30,95	20,3	13,87	37,21	33,53	50,03	33,13	53,55	28,77	37,2	29,17	45,59

Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% () ou 1% (**) de probabilidade. SD0 – sistema plantio direto há 0 anos (2 meses); SD2 – sistema plantio direto há 2 anos; SD4 – sistema plantio direto há 4 anos; SD5.5 – sistema plantio direto há 5,5 anos e SD14 – sistema plantio direto há 14 anos; DP – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; ns – não significativo.

Um provável motivo da não influência do tráfego em tais propriedades nessas camadas pode estar ligado às alterações sofridas pelo solo no passado, o que gerou a variação da estrutura do solo que pode ser encontrada pelos valores do coeficiente de variação demonstrados nesta tabela. Nesse sentido, Denardin (1992) e Spera et al. (2003) comentam que, em função da elevada intensidade com que as operações agrícolas foram implementadas no sistema de preparo convencional na região, drásticas alterações à estrutura do solo principalmente na camada superficial são observadas pelo aumento da densidade do solo e da resistência à penetração, repercutindo na redução da macroporosidade, da porosidade total e da estabilidade de agregados, gerando deformações morfológicas das raízes das espécies cultivadas. De acordo com Suzuki et al. (2008), o aumento da resistência à penetração do solo proporciona o aumento da tensão de pré-consolidação,

confirmando as constatações realizadas anteriormente. Essas alterações podem estar ainda manifestadas no solo sem ação do tráfego, visto que o experimento possui tráfego controlado há somente 5,5 anos. Outro problema nessa região está relacionado com a frequente condição de elevado teor de água no solo durante o período de estabelecimento das culturas, o qual potencializa ação do tráfego de máquinas ao solo. Nesse sentido, Oliveira et al. (2003) avaliando a influência das tensões da água num Latossolo Vermelho, chegaram à conclusão que as tensões de água e os sistemas de uso do solo influenciaram nas deformações, sendo que as maiores deformações ocorreram nas condições de tensões mais baixas, evidenciando a necessidade de um controle rigoroso do teor de água do solo na tomada de decisão do manejo das máquinas.

Na segunda camada, observa-se redução da tensão de pré-consolidação quando houve redução da densidade do solo, o que pode ser visualizado nos tratamentos SD0 e SD5.5. Essa condição tem sido constatadas também em trabalhos realizados por Braida (2004), Rücknagel et al. (2007) e Debiasi (2008), onde os autores atribuíram a redução da tensão de pré-consolidação às menores forças de coesão e atrito entre as partículas do solo quando em condições de redução da densidade do solo. Todavia, Alexandrou & Earl (1998) comentam que as alterações resultantes da compactação em solo arenoso são acompanhadas pela alteração da densidade do solo, enquanto que, para solo argiloso, o aumento da compactação independe do aumento da densidade do solo. Esse caso está dependente do conteúdo volumétrico de água que, por sua vez, está diretamente relacionado com as forças coesivas e adesivas do solo.

A redução do grau de saturação inicial, acompanhada pela redução da tensão de pré-consolidação visualizada na primeira e na segunda camada nos tratamentos SD0 e SD5.5, também foi encontrada por Silva et al. (2002) em Argissolo Vermelho e Latossolo Vermelho, o que pode ocasionar deformações plásticas

Para evitar danos à estrutura deste Latossolo Vermelho, cuidados redobrados com o tráfego de máquinas devem ser tomados, em face às condições demonstradas pelos parâmetros compressivos, ou seja, baixa capacidade de suporte e elevada susceptibilidade a compactar. Atribui-se baixa capacidade em função da pressão exercida por tratores de pequeno porte, que segundo Rosa (2009) atinge os 102 kPa. Sendo assim, recomenda-se levar em consideração a

tensão de pré-consolidação, que neste caso apresentou-se baixa se compararmos com os dados de Suzuki et al. (2008) que encontraram uma tensão de pré-consolidação de 118,7 kPa para Latossolo Vermelho distrófico, de 128,8 kPa para um Latossolo Vermelho aluminoférrico e de 132,7 kPa para um Latossolo Vermelho distroférrico, sendo que o teor de argila aumentou do primeiro em direção ao terceiro solo e as amostras foram equilibradas com a mesma tensão matricial desse estudo. Em uma simulação da pressão que pode ser imputada ao Argissolo Vermelho-Amarelo, Rosa (2009) encontrou que a pressão gerada por um trator de 75 cv com um pulverizador montado (3,8 Mg de massa total) gerou uma pressão de 102 kPa, ou seja, para as condições apresentadas neste estudo, este tráfego já iria proporcionar compactação além da existente. Essas constatações corroboram para o controle do tráfego (HÅKANSSON, 2005), que neste caso pode se tentar trafegar em condições de menor teor de água do solo.

As curvas de compressão encontram-se na Figura 9. Verifica-se que na camada superficial o solo sob SD0 apresentou a maior inclinação da reta de compressão virgem, seguido pelo SD5.5, SD2 e SD14. Ao adicionar o efeito do tráfego nessa camada, o solo manejado recentemente com o sistema plantio direto com tráfego (SD CT) continuou apresentando a maior susceptibilidade à compactação, acompanhado pelo SD5.5 CT, que apresentou curva similar ao SD14 CT, após vem o SD4 CT e o SD2 CT. Esse fato é explicado pela baixa tensão de pré-consolidação que lhe atribui uma baixa capacidade de suporte de carga; em consequência, maiores alterações irão ocorrer.

As alterações do solo são reduzidas ao longo do tempo em função da consolidação natural do solo (VEIGA et al., 2008), quando não são aplicadas cargas elevadas. Esses autores encontraram valores elevados de densidade do solo na camada de 0,05 – 0,10 m e 0,12 – 0,17 m, em todos os manejos estudados (convencional, sistema plantio direto, cultivo mínimo), apontando para a presença de compactação nessas camadas, fato não constatado no presente estudo ao ser considerar aquelas propriedades do solo, mas identificado pela inclinação da curva de compressão.

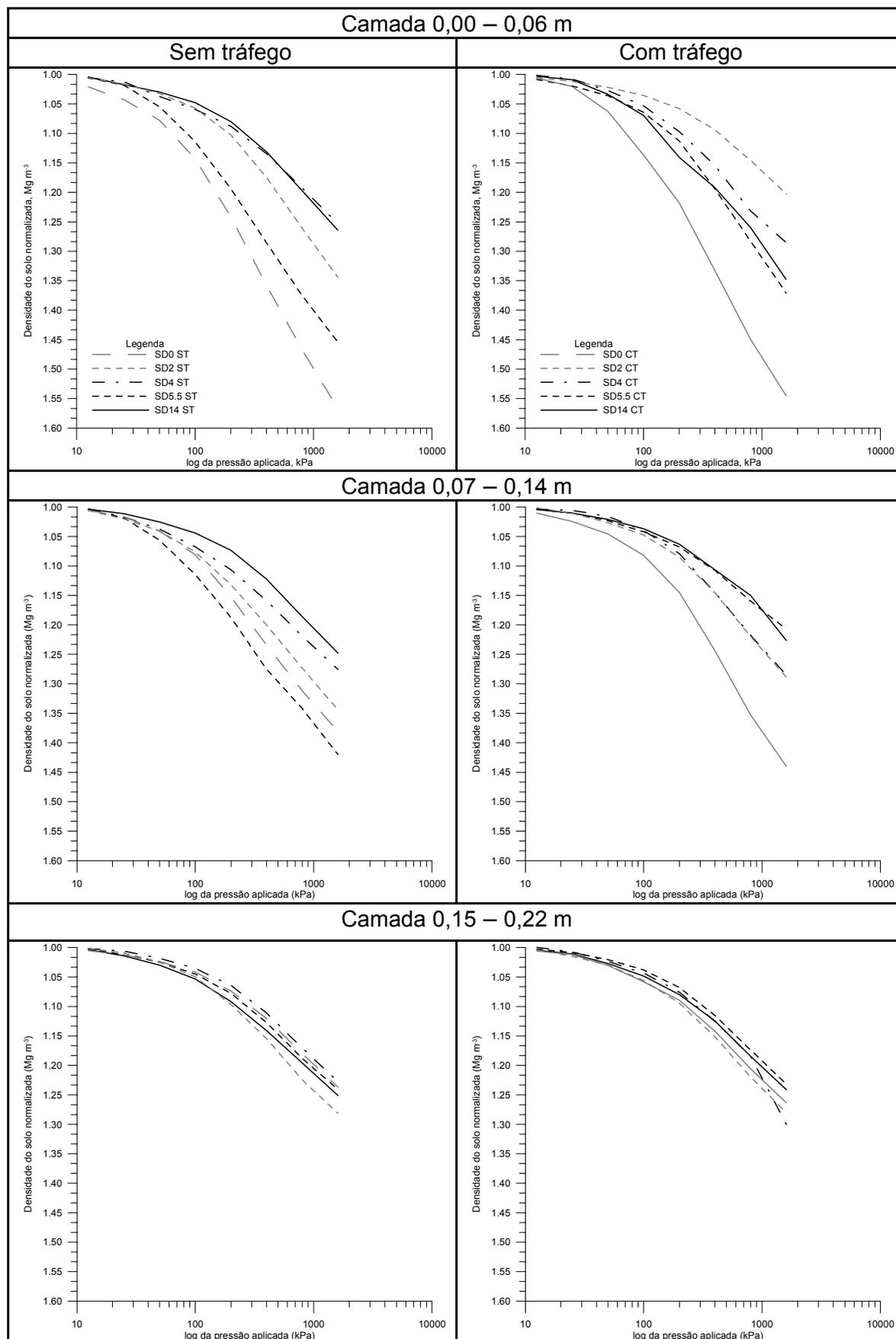


Figura 9 - Curva de compressão do Latossolo Argiloso sob SD ao longo das camadas de solo. (SD0 – sistema plantio direto há 0 anos (2 meses); SD2 – sistema plantio direto há 2 anos; SD4 – sistema plantio direto há 4 anos; SD5.5 – sistema plantio direto há 5,5 anos e SD14 – sistema plantio direto há 14 anos; índice “St” é sem tráfego e “Ct” é com tráfego)

Em estudos realizados em Argissolo Vermelho submetido a sistema plantio direto, Debiasi (2008) concluiu que, independentemente do tráfego e da época de avaliação, a compactação provocou maiores alterações na camada superficial do solo. Isso está em concordância com a maior variação das curvas nesta camada.

Na segunda camada, o solo manejado há 14 anos com sistema plantio direto apresentou as menores variações ao longo das cargas aplicadas, independentemente do tráfego. Essa constatação pode levar a duas possíveis afirmações. A primeira é que há uma maior capacidade de suporte de carga em função das vantagens que esse sistema possibilita ao solo, tais como o efeito da matéria orgânica na estabilização de agregados (CARPENEDO; MIELNICZUK, 1990; PALADINI; MIELNICZUK, 1991), e a ação da microfauna na produção de elementos que também são responsáveis pela estabilização dos agregados (HENKLAIN, 1997). Tudo isso irá gerar uma maior resistência da estrutura física do solo à ação do tráfego. A segunda hipótese é que o maior nível de compressão sofrido pelo solo ao longo do tempo gera maior resistência à aplicação de pressão no teste de ensaio uniaxial.

Relacionado à constatação anterior de maior capacidade de suporte do solo ao longo do tempo de uso de sistema plantio direto, em função da estabilização de agregados, Assis & Lanças (2005), avaliando esse efeito nas propriedades físicas de um Nitossolo Vermelho, verificaram que houve um aumento na estabilidade de agregados ao longo do tempo de uso do solo, onde os pesquisadores encontraram maior estabilidade de agregados no solo com 12 anos de uso de sistema plantio direto, do que 1, 4 ou 5 anos sob este sistema. Segundo os autores, isso é explicado pela adição de materiais orgânicos e pelo histórico cultural da área (realização de rotação de culturas), que têm significativa influência sobre a agregação, quando considerados longos períodos de tempo.

Os tratamentos SD0, SD2 e SD5.5 apresentaram as maiores alterações na segunda camada, o que está ligado ao baixo grau de saturação inicial (Tabela 7). Observações similares foram feitas por Silva et al. (2002), que encontraram maior susceptibilidade à compactação tanto em solo arenoso (Argissolo Vermelho-Amarelo) quanto argiloso (Latossolo Vermelho) quando houve redução do grau de saturação inicial. Segundo esses pesquisadores, quando a variação do grau de saturação inicial vai de 61 – 75 % ou 46 – 60 % têm-se inclinações mais elevadas, apontando para maiores susceptibilidades à deformações plásticas, ou seja,

deformações não recuperáveis. Similarmente, Oliveira et al. (2003) encontraram deslocamento da curva de compressão em função da variação da tensão de água da amostra, demonstrando que, à medida que aumenta a tensão de água no Latossolo Vermelho, há um deslocamento das curvas para cima com o aumento da tensão aplicada. Em Latossolos submetidos ao cultivo anual, mata nativa e pastagem, Kondo & Dias Jr (1999) encontraram que, independentemente do uso de solo, o aumento do teor de água resultou em menores pressões de resposta do solo a aplicação de carga. O teor de água do solo atua na mobilidade de suas partículas, resultado da atuação das forças de coesão e adesão. Machado et al. (1996) comentam que em condições de elevado teor de água na consistência de plasticidade, ao invés de se romperem ao longo do plano de fratura do solo, os agregados são comprimidos, alterando assim a sua forma e resultando na compactação.

Na terceira camada houve uma similaridade entre as curvas, o que pode apontar para uma elevação da compactação do solo, onde Reichert et al. (2009) nomeia como pé-de-plantio direto. Segundo esses autores, essa camada geralmente ocorre sempre ao redor de 0,07 a 0,15 m do solo, oriundo do acúmulo de tráfego do sistema de sistema plantio direto.

Os valores de deformação relativa, índice de vazios e densidade do solo, na aplicação de 50 kPa, encontram-se na Tabela 8. Na primeira camada foram encontradas diferenças entre os tratamentos nas propriedades listadas anteriormente, onde se verifica que o manejo SD0 ofereceu a menor densidade do solo que resultou no maior índice de vazios. Isso é atribuído ao manejo convencional anterior ao sistema plantio direto. A densidade do solo desse tratamento diferiu dos solos sob SD2, SD4 e SD14. Percebe-se que, em geral, há um aumento da densidade do solo ao longo do tempo, o que está de acordo com os estudos de Da Ros et al. (1996) em Latossolo Vermelho, onde os autores encontraram um aumento da densidade do solo quando se aumentou o período de 1, para 5.5, e para 9 anos. Similarmente, Silveira et al. (2008) concluíram que o sistema plantio direto usado continuamente promove aumento da densidade do solo e da microporosidade, que repercutem na redução da macroporosidade e da porosidade total do solo. Contudo, Silva et al. (2008) não encontraram modificações em Latossolo Vermelho após 6 anos de cultivo em sistema plantio direto. Esses distintos resultados decorrem do fato que o efeito do tempo em tais propriedades serão dependentes do local, bem

como do tipo de rotação de cultura (ALBUQUERQUE, et al., 1995), umidade de trabalho (HÅKANSSON, 2005), e da pressão imputada pelo tráfego.

A maior deformação relativa foi encontrada no SD0 na camada superficial, função da sua menor tensão de pré-consolidação (Tabela 7). O índice de vazios do solo seguiu a mesma tendência da densidade do solo, ou seja, maior no SD0; contudo, no solo com 14 anos de uso deste sistema não foi à menor, o que pode demonstrar a ação do sistema de manejo na estruturação física do solo. Isso é confirmado em estudos de Da Ros et al. (1996), os quais encontraram aumento no tamanho de agregados com o aumento no tempo de uso de tal sistema.

Tabela 8 – Deformação relativa (DFR), índice de vazios (IV) e densidade (Ds) do Latossolo argiloso submetido a 50 kPa ao longo das camadas de solo.

Tratamento	Camada de 0,00 – 0,06 m			Camada de 0,07 – 0,14 m			Camada de 0,15 – 0,22 m		
	DFR	IV	Ds Mg m ⁻³	DFR	IV	Ds Mg m ⁻³	DFR	IV	Ds Mg m ⁻³
SD0	0,066 a	1,22 a	1,17 c	0,032 ns	1,06 ns	1,11 ns	0,021 ns	0,65 ns	1,21 ns
SD2	0,029 b	0,94 bc	1,35 ab	0,033	0,84	1,36	0,027	0,88	1,39
SD4	0,031 b	0,85 c	1,40 a	0,029	0,87	1,39	0,018	0,69	1,18
SD5.5	0,043 b	0,94 ab	1,25 bc	0,030	0,86	1,40	0,023	0,80	1,45
SD14	0,033 b	0,99 bc	1,30 abc	0,023	0,80	1,43	0,028	0,81	1,44
Tráfego									
Sem	0,042 ns	1,03 ns	1,29 ns	0,032 ns	0,89 ns	1,36 ns	0,024 ns	0,77 ns	1,33 ns
Com	0,039	1,00	1,30	0,027	0,88	1,31	0,023	0,77	1,33
Teste F									
Manejo (M)	**	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Tráfego (T)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
M x T	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
DP	0,01	0,11	0,10	0,01	0,15	0,25	0,01	0,23	0,38
CV (%)	26,45	10,99	5,86	49,74	17,17	18,61	42,25	29,47	28,69

Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. SD0– sistema plantio direto há 0 anos (2 meses); SD2– sistema plantio direto há 2 anos; SD4– sistema plantio direto há 4 anos; SD5.5 – sistema plantio direto há 5,5 anos e SD14– sistema plantio direto há 14 anos; DP – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; ns – não significativo.

Na segunda e na terceira camada, não houve diferenças dentre os tratamentos no que tange a deformação relativa, índice de vazios e densidade do solo. A deformação relativa como possui valores baixos e essas diferenças não são perceptíveis pela análise estatística. Isso também foi encontrado por Rosa (2009) em Argissolo Vermelho sob sistema plantio direto e campo nativo, e por Suzuki et al.

(2008) em Latossolos do Rio Grande do Sul. Segundo Horn (1988), para um mesmo teor de argila, quanto menor for a densidade do solo, maior será a sua compressibilidade. Comparando esta afirmação com o presente estudo, podemos verificar esta ocorrência no solo sob SD0 (Tabela 7). Contudo, ressalta-se que devemos levar em consideração o teor de água do solo, pois este pode resultar em efeitos contrários, como é observado em algumas situações como a do SD2 na segunda camada na aplicação de 100 kPa, que apresentou uma das maiores densidades do solo (Tabela 9), porém, o aumento foi resultado do maior grau de saturação inicial (Tabela 7).

Relativo à deformação do solo, Suzuki et al. (2008) relatam que, quanto menor a deformação, maior é o estado de compactação que se encontra o solo, onde os autores encontraram um aumento da deformação na medida em que houve aumento da resistência à penetração e da tensão de pré-consolidação de Latossolos. No presente estudo, verifica-se que as maiores deformações ocorreram nos graus de saturação inicial mais elevado.

Avaliando a densidade e o índice de vazios na segunda e terceira camada, observa-se que o manejo de SD14 apresentou um dos valores mais altos de índice de vazios dentre os tratamentos, acompanhado de uma das maiores densidades do solo nos 50 kPa. Isso está acompanhado pelas menores inclinações da curva de compressão (Figura 9), podendo apontar para uma elevada resistência entre agregados. Na tabela 9 constatamos que, ao dobrar a aplicação de carga, essas manifestações continuam acontecendo ao longo das camadas em estudo.

Ao aplicar 100 kPa (Tabela 9) ao solo, estamos trabalhando em valores maiores que a tensão de pré-consolidação, ou seja, em deformações plásticas; assim, os valores de deformações relativa demonstrados nas Tabelas 8 e 9 são deformações irreversíveis tanto nos 100 kPa como nos 200 kPa. Como nos 50 kPa, o SD0 apresentou a maior deformação relativa com maior índice de vazios, confirmam-se as constatações anteriores da influência do manejo convencional. Ao longo das camadas verifica-se que não houve diferença entre os tratamentos, bem como o tráfego só alterou significativamente a deformação do solo na primeira camada. Os manejos SD14 e SD5.5 apresentaram a maior densidade do solo, sendo que a afirmação realizada anteriormente de aumento progressivo da densidade do solo com aumento do tempo de utilização do sistema de manejo é confirmada.

Tabela 9 – Deformação relativa (DFR), índice de vazios (IV) e densidade (Ds) do Latossolo argiloso submetido a 100 kPa ao longo das camadas de solo.

Tratamento	Camada de 0,00 – 0,06 m			Camada de 0,07 – 0,14 m			Camada de 0,15 – 0,22 m		
	DFR	IV	Ds Mg m ⁻³	DFR	IV	Ds Mg m ⁻³	DFR	IV	Ds Mg m ⁻³
SD0	0,124 a*	1,09 ns	1,25 ns	0,057 ns	0,75 ns	1,14 ns	0,0378 ns	0,62 ns	1,24 ns
SD2	0,040 c	0,73	1,16	0,059	0,79	1,40	0,0503	0,83	1,42
SD4	0,054 bc	0,81	1,43	0,044	0,70	1,18	0,0318	0,67	1,20
SD5.5	0,081 b	0,99	1,30	0,054	0,68	1,20	0,0407	0,77	1,47
SD14	0,045 c	0,79	1,11	0,039	0,77	1,46	0,0487	0,77	1,47
Tráfego									
Sem	0,076 a	0,95 ns	1,33 ns	0,054 ns	0,73 ns	1,20 ns	0,0425 ns	0,73 ns	1,35 ns
Com	0,061 b	0,81	1,17	0,047	0,74	1,35	0,0412	0,73	1,36
Teste F									
Manejo (M)	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Tráfego (T)	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
M x T	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
DP	0,017	0,24	0,38	0,027	0,31	0,43	0,019	0,21	0,39
CV	25,360	27,88	30,17	52,84	41,55	33,88	45,82	28,92	28,79

* Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. SD0– sistema plantio direto há 0 anos (2 meses); SD2– sistema plantio direto há 2 anos; SD4– sistema plantio direto há 4 anos; SD5.5 – sistema plantio direto há 5,5 anos e SD14– sistema plantio direto há 14 anos; DP – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; ns – não significativo.

A deformação relativa, índice de vazios e densidade do solo submetido a 200 kPa encontra-se na tabela 9. Assim como os efeitos ocorridos na carga de 50 e 100 kPa, diferenças ocorreram apenas na primeira camada, bem como o tráfego só alterou a deformação relativa. O solo sob SD0 apresentou elevada deformação, o que poderá implicar em ações de mobilização mecânica do solo para descompactá-lo. Essa ação de mobilização será iminente, visto que a carga aplicada no teste foi quase 6 vezes maior que sua capacidade de suporte (Tabela 7). Os resultados de deformação e índice de vazios na aplicação de 200 kPa trazem um alerta para com os cuidados com tráfego de máquinas, para evitar tais condições, onde se ressalta que para haver o manejo adequado do tráfego devemos cuidar o teor de água do solo (SILVA et al., 2002) no momento de realizar as operações agrícolas; a pressão de inflação dos pneus do trator (HÅKANSSON; DANFORS, 1981), para melhorar a eficiência de tração, reduzir a patinagem, e reduzir a carga aplicada; e tomar cuidados com a intensidade de tráfego (HÅKANSSON, 2005), ou seja, evitar o tráfego em demasia ao solo.

Tabela 10 – Deformação relativa (DFR), índice de vazios (IV) e densidade (Ds) do Latossolo argiloso submetido a 200 kPa.

Tratamento	Camada de 0,00 – 0,06 m			Camada de 0,07 – 0,14 m			Camada de 0,15 – 0,22 m		
	DFR	IV	Ds Mg m ⁻³	DFR	IV	Ds Mg m ⁻³	DFR	IV	Ds Mg m ⁻³
SD0	0,187 a	0,93 ns	1,35 ns	0,064 ns	0,67 ns	1,20 ns	0,061 ns	0,580 ns	1,28 ns
SD2	0,066 c	0,68	1,20	0,064	0,71	1,46	0,088	0,760	1,48
SD4	0,084 bc	0,75	1,48	0,072	0,64	1,22	0,054	0,620	1,24
SD5.5	0,132 b	0,88	1,38	0,098	0,62	1,24	0,069	0,710	1,51
SD14	0,078 c	0,72	1,16	0,064	0,73	1,50	0,079	0,710	1,52
Tráfego									
Sem	0,123 a	0,85 ns	1,40 ns	0,089 ns	0,66 ns	1,25 ns	0,073 ns	0,670 ns	1,40 ns
Com	0,096 b	0,73	1,22	0,077	0,69	1,39	0,068	0,680	1,40
Teste F									
Manejo (M)	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Tráfego (T)	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
M x T	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
DP	0,03	0,22	0,39	0,04	0,27	0,45	0,03	0,19	0,4
CV	26,4	27,98	29,79	52,18	40,58	34,21	40,9	28,71	28,62

Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% () ou 1% (**) de probabilidade. SD₀ – sistema direto há 0 anos (2 meses); SD₂ – sistema direto há 2 anos; SD₄ – sistema plantio direto há 4 anos; SD_{5.5} – sistema direto há 5,5 anos e SD₁₄ – sistema direto há 14 anos; DP – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; ns – não significativo.

A variação ao longo do tempo da deformação relativa, grau de saturação inicial e do índice de vazios encontram-se na Figura 10 (a, b, c). Na primeira camada, inicialmente a deformação relativa é alta independentemente da carga aplicada, função do baixo grau de saturação inicial e, bem como, da ação do sistema de manejo empregado no passado, advindo do uso de revolvimento intenso, estando de acordo com Oliveira et al. (2003). Com o aumento do tempo de manejo, a deformação é reduzida, podendo estar apontando para um estado maior de compressão do solo, o que pode ser visualizado nas constatações realizadas no primeiro capítulo.

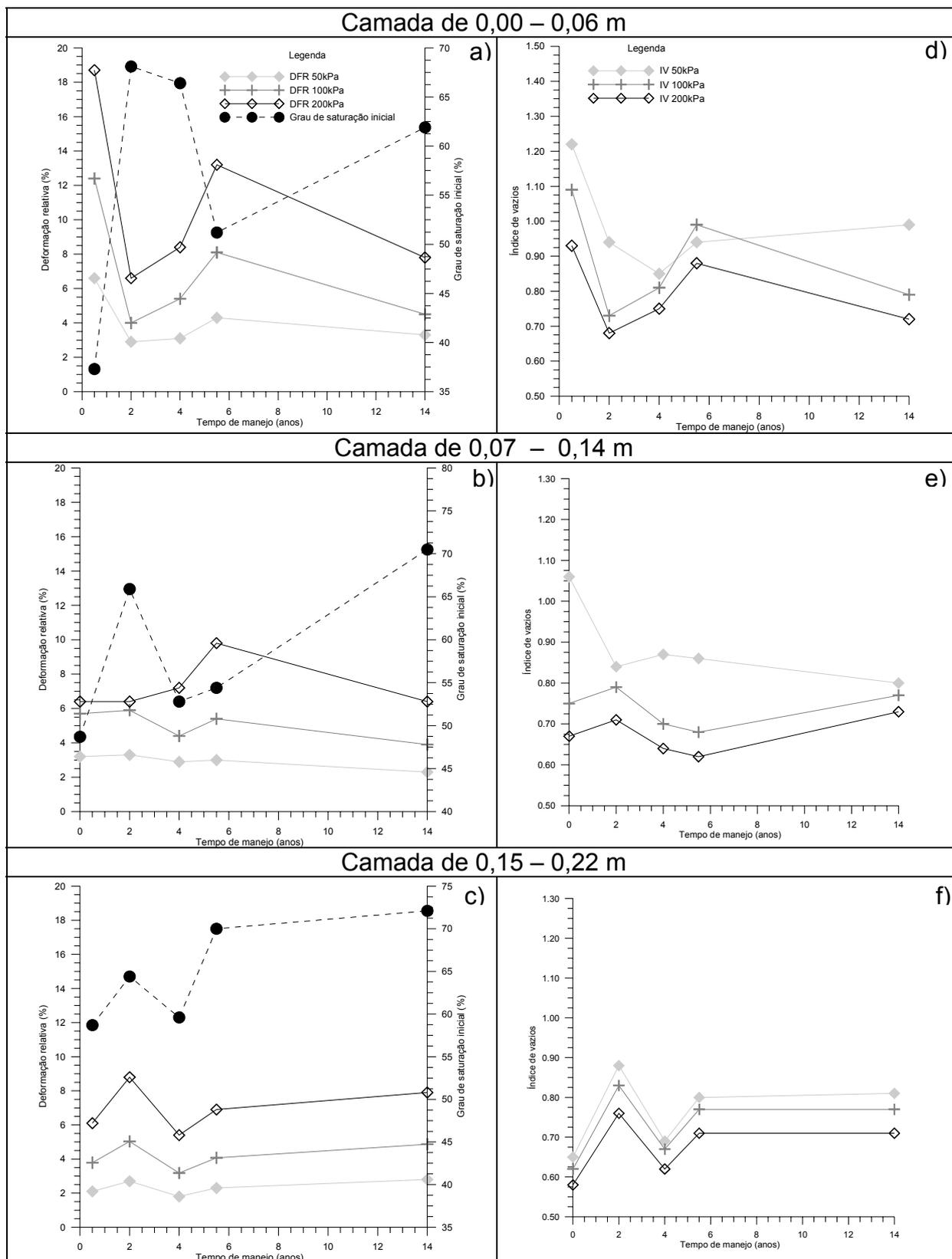


Figura 10 - Variação ao longo do tempo da deformação relativa (DFR) e grau de saturação inicial (a, b, c) e do índice de vazios (d, e, f) do Latossolo Vermelho nas camadas em estudo.

Após 14 anos, há uma estabilização da deformação, visto que, mesmo havendo aumento do grau de saturação inicial em relação aos 4 e 5.5 anos, não houve redução da deformação quando se aplicou 50 kPa. Reduções foram observadas quando se aplicaram 100 e 200 kPa, ou seja, valores maiores que a capacidade de suporte deste solo. Isso corrobora para a constatação feita de maior resistência dos agregados pelo sistema no decorrer dos anos.

Na camada de maior concentração das tensões geradas pelo tráfego (REICHERT et al., 2009), 0,07– 0,14 m, ao aplicar 50 kPa praticamente não houve alterações ao longo dos anos na deformação, visto que a capacidade de suporte do solo (Tabela 7) do SD14 é superior a dos anos anteriores. Alterações são percebidas nas aplicações de 100 e 200 kPa, o que é esperado em função de estar excedendo a capacidade de suporte do solo. Contudo, chama-se atenção novamente do solo com 14 anos de manejo, onde não houve elevadas alterações em função da elevação do grau de saturação do solo.

Deformações maiores como encontradas na camada inicial são esperadas em função do maior espaço poroso (Tabela 3, capítulo 1), pois, segundo estudos de Oliveira et al. (2003), há uma tendência de maior deformação do solo para conteúdo de água mais elevado, e situações de menor densidade do solo com maior espaço poroso, o que disponibiliza maior espaço para a ocorrência de deformações. Isso foi encontrado em Latossolo Vermelho sob cerrado. A menor deformação relativa no solo há 14 anos sob sistema plantio direto pode ser explicada pelo maior teor de carbono orgânico (Tabela 3, capítulo 1), a qual, segundo Horn et al. (1994), confere ao solo uma maior resistência à deformação de seus agregados, e, resultando em menor densidade, pois há um menor adensamento das camadas. Nesse sentido, Braida et al. (2008) concluíram que os aumentos no teor de carbono orgânico resultam em aumento da elasticidade do solo, ou seja, menores deformações plásticas e maiores deformações elásticas.

Na terceira camada, a variação da deformação relativa teve comportamento similar à variação do grau de saturação inicial, e novamente demonstrando uma estabilização das deformações após 14 anos de sistema plantio direto. Isso é repetido na variação do índice de vazios (Figura 10f), que apresentou uma elevação no segundo ano e após uma queda que se estabilizou. O índice de vazios é um fator importante para o bom desenvolvimento da planta, pois esta relacionada à aeração do solo.

O índice de vazios teve uma variação ao longo das camadas (Figura 10d,e,f) dependente do grau de saturação inicial, conforme se verifica visualmente. Na primeira camada, maiores índices ocorreram no tempo 0 anos de manejo, que demonstrou a menor saturação. Aumentando o tempo, demonstrou-se menor quando houve aumento do grau de saturação. Em todas as camadas são perceptíveis essas alterações até os cinco anos e meio de manejo, tanto na deformação do solo como índice de vazios e grau de saturação inicial, demonstrando que após 14 anos, embora se tenha baixa deformação e índice de vazios, comparado ao início de uso deste sistema de manejo, há uma continuidade de poros que está proporcionando a elevação do grau de saturação inicial.

Em estudos realizados em Latossolo Vermelho (argiloso) e Argissolo Vermelho-Amarelo (arenoso), por Silva et al. (2002) encontraram que o índice de vazios é afetado diretamente pela saturação do solo quando em baixo estado de compactação, estando de acordo com as constatações realizadas neste estudo. Os autores concluíram que isso irá resultar em maiores compressões quando na aplicação de carga em maiores níveis de umidade. Tudo isso ocorre em função da transmissão de tensões originadas pelo tráfego de máquinas serem mais nociva em solos de textura argilosa, em função da maior atuação das forças de adesão do solo que ajuda no aumento do teor de água, propriedades influenciáveis no nível de compactação (LARSON et al., 1980).

Verificando a influência de cada parâmetro sobre o outro através da matriz de correlação de Pearson (Tabela 11), podemos verificar que a microporosidade do solo apresentou menor correlação com a tensão de pré-consolidação, coeficiente de compressão, deformação relativa e índice de vazios, fato também demonstrado com a densidade final, exceto pela sua maior correlação com o índice de vazios, o que é esperado em função do aumento da massa por unidade de volume. A falta de correlação entre a densidade do solo final com a tensão de pré-consolidação e coeficiente de compressão também foi encontrada por Suzuki et al. (2008) em Latossolos do Rio Grande do Sul, visto que a tensão de pré-consolidação depende do teor de água do solo (DIAS Jr; PIERCE, 1996).

O grau de saturação inicial teve maior correlação com a tensão de pré-consolidação e deformação relativa, apresentando-se superior a 60%, confirmando as constatações da dependência entre estas propriedades. Contudo, ressalta-se que o tempo do uso do sistema deve ser levado em consideração.

A variação da deformação relativa demonstrada nos primeiros 5 anos e meio de sistema plantio direto pode estar relacionada à tensão de pré-consolidação, ao coeficiente de compressão e ao grau de saturação inicial, pois tiveram uma maior dependência, sendo que a correlação entre a deformação relativa com o grau de saturação e tensão de pré-consolidação foi negativa, ou seja, ao aumentar uma propriedade, gera redução da outra. Isto pode ser identificado na Figura 10 e na Tabela 7 nos tratamentos até 5,5 anos de uso desse sistema de manejo. Essas constatações podem ser esperadas, pois segundo Larson et al. (1980) a tensão da água no solo é um dos fatores que afetam diretamente o comportamento compressivo do solo.

Estudos realizados por Canarache et al. (2000) demonstraram correlação entre a densidade inicial do solo e o coeficiente de compressão com a tensão de pré-consolidação. Isso manifesta que o aumento da tensão de pré-consolidação é acompanhada pelo aumento da densidade do solo e da redução da sua susceptibilidade à compactação. O aumento da densidade do solo com o aumento do tempo de implantação do sistema plantio direto, como abordado por Da Ros et al. (1996) em Latossolo Vermelho, pode-se esperar um aumento na capacidade de suporte do solo ao longo do tempo.

Tabela 11 - Matriz de correlação de Pearson das variáveis físicas e mecânicas do Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto

	GSI*	Cc	DFR	Dsi	Dsf	Ma	Mi
σ_p	0,61	-0,60	-0,75	0,73	0,23	-0,70	0,32
Cc	-0,48	-	0,89	-0,93	-0,52	0,79	-0,29
DFR	-0,71	0,89	-	-0,97	-0,29	0,90	-0,46
IV	0,09	0,44	0,24	-0,43	-0,89	0,03	0,48

* GSI – grau de saturação inicial; Cc – coeficiente de compressão; DFR – deformação relativa; Dsi – densidade inicial do solo antes do teste de compressão; Dsf – densidade do solo no final do teste de compressão; Ma – macroporosidade; Mi – microporosidade; σ_p - tensão de pré-consolidação; IV – índice de vazios.

O comportamento da densidade do solo ao longo do tempo de implantação do sistema plantio direto está mostrado na Figura 11. A densidade do solo passou por um aumento até os 4 anos na primeira camada, e após 14 anos retornou para uma condição próxima a do início; contudo, na segunda tivemos um aumento da densidade e uma estabilização na terceira camada em relação aos 5,5 anos.

A segunda camada, considerada por alguns autores como zona de concentração das tensões geradas pelo tráfego (ABREU et al., 2004; STRECK et al., 2004; REICHERT et al., 2009) apresentou aumento da densidade após 5 anos e meio, manifestação não ocorrida nas demais camadas, corroborando para a constatação de uma zona de concentração de tensões. Isso também foi encontrado por Silva et al. (2008) em Latossolo Vermelho cultivado em sistema plantio direto, onde os respectivos autores encontraram um aumento da densidade de 13 % nos primeiros 2 e 6 anos, sendo que a densidade do solo foi reduzida ao chegar ao sexto ano em todas as camadas estudadas (0,0 – 0,1 m; 0,1 – 0,2 m; 0,2 – 0,3 m), estando de acordo com a primeira camada deste estudo.

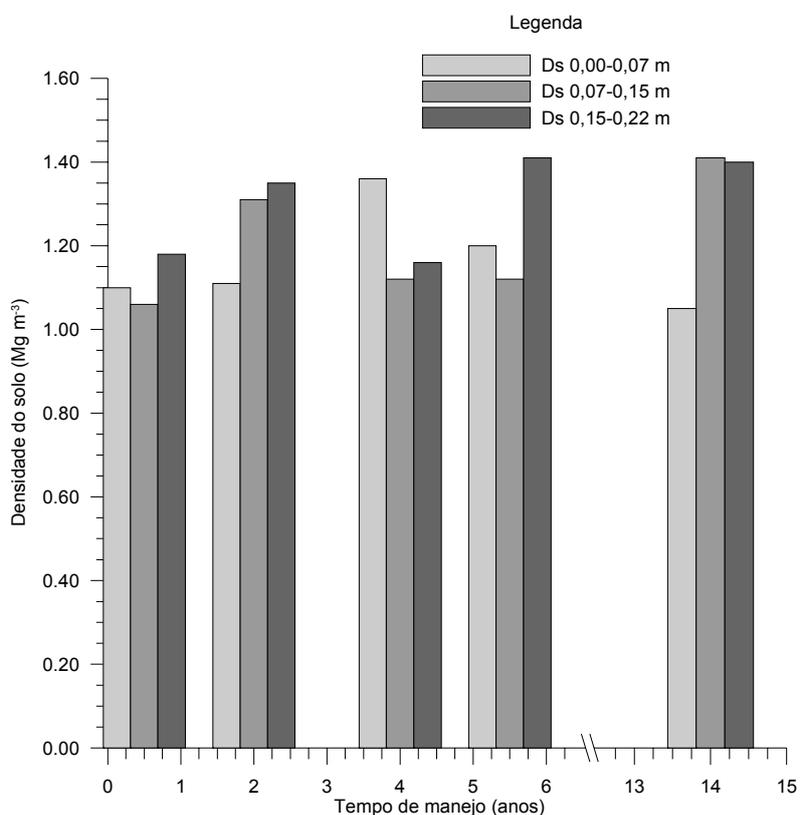


Figura 11 - Variação da densidade (Ds) do Latossolo Vermelho ao longo do tempo de uso em sistema plantio direto ao longo das camadas em estudo.

O aumento da densidade do solo nos primeiros anos é relatado por Souza et al. (2005) como sendo em decorrência da acomodação das camadas do solo que,

posteriormente, pode diminuir, em virtude do incremento de matéria orgânica do sistema plantio direto, como encontrado nas Tabelas 3, 4 e 5 (Capítulo 1).

O controle do tráfego pela densidade do solo deve ser cuidadoso, pois como se verifica aqui, o próprio sistema de manejo favorece condições mecânicas adequadas, manifestado pela elevação da capacidade de suporte, índice de vazios semelhantes à condição inicial de manejo e elevação do grau de saturação. O aumento da densidade do solo pode não ocorrer, como verificado em Latossolo Vermelho localizado no estado do Goiás, por Silveira et al. (2008), que identificaram, assim como neste estudo, e nas pesquisas realizadas por Stone et al. (2002) e Silveira et al. (2008), que há uma redução da densidade do solo com o avanço do tempo de sistema plantio direto. Isso demonstra que esta propriedade não pode ser considerada isolada como indicadora de compactação. Algumas situações de aumento da densidade do solo e diminuição da macroporosidade nesse sistema estão sendo diagnosticados por alguns pesquisadores e agricultores como solo compactado, o que induz o agricultor a revolver o solo (STONE, et al. 2002). Contudo, é uma atitude precipitada conforme se verifica no comportamento da densidade do solo e demais propriedades compressivas nesse estudo e dos pesquisadores citados anteriormente, porém, isso é conseguido com o uso de rotação de culturas e tráfego controlado.

7. CONCLUSÕES

Nos primeiros 2 meses de uso do sistema plantio direto o solo apresenta elevada macroporosidade o que lhe confere elevada condutividade hidráulica em solo saturado e umidade de saturação, proporcionando maior condutividade ao ar, em todas as camadas de solo estudadas.

Com o aumento do tempo de implantação do sistema plantio direto ocorre aumento na microporosidade e no teor de carbono orgânico, na camada 0,0 – 0,06 m, proporcionando maior retenção de água nas tensões 0,1, 6 e 10 kPa.

Solos sob sistema plantio direto a 5,5 e 14 anos retêm mais água no solo, a retenção de água aumenta com o tempo de adoção do sistema independentemente da existência ou não de tráfego de máquinas.

A maior condutividade ao ar foi observada na camada superficial do solo onde tem-se a maior presença de macroporos.

Com o aumento da tensão aplicada houve aumento na condutividade ao ar em todos os tratamentos e camadas de solo estudadas.

As alterações nas propriedades físicas do solo pelo sistema plantio direto apontam para condições ruins durante os primeiros 5 anos de sua implantação, advindo da elevada drenagem do solo já no começo do processo de secagem do solo, maiores deformações relativas quando submetido a cargas externas e aumento da densidade com conseqüente diminuição da condutividade hidráulica. Após este período, aos 14 anos o solo encontra-se em condições melhores, maior retenção, baixa deformação relativa e porosidade adequada.

Até o 5 ano e meio de manejo do sistema plantio direto as deformações mais elevadas ocorrem quando há aumento do coeficiente de compressão e redução do grau de saturação inicial. Após este período, o manejo aumenta a resistência a deformações relativa independentemente do grau de saturação inicial do solo.

O tráfego não gera diferença suficiente no coeficiente de compressão, tensão de pré-consolidação, na densidade do solo e no grau de saturação inicial desse solo a 33 kPa. As alterações surgem na curva de compressão, aumentando a susceptibilidade a compactar.

Há uma zona compreendida entre os 0,07 – 0,14 m de elevação da densidade do solo e redução do índice de vazios independente do tempo de

implantação do sistema plantio direto. A camada de 0,15 – 0,22 m apresentam curvas de compressão semelhantes ao longo do tempo de uso do solo.

A tensão de pré-consolidação e a deformação relativa do Latossolo Vermelho possuem correlação com o grau de saturação inicial, sendo que a capacidade de suporte é maior quando há um aumento da saturação.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Latossolo Vermelho submetido ao sistema plantio direto têm suas condições físicas alteradas inicialmente, expressa pela elevada drenagem em baixas tensões, ou seja, a água é drenada rapidamente já no início do processo de secagem, elevada densidade e baixa capacidade de suporte de carga que lhe condiciona maiores deformações quando à aplicação de cargas externas. Com o passar do tempo há uma melhoria nas propriedades físicas, pronunciadas pela maior retenção de água, e aumento da resistência à aplicação de cargas expresso pelas menores deformações relativas.

Neste estudo houve uma lacuna entre o tempo de manejo do sistema de plantio direto, compreendida de 5,5 anos até 14, o qual poder-se-ia chegar a um prognóstico mais detalhado do efeito ao longo do tempo desse sistema nas propriedades físico-hídrico-mecânicos.

O presente estudo demonstra que o tempo de uso desse sistema de manejo não pode ser deixado de lado em investigações, pois possui influência direta nas propriedades do solo.

A capacidade de suporte do solo na área de PD com 14 anos manifesta-se maior que na área com 5,5 anos, atribuindo uma maior resistência a pressões originadas pelo tráfego de máquinas, oferecendo menores deformações a estrutura e menor índice de vazios, mas maior grau de saturação inicial, o que pode oferecer maior disponibilidade de água as plantas.

Os efeitos da compactação encontrados aqui podem ser menos intensivos em solos de textura arenosa, em face da estrutura física menos suscetível a esses efeitos, contudo, chama-se atenção para os problemas que podem estar ocorrendo nas lavouras do Rio Grande do Sul, pois o que se observa em boa parte do estado é a falta de rotação de culturas que está sendo conduzida pelos agricultores de forma de sucessão de cultura, assim sendo, não se tem um “revolvimento” biológico que é realizado pela diversificação das raízes, bem como, esta sucessão não propicia atividade biológica do solo tão importante na manutenção da estrutura física do solo.

Para futuras pesquisas fica a sugestão de estudos em lavouras com diferentes tempos de implantação do sistema de plantio direto que empregam: à

sucessão de culturas, o tráfego sem controle algum do nível de umidade que se encontra o solo, e, em solos do planalto médio do Rio Grande do Sul, em virtude da elevação da umidade do solo no período de cultivo das culturas agrícolas e, bem como, em solos com teor de argila acima de 50%, pois os efeitos devem ser mais pronunciados.

9. REFERÊNCIAS

ABNT, NBR 12007: **ensaio de adensamento unidimensional**. Rio de Janeiro, 1990, 13 p.

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 519-531, Maio/Jun. 2004.

ALBUQUERQUE, J. A. et al. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, n. 1, p. 115-119, 1995.

ALEXANDROU, A.; EARL, R. The relationship among the pre-compaction stress, volumetric water content and initial dry bulk density of soil. **Journal of Agricultural Engineering Research**, New York, v. 71, n. 1, p. 75-80, Sept. 1998.

AMADO, T. J. C. et al. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 189-197, 2001.

ASSIS, R. L. de; LANÇAS, K. P. Avaliação da compressibilidade de um Nitossolo Vermelho distroférico sob plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 515-522, jul./ago. 2005.

ARVIDSSON, J.; KELLER, T. Soil precompression stress I. A survey of Swedish arable soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 77, n. 1, p. 85–95, May. 2004.

BERTOL, I.; SANTOS, J. C. P. Uso do solo e propriedades físico-hídricas no Planalto Catarinense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, n. 2, p. 263-267, Fev. 1995.

_____ et al. Propriedades físicas de um Cambissolo húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 555-560, Mai./Jun. 2001.

BEUTLER, A. N. et al. Agregação de Latossolo Vermelho distrófico típico relacionada com o manejo na região dos Cerrados no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 129-136, 2001.

_____ et al. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 829-834, 2002.

BLAINSKI, E. et al. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 975-983, maio./junho 2008.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 13th ed. New Jersey: [s.n.], 2002. p. 177-217.

BRANCALIÃO, S. R.; MORAES, M. H. Alterações de alguns atributos físicos e das frações húmicas de um Nitossolo Vermelho na sucessão milheto-soja em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p.393-404, jan./fev. 2008.

BRAIDA, J. A. **Acúmulo de resíduos vegetais na superfície e de matéria orgânica no solo e suas implicações no comportamento mecânico do solo sob plantio direto**. 2004. 106 f. Tese de Doutorado (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

BRAIDA, J. A. et al. Elasticidade do solo em função da umidade e do teor de carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 477-485, mar./abr. 2008.

BRAIDA, J. A.; CASSOL, E. A. Relações de erosão em entressulcos com o tipo e a quantidade de resíduo vegetal na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 711-721, 1999.

BRANDT, A. A. **Propriedades mecânicas de solo franco arenoso sob distintos sistemas de preparo, tráfego mecanizado e resíduos vegetais**. 2005. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

CANARACHE, A.; HORN, R.; COLIBAS, I. Compressibility of soils in a long term field experiment with intensive deep ripping in Romania. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 56, n. 1-2, p.185-196, Aug. 2000.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 14, n. 1, p. 99-105, 1990.

CASAGRANDE, A. The determination of the pré-consolidation load and its practical significance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1936, Cambridge. **Proceedings...** Cambridge: Harvard University, 1936. D-34, p. 60-64.

CASSOL, E. A.; DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A. Sistema plantio direto: Evolução e implicações sobre conservação do solo e da água. In: CERETTA, C.A.; SILVA, L.S.; REICHERT, J.M. (OrgS.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v. 5, p.333-369.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade de agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em

função de sistemas de plantio, rotação de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 3, p. 527-538, 1998.

CAVALIERI, K. M. V. et al. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 137-147, jan./fev. 2006.

COLLARES, G. L. et al. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 933-942, maio/junho 2008.

COQUET, Y. et al. Vertical variation of near saturated hydraulic conductivity in three soil profiles. **Geoderma**, Amsterdam, v. 126, n. 3-4, p.181- 191, Jun. 2005.

COREY, A. T. Air Permeability. In Klute (Ed.) **Methods of soil analysis. Part 1**. 2th ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 1121-1136.

COSTA, F. S. et al. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 527-535, maio/junho 2003.

_____ et al. Estoque de carbono orgânico e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 323-332, jan./fev. 2008.

CRUZ, A. C. R. et al. Atributos físicos e carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p.1105-1112, nov./dez. 2003.

CENTURION, J. F.; DEMATTÊ, J. L. I. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 9, n. 3, p. 263-266, 1985.

CULTIVAR. Plantio direto ocupa 70% das áreas de lavoura de grãos. Disponível em: <<http://www.grupocultivar.com.br/noticias/noticia.asp?id=36373>>. Acesso em: 26 nov. 2009.

DA ROS, C. O. et al. Influência do tempo de cultivo no sistema plantio direto nas características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 26, n. 3, p. 397-400, dez. 1996.

DANIEL, L. A.; MARETTI, H. J. Avaliação de camada de solo compactada e análise de crescimento de plantas. In: SILVEIRA, G. M. (Coord.). Ciclo de estudos sobre mecanização agrícola, 4., 1990, Jundiaí. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, 1990. p. 22-33.

DAO, T. H. Tillage and winter wheat residue management effects on water infiltration and storage. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, n. 6, p. 1586-1595, Nov. 1993.

DEBIASI, H. **Recuperação física de um Argissolo compactado e suas implicações sobre o sistema solo-máquina-planta**. 2008. 263 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

De MARIA, I. C.; CASTRO, O. M.; DIAS, H. S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p.703-709, 1999.

DENARDIN, J. E. Solo: constituição e degradação. In: MARCANTONIO, G. (Ed.). **Solos e irrigação**. Porto Alegre: UFRGS / FEDERACITE, 1992. p. 13-28.

DERPSCH, R et al. **Controle da erosão no Paraná, Brasil: sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo**. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 1991. 272 p.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A. **Sistema de produção em plantio direto**. Passo Fundo: EMBRAPA trigo, 1998. 5 p. (Comunicado Técnico Online, 14)

DIAS Jr, M. de S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, n. 2, p. 175-182, mar./abr. 1996.

ELLIES, A.; GREZ, R.; RAMIREZ, C. La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta para el diagnostico de la estructura del suelo. **Agro Sur**, Valdivia, v. 5, n. 1, p. 51-56, Jun. 1997.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: 2. ed. ver. atual. [S.l.], 1997. 212 p.

_____. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: EMBRAPA. 2006, 412 p.

ESTAT 2.0 Sistema de análise estatística. Jaboticabal: Pólo Computacional - Departamento de Ciências Exatas – UNESP, 1992.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA - FEBRAPDP. **Evolução da área com plantio direto no Brasil – dados estatísticos**. Disponível em: <<http://www.febrapdp.org.br/arquivos/BREvolucaoPD2002a2006.pdf>>. Acesso em: 16 dez. 2009.

FONTANELA, E. Parâmetros físico-hídricos de um Latossolo sob diferentes sistemas de manejo e níveis de tráfego. 2008. 78 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

FRANZLUEBBERS, A. J. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 66, n. 2, p. 197-205, Jul. 2002.

GENRO Jr., S. A. et al. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho e produtividade de culturas cultivadas em sucessão e rotação, **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 1, p. 65-73, jan./fev. 2009.

GOEDERT, W. J. et al. Estado de compactação do solo em áreas cultivadas no sistema de PD. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 2, p. 223-227, 2002.

GOMAR, E. P. et al. Atributos do solo e biomassa radicular após quatro anos de semeadura direta de forrageiras de estação fria em campo natural dessecado com herbicidas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 1, p. 211-223, jan./fev. 2002.

HÅKANSSON, I.; DANFORS, B. Effect of heavy traffic on soil conditions and crop growth. In: PROCEEDINGS OF THE SEVENTH CONFERENCE ON THE ISTVS, 7., 1981, Calgary (Canada). **Anais...** Canada: International Society of Terrain-Vehicle Systems , 1981. pp. 239–253.

_____ ; VOORHEES, W. B.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop responses in different traffic regimes. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, n. 3-4, p. 239-282, Jun. 1988.

_____ ; REEDER, R. C. Subsoil compaction by vehicles with high axle load – extent, persistence and crop response. **Soil Tillage & Research**. Amsterdam, v. 29, n. 2–3, p. 277–304, Mar./June 1994.

_____ ; MEDVEDEV, V. W. Protection of soils from mechanical overloading by establishing limits for stresses caused by heavy vehicles. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.35, n. 1-2, p.85-97, Aug.1995.

_____ ; VOORHEES, W.B. Soil compaction. In: LAL, R. et al. (Org.). **Methods for assessment of soil degradation**. Florida: Lewis Publishers, 1996. p.167-179.

_____. **Machinery-induced compaction of arable soils:** incidence, consequences, counter-measures. Sweden: Dept, of Soil Sciences, Division of Soil Management, 2005. 153 p.

HARTGE, K. H.; HORN, R. **Die physikalische Untersuchung von Böden.** Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1992. 177 p.

HENKLAIN, J. C . Efeito do preparo sobre as características do solo. In: PEIXOTO, R. T. G.; AHRENS, D. C.; SAMAHA, M. J. (Eds.). **Plantio direto o caminho para uma agricultura sustentável.** Ponta Grossa: IAPAR, 1997. p. 206-221.

HERNANI, L. C.; SALTON, J. C. Conceitos. In: SALTON, J. C.; HERNANI, L. C.; FONTES, C. Z. (Orgs.) Sistema plantio direto, O produtor pergunta, a EMBRAPA responde. Brasília: EMBRAPA-SPI; Dourados: EMBRAPA-CPAO, 1998. 248 p.

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

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

_____ et al. Soil physical properties related to soil structure. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 30, n. 2-4, p.187-216, Jun. 1994.

_____; van den AKKER, J. J. H.; ARVIDSSON, J. Subsoil compaction: distribution, processes and consequences. **Advances in Geocology, Reiskirchen**, Catena, v. 32, 2000. p. 462.

_____; FLEIGE, H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1, p. 89–99, Jan./Apr. 2003.

_____ ; WAY, T.; ROSTEK, J. Effect of repeated tractor wheeling on stress/ strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1-2, p. 101-106, Oct. 2003

IBGE. Censo agropecuário do estado do Rio Grande do Sul em 2008. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=rs>. Acesso em: 16 dez. 2009.

JORAJURIA, C. D.; DRAGHI, L. Sobrecompactación del suelo agrícola parte i: influencia diferencial del peso y Del número de pasadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 3, p. 445-452, Set./Dez. 2000.

KLEIN, V. A.; BOLLER, W. Avaliação de diferentes manejos de solo e métodos de semeadura em áreas sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n. 3, p. 395-398, 1995.

_____ ; LIBARDI, P. L. Condutividade hidráulica de um Latossolo roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 6, p. 945-953, dez. 2002.

KLUTE, A. Water retention: Laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. cap. 26, p. 635-660.

KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 211-218, 1999.

KOOLEN, A. J. Mechanics of soil compaction. In: SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. (Eds.) **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994, p. 45-69.

KLEIN, V. A.; BOLLER, W. Avaliação de diferentes manejos de solo e métodos de semeadura em áreas sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n. 3, p. 395-398, 1995.

LARSON, W. E.; GUPTA, S. C.; USECE, R. A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 3, p. 450-457, May. 1980.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, Amsterdam, v. 123, n. 1-2, p.1-22, Nov. 2004.

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

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2. ed. Piracicaba: EDUSP, 2000. 509 p.

LIMA, C. L. R. de et al. Compressibilidade de um Argissolo sob plantio direto escarificado e compactado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1765-1772, nov./dez. 2006.

MACHADO, R. L. T. et al. Avaliação do desempenho de escarificador em Planossolo. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 2, n. 2, p. 151-154, 1996.

MACHADO, J. L. et al. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 495-502, mar./abr. 2008.

MELLO, C.R.; et al. Predição da porosidade drenável e disponibilidade de água para Cambissolos da Microrregião Campos das Vertentes, MG. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 9, p. 1319-1324, set. 2002.

MERTEN, G. H.; MIELNICZUK, J. Distribuição do sistema radicular e dos nutrientes em Latossolo Roxo sob dois sistemas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 15, n. 2, p. 369-374, 1991.

MOLDRUP, P. et al. Tortuosity, diffusivity, and permeability in the soil liquid and gaseous phases. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n. 3, p. 613– 623, May. 2001.

_____ et al. Air permeability in Undisturbed volcanic ash soils: predictive model test and soil structure fingerprint. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 67, n. 1, p. 32-40, jan./fev. 2003.

MUSY, A.; SOUTTER, M. **Physique du sol**. Laussane: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1991. 335 p.

OLIVEIRA, G. C. de et al. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 2, p. 291-299, jul. 2003.

OLIVEIRA, C. Q. et al. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 327-336, mar./abr. 2004.

PALADINI, F. L. S.; MIELNICZUK, J. Distribuição de tamanho de agregados de um Podzólico Vermelho-Escuro afetado por sistema de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 15, n. 1, p. 135-140, 1991.

PEREIRA, A. A. A.; CRUCIANI, D. E. Estimativa de variações no coeficiente relativo de difusão dos gases no solo com base na análise da curva de retenção de água. Santa Maria. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 2, p. 245-249, mar./abr. 2001.

PETRY, M. T. et al. Disponibilidade de água do solo ao milho cultivado sob sistemas de semeadura direta e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 531-539, maio/junho 2007.

PHILLIPS, S. H.; YOUNG Jr. H. M. **No-tillage farming**. Milwaukee: Reiman Associates, 1973. 224 p.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C.A.; SILVA, L.S.; REICHERT, J.M. (Orgs.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2008. v. 5, p. 49-134.

_____ et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 2, p. 242–254, Mar. 2009.

REINERT, D. J. et al. Efeito de diferentes métodos de preparo do solo sobre a estabilidade de agregados em solo Podzólico Vermelho-Amarelo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 14, n. 1, p. 19-25, 1984.

_____; ROBAINA, A. D.; REICHERT, J. M. COMPRESS – Software e proposta de modelo para descrever a compressibilidade dos solos e seus parâmetros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Viçosa. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. 1 CD-ROM.

_____. **Soil structural form and stability induced by tillage in a typic hapludalf**. 1990. 128f. Thesis (Doctorate in Crops and Soil Science) - Michigan State University, East Lansing.

RASMUSSEN, P. E.; COLLINS, H. P. Longterm impacts of tillage, fertilizer, and crop residue on soil organic matter in temperate semiarid regions. **Advances in Agronomy**, Newark, v. 45, n. 1, p. 93-134, 1991.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 188 p.

_____; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2. ed. Barueri: Manole, 2008. v. 1. 478 p.

RICHART, A. et al. Compactação do solo: causas e efeitos. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, julho/set. 2005.

ROSA, D. P. da. **Comportamento dinâmico e mecânico do solo sob níveis diferenciados de escarificação e compactação**. 2007. 122 f. Dissertação (Mestrado em Eng. Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

_____ et al. Esforços e mobilização provocada pela haste sulcadora de semeadora, em Latossolo escarificado em diferentes épocas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 3, p. 396-400, mar. 2008.

_____. **Relação solo-máquina-planta num Argissolo cultivado e sob campo nativo**. 2009. 109 f. Tese (Doutorado em Eng. Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

RÜCKNAGEL, J. et al. Estimating precompression stress of structured soils on the basis of aggregate density and dry bulk density. **Soil Tillage & Research**, Amsterdam, v. 92, n.1-2, p. 213-220, Jan. 2007.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico Vermelho-Escuro de Eldorado do Sul (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 19, n. 2, p. 313-319, 1995.

SALIRE, E. V.; HAMMEL, J. E.; HARDCASTLE, J. H. Compression of intact subsoils under short-duration loading. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 31, n. 2-3, p. 235-248, Aug. 1994.

SECCO, D. et al. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 5, p. 797-804, set./out. 2004

_____ et al. Atributos físicos e produtividade de culturas de um Latossolo Vermelho Argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 407-414, maio/junho 2005.

SEIXAS, J.; ROLOFF, G.; RALISCH, R. Tráfego de máquinas e enraizamento do milho em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 4, p. 794-798, julho/ago. 2005.

SILVA, J. R. et al. **Correlação entre esforços de tração e profundidade de subsolagem**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1984. 18 p. (Boletim Técnico, n. 96).

SILVA, A. P. da; KAY, B. D. Estimating the least limiting water range of soil from properties and management. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, n. 3, p. 877-883, May/Jun. 1997.

SILVA, C. L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 32, n. 2, p. 213-220, fev. 1997.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Sistemas de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 311-317, abr./jun. 1998.

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. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 5, p.795-801, set./out. 2000a.

_____. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 2, p.239-249, 2000b.

_____. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. II - grau de saturação em água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 1, p. 9-15, 2002.

SILVA, R. B. et al. Influência do preparo inicial sobre a estrutura do solo quando da adoção do sistema plantio direto, avaliada por meio da pressão de preconsolidação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 961-971, nov./dez. 2003.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V.; LIMA, J. F. W. F. Efeito de sistemas de uso e manejo nas propriedades físico-hídricas de um Argissolo Amarelo de Tabuleiro Costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 833-842, nov./dez. 2005a.

SILVA, M. A. S. et al. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 544-552, maio./junho 2005b.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 6, p.921-930, nov./dez. 2006.

SILVA, S. R.; BARROS, N. F.; COSTA, L. M. Atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 4, p.842-847, out./dez. 2006.

SILVA, V. R. da. Variação na temperatura do solo em três sistemas de manejo na cultura do feijão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 3, p.391-399, maio./junho 2006c.

SILVA, F. de F. da. et al. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho cultivado no sistema plantio direto. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 2, p. 191-204, abr./junho. 2008.

SILVEIRA, P. M.; STONE, L. F. Sistemas de preparo do solo e rotação de culturas na produtividade de milho, soja e trigo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 240-244, maio./ago. 2003.

SILVEIRA, P. M. da et al. Efeitos do manejo do solo sob plantio direto e de culturas na densidade e porosidade de um Latossolo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 24, n. 3, p. 53-59, julho/set. 2008.

SPERA, S. T. et al. Soil compaction in southern Brazilian Oxisols under no-till system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LAND DEGRADATION AND MEETING OF THE IUSS SUBCOMMISSION C - SOIL AND WATER CONSERVATION, 3., 2001, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: Embrapa Solos/Viçosa & Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. p. 1-3.

_____ et al. Efeito de sistemas de manejo de solo e de rotação de culturas em atributos físicos de solo, no Rio Grande do Sul. In: WORLD CONGRESS ON CONSERVATION AGRICULTURE, 2., 2003, Foz de Iguaçu. **Anais...** Foz de Iguaçu: Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha & Confederación de Asociaciones Americanas para la Agricultura Sustentável, 2003. p. 518-521.

SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. van. Soil compaction problems in world agriculture. In: SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. van, (Eds). **Soil compaction in crop production**. Netherlands: Elsevier, 1994. p. 01-21.

SOUZA, E. D.; CARNEIRO, M. A. C.; PAULINO, H. B. Atributos físicos de um Neossolo Quartzarênico e um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de

manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 11, p. 1135-1139, Nov. 2005.

STONE, L. F.; GUIMARAES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 207-212, 2002.

STRECK, C. A. et al. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 755-760, maio/jun. 2004.

_____. **Índice s e fluxo de água e ar em solos do sul do Brasil**. 2007. 96 f. Tese (Doutorado em Ciência do solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SUZUKI, L. E. A. S. et al. Teor de argila de solos sob diferentes tempos de agitação horizontal, tempo de contato do dispersante químico e dispersão mecânica. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004. 1 CD-ROM.

_____. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas do solo e crescimento e rendimento de culturas**. 2005. 159 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

_____ et al. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 8, p. 1159-1167, Ago. 2007.

_____ et al. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 963-973, maio/junho 2008.

TACKETT, J. L.; PEARSON, R. W. Oxygen requirements for cotton seedling root penetration of compacted soil cores. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 28, n. 5, p. 600–605, Sept. 1965.

TEDESCO, M. J. et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. rev. e ampl. Porto Alegre: Departamento de Solos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul : UFRGS, 1995. 174 p.

TESSIER, S.; LAGUE, C. Soil compaction by liquid manure tanker. **Transactions of ASAE**, Michigan, v. 34, n. 2, p. 402-413, Mar./Apr. 1991.

TORMENA, C. A.; ROLLOF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, n. 2, p. 333-339, 1996.

_____; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 301-309, 1998.

_____; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 4, p.573-581, 1998.

VAN GENUCHTEN, M. T. H. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, Sep. 1980.

VEIGA, M. da et al. Short and long-term effects of tillage systems and nutrient sources on soil physical properties of a southern brazilian Hapludox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p.1437-1446, Jul./Ago. 2008.

WANG, D.; YATES, S. R.; ERNST, F. F. Determining soil hydraulic properties using tension infiltrometers, time domain reflectometry, and tensiometers. . **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, n. 2, p. 318-325, Mar./Apr. 1998.