

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**RELAÇÃO SOLO-MÁQUINA-PLANTA NUM
ARGISSOLO CULTIVADO E SOB CAMPO NATIVO**

TESE DE DOUTORADO

David Peres da Rosa

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

RELAÇÃO SOLO-MÁQUINA-PLANTA NUM ARGISSOLO CULTIVADO E SOB CAMPO NATIVO

por

David Peres da Rosa

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Máquinas agrícolas, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Agrícola.**

Orientador: Prof. José Miguel Reichert

Santa Maria, RS, Brasil

2009

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola**

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

**RELAÇÃO SOLO-MÁQUINA-PLANTA NUM ARGISSOLO
CULTIVADO E SOB CAMPO NATIVO**

elaborada por
David Peres da Rosa

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Agrícola

Comissão Examinadora:

José Miguel Reichert, PhD.
(Presidente/Orientador)

José Fernando Shlosser, Dr. (UFMS)
(Co-orientador)

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

Cássio Antônio Tormena, Dr. (UEM)

Renato Levien, Dr. (UFRGS)

Santa Maria, 17 de agosto de 2009

"O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano."

Isaac Newton.

AGRADECIMENTOS

Ao professor José Miguel Reichert, pela troca de conhecimentos durante todo este período, orientação e amizade.

Ao professor Dalvan José Reinert, por sua amizade e momentos de descontração durante o período do estudo.

Aos professores Renato Levien e Jackson Adriano Albuquerque, pelas orientações e estímulos prestados durante a tese, os quais foram essenciais para sua finalização.

Ao Luiz Cunha Dutra da secretaria do Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, pela grande cooperação nos momentos precisos, bem como sua amizade, conselhos e estímulos.

Ao prof. Reimar Carlesso, pelo empréstimo de equipamentos eletrônicos, sendo sempre prestativo e amigo.

Ao bibliotecário do CCR Luiz Marchiotti Fernandes por sua dedicação e empenho na formatação deste documento às normas da UFSM.

Aos colegas que se tornaram grandes amigos, João Fernando Zamberlan, Marcelo Madalosso e Marcelino Knopp, pelas trocas de informações, amizade e momentos de descontração.

Ao grande Prof. Hercules do colégio Politécnico da UFSM, pelo empréstimo de maquinários agrícolas, bem como pela troca de idéias.

Aos funcionários do Departamento de Solos, Pozobom e Seu Luiz, pela ajuda e descontração nos momentos necessários.

Aos amigos do Laboratório de Física do Solo, pelos momentos de trabalho e amizade, Fabiano Braga, Douglas Rodrigo Kaiser, Leonir Uhde, Paulo Gubiani, Luis Eduardo A. S. Suzuki e Maurício Kunz.

Um agradecimento especial aos bolsistas e grandes amigos que foram essenciais para execução deste trabalho, pois sem eles nada disso teria acontecido, Marcelo Ivan Mentges, Davi Alexandre Vieira, Claudia Alexandra Barros e Eduardo Volgemann.

Sem esquecer os meus novos irmãos Jovani Zalamena, Douglas Antônio Rogeri e tio Mauro, pelos momentos de descontração e de conversas, e também do apoio do grande Jovani na correção dessa tese.

Ao meu irmão Jonathan, por toda sua força e incentivo transmitidos, mesmo estando longe, sem ele não sei onde estaria agora.

Ao grupo de amizades Marcelo Kunz e Simone Noemberg, João Pelegrini e Monaliza Pelegrini, João Batista e Eliane, Denise Cecconi e Igor Polleto pelos momentos de descontração proporcionados, dos quais sinto tantas saudades.

A minha tia Gelsa e primas Vanessa e Kely, pelo apoio e carinho sempre transmitidos. Sem esquecer a minha madrinha Glésia (in memorian), que sempre me apoiou e deu força para alcançar este título, parte do meu sucesso deve-se a ela.

A minha outra família, Hélio e Maria Trevisan (sogro e sogra), Avelino e Ionete Guadagnin (concunhado e cunhada) e minhas sobrinhas Maria Carolina e Patrícia, que me deram tanto apoio e carinho até este momento.

Em especial, a minha esposa Vanderleia Trevisan da Rosa, que além de me incomodar e dar uns “tapas” às vezes por trabalhar tanto, me apoiou, ajudou e deu todo o seu amor e principalmente um herdeiro.

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

RESUMO

Tese de Doutorado

Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola

Universidade Federal de Santa Maria.

RELAÇÃO SOLO-MÁQUINA-PLANTA NUM ARGISSOLO CULTIVADO E SOB CAMPO NATIVO

Autor: David Peres da Rosa

Orientador: José Miguel Reichert

Santa Maria, agosto de 2009

Os efeitos nocivos da compactação nos solos agrícolas vêm resultando em condições impróprias para o desenvolvimento de plantas. O objetivo deste trabalho foi realizar um estudo sobre o efeito do tráfego em parâmetros físico-mecânicos do solo submetido a diferentes manejos, bem como, sua influência na máquina e na planta. Foi investigado um Argissolo Vermelho-Amarelo sob semeadura direta, cultivo mínimo e campo nativo. No solo sob semeadura direta foram investigados os seguintes tratamentos: a) semeadura direta (testemunha); b) semeadura direta com 24,79Mgkm ha⁻¹ e c) 49,59Mgkm ha⁻¹; d) solo há 6 meses sob cultivo mínimo; e e) cultivo mínimo em solo compactado (tráfego de 10Mg de peso total). Adicionalmente, diferentes tratamentos foram avaliados em um solo sob campo nativo, a saber: (a) campo nativo (testemunha); (b) campo nativo com compactação adicional; (c) campo nativo dessecado; e (d) campo nativo dessecado com compactação adicional. Foram avaliadas as propriedades físicas (porosidade, densidade do solo, condutividade ao ar e hidráulica saturada) e mecânicas do solo (tensão de pré-consolidação, coeficiente de compressão e deformação relativa), bem como parâmetros da planta (massa seca de raiz e desenvolvimento radicular) e relativos à máquina (esforço horizontal, vertical e tração). O tráfego reduziu a porosidade do solo, a condutividade ao ar e a hidráulica saturada, resultando no incremento da resistência do solo à penetração, porém, não refletiu no aumento da densidade. As propriedades físicas não foram alteradas com o aumento do tráfego de 24,79Mgkm ha⁻¹ para 49,59Mgkm ha⁻¹. A escarificação não reduziu os efeitos da compactação induzida pela pá-carregadora, demonstrando que ações além das práticas mecânicas devem ser realizadas. O tráfego de máquinas afetou as propriedades físicas do solo sob campo nativo, reduzindo a porosidade e a macroporosidade, aumentando a densidade do solo. Isso resultou em um incremento acima de 20% da resistência à penetração do solo. Contudo, deve ser enfatizado que, mesmo com a intensidade de tráfego usado nesse estudo, as condições físicas resultantes permitem o uso para agricultura, mas devem ser tomadas as devidas precauções para a utilização do solo nestas condições.

Palavras-chave: esforços, compactação, fluxo de ar.

ABSTRACT

Doctor Science Thesis

Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola

Universidade Federal de Santa Maria.

PLANT-MACHINE-SOIL RELATIONSHIP: EFFECTS AND BEHAVIOR IN A CULTIVATED HAPLUDALF AND UNDER GRASSLAND

Author: David Peres da Rosa

Advisor: José Miguel Reichert

Santa Maria, August 2009

The negative effects due to soil compaction in agricultural soils may result in inappropriate conditions for plant growth. This study was aimed at evaluating the traffic effect on physical and mechanical soil properties as well as its influence on machines and plants by taking into account different managements. An area with an Hapludalf was assessed under different treatments, namely: no-tillage, minimum tillage, and native grassland. The following treatments were evaluated: (a) soil under no-tillage (control) (b) soil under no-tillage with traffic intensity of 24.79 Mg km ha⁻¹ and (c) 49.59 Mg km ha⁻¹; (d) soil after 6 months of minimum tillage; and (e) under minimum tillage compacted with traffic (10 Mg total weight). Additionally, different treatments were analyzed for a site under native grassland (a) common level of compaction (control); (b) additional compaction; (c) soil with herbicide applications; and (d) additional compaction on soil with herbicide applications. Physical soil properties (porosity, bulk density, and permeability) and mechanical soil properties (preconsolidation stress, compression index, and relative deformation) as well as parameters associated to plant (root biomass and root growth) and machine (horizontal e vertical efforts) were evaluated in this study. The traffic reduced soil porosity and air and water flow, thus increasing soil penetration resistance, but soil density was not increased. The physical soil properties were not altered due to the change in traffic intensity (24.79 Mg km ha⁻¹ and 49.59 Mg km ha⁻¹). The chiseling operation did not reduce soil compaction, thus clearly demonstrating that operations other than mechanical ones should be applied. The machine traffic had influence on physical soil properties in such a way that both microporosity and macroporosity were reduced, whereas bulk density was increased. As a result of these modifications, soil penetration resistance was increased by over 20%. It should be emphasized that even with the traffic intensity used in this study, the current physical conditions allow farmers to use agriculture on the site studied; however, precaution should be taken on this type of land-use.

Key word: forces, compaction, air flux.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Precipitação mensal acumulada durante o estudo (fonte: INMET 2008)	27
FIGURA 2 - a) Compactação do Argissolo Vermelho Amarelo antes da escarificação. b) Deformação do solo após o tráfego.	30
FIGURA 3 - Delimitação da área de contato pneu-solo.....	31
FIGURA 4 - Máquinas usadas no experimento. a) Trator (72cv) tracionando a semeadora; b) trator (92cv) tracionando o subsolador.....	33
FIGURA 5 - a) Coleta de amostras de solo, b) Cilindros, extratores e martelo na trincheira de coleta.	34
FIGURA 6 - Permeâmetro de carga constante de ar.....	37
FIGURA 7 - Ilustração do funcionamento do permeâmetro de carga constante de ar.	37
FIGURA 8 - Avaliação do perfil cultural. a) Uso de malha no perfil; b) exposição da raiz	40
FIGURA 9 - a) Obtenção dos esforços solicitados a haste sulcadora no campo. b) Anel octogonal acoplado a haste sulcadora.	41
FIGURA 10 - Macroporosidade com a porosidade total e resistência à penetração de um Argissolo Vermelho-Amarelo.....	47
FIGURA 11 - Incremento da resistência à penetração (RP) ao longo do perfil de solo sob semeadura direta imposta pelo tráfego.	50
FIGURA 12 - Resistência à penetração em função da densidade do Argissolo Vermelho-Amarelo.	51
FIGURA 13 - a) Resistência à penetração do Argissolo Vermelho sob semeadura direta e cultivo mínimo e b) umidade gravimétrica	57
FIGURA 14 - Resistência à penetração (kPa) do Argissolo Vermelho submetido a níveis de compactação e manejo diferentes na semeadura do milho.....	59

FIGURA 15 - Resistência e teor de água do Argissolo Vermelho submetido à semeadura direta e cultivo mínimo (a planta encontrava-se na parte central) na fase de floração do milho.	62
FIGURA 16 - Distribuição do sistema radicular no Argissolo Vermelho-Amarelo sob semeadura direta e cultivo mínimo.	64
FIGURA 17 - Percentis do esforço tração (a) e do esforço de horizontal (b) nos tratamentos.	69
FIGURA 18 - Percentis dos esforços verticais.....	69
FIGURA 19 - a) Compactação do Argissolo Vermelho-Amarelo sob campo nativo. b) resultado da compactação	78
FIGURA 20 - Torvane para medição da resistência do solo ao cisalhamento.....	80
FIGURA 21 - Perfilômetro desmontável usado para mensurar a profundidade de trabalho da haste sulcadora.	81
FIGURA 22 - Relação volume de macroporos (Ma) e o volume total de poros (Pt) em diferentes camadas do Argissolo Vermelho-Amarelo sob campo nativo.....	86
FIGURA 23 - Variação da macroporosidade no Argissolo Vermelho Amarelo sob campo nativo.....	87
FIGURA 24 - <i>Box plot</i> do esforço horizontal e de tração solicitados à haste sulcadora da semeadora no Argissolo Vermelho-Amarelo sob campo nativo.....	90
FIGURA 25 - <i>Box plot</i> do esforço vertical solicitados à haste sulcadora da semeadora no Argissolo Vermelho-Amarelo sob campo nativo.....	91

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Composição granulométrica do Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico em estudo	28
TABELA 2 – Teor de água no dia da execução da compactação, limites de plasticidades e estado de consistência do Argissolo Vermelho-Amarelo.	29
TABELA 3 – Especificações da pá-carregadora usada para compactação do Argissolo Franco argilo arenoso.....	30
TABELA 4 - Descrição do trator e pulverizador usado na compactação do solo sob semeadura direta.	31
TABELA 5 – Trator usado para tracionar o subsolador.	32
TABELA 6 – Especificações da semeadora- adubadora empregada no experimento.	33
TABELA 7 – Teor de água médio (kg kg^{-1}) do solo nos tratamentos, no momento que passou a haste sulcadora.....	42
TABELA 8 – Macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (Pt), densidade (Ds) e resistência à penetração (RP) médios do Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes manejos.	45
TABELA 9 – Condutividade ao ar (K_{ar}) e hidráulica saturada ($K_{\theta s}$) médios nos tratamentos em estudo.....	53
TABELA 10 – Massa seca de raiz média de milho em Argissolo Vermelho sob semeadura direta com intensidades de tráfego diferenciadas e cultivo mínimo.....	66
TABELA 11 – Momento e profundidade de trabalho da haste sulcadora.	72
TABELA 12 – Composição granulométrica do Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico em estudo	77
TABELA 13 - Valores médios de macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (Pt) e densidade (Ds) de um Argissolo Vermelho-Amarelo sob campo nativo.....	83
TABELA 14 - Resistência média ao cisalhamento de um Argissolo Vermelho submetido a dois tratamentos.	88

SUMÁRIO

SUMÁRIO	12
1 INTRODUÇÃO GERAL	14
2 HIPÓTESES.....	16
3 OBJETIVOS.....	17
3.1 REFERÊNCIAS	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
4 CAPÍTULO 1.INTENSIDADE DE TRÁFEGO: EFEITO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E DESEMPENHO DE UM SULCADOR NUM ARGISSOLO SOB SEMEADURA DIRETA E CULTIVO MÍNIMO.....	18
4.1 INTRODUÇÃO.....	18
4.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
4.2.1 Efeito da compactação no fluxo de ar e água no solo	20
4.2.2 Efeito do tráfego na demanda de esforços em semeadoras	21
4.2.3 Efeito da compactação do solo na planta.....	23
4.2.1 Prática de descompactação do solo.....	25
4.3 MATERIAL E MÉTODOS	27
4.3.1 Caracterização da área experimental.....	27
4.3.2 Solo	28
4.3.3 Tratamentos e delineamento experimental empregado	28
4.3.4 Especificações das máquinas e operações utilizadas.....	29
4.3.5 Coleta das amostras de solo	34
4.3.6. Determinações realizadas	35
f) Esforços solicitados à haste sulcadora.....	41
4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
4.4.1 Efeito da compactação nas propriedades físicas do solo.....	44
4.4.2 Efeito da intensidade de tráfego e manejo na condutividade ao ar e hidráulica saturada do solo.....	51

4.4.3	<i>Efeito do manejo e do tráfego na relação solo-planta-máquina.....</i>	57
4.5	CONCLUSÕES	73
4.6	REFERÊNCIA	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
5	CAPÍTULO 2. ALTERAÇÕES FÍSICAS E MECÂNICAS DO SOLO SOB CAMPO NATIVO IMPOSTAS PELO TRÁFEGO E DESSECAÇÃO	74
5.1	INTRODUÇÃO.....	74
5.2	MATERIAL E MÉTODOS	77
5.2.1	Caracterização da área experimental.....	77
5.2.2	Solo	77
5.2.3	Tratamentos e delineamento experimental empregado	77
5.2.4	Especificações das máquinas e operações utilizadas.....	79
5.2.5	Coleta das amostras.....	79
5.2.6	Determinações realizadas	79
5.3	RESULTADO E DISCUSSÃO.....	82
5.4	CONCLUSÕES	93
5.5	REFERÊNCIAS	96

1 INTRODUÇÃO GERAL

A compactação do solo se tornou um problema crescente na agricultura brasileira em função do uso intensivo de terras agricultáveis. O termo *compactação do solo* está se tornando mais popular no meio científico e no campo, face à sua presença cada vez mais expressiva em solos sob sistema de semeadura direta.

Os problemas oriundos da compactação sub-superficial vêm sendo potencializados pelo não revolvimento do solo, o qual é restrito à linha de semeadura (em torno de 0,13m), pela umidade inadequada quando na implantação e colheita das culturas (SILVA et al., 1984) e utilização inadequada da pressão de insuflagem dos pneus agrícolas (HÅKANSSON, 2005; TESSIER; LAGUE, 1991).

Indicadores de detecção do efeito nocivo da compactação no solo vêm se tornando assunto de pesquisa por vários pesquisadores (SILVA et al., 2000; ABREU et al. 2004; CHAN et al., 2006; WIERMANN et al. 1999), que buscam avaliar os impactos nocivos à estrutura do solo que podem refletir no declínio da produtividade agrícola. Nesse contexto, Czyz (2004) verificou redução da produtividade da cultura de cevada quando aumentou a intensidade de tráfego de um trator (massa no eixo traseiro de 1695kg e 150kPa de pressão de insuflagem) em solos de textura franca, franco arenosa e arenosa sob sistema de preparo convencional do solo. Concomitante a esse pesquisador, Braunack e McGarry (2005) obtiveram melhores rendimentos de cana-de-açúcar sob sistema convencional do solo (uma aração seguida por uma gradagem) em condições de tráfego controlado do que não controlado em um Cambissolo e um Vertissolo.

No solo compactado, há alteração da relação massa-volume, gerando impactos negativos às propriedades físicas do solo, tais como: i. redução da infiltração de água, resultante da quebra da continuidade de poros, causando assim redução no teor de água do solo que, por ventura, serviria ao desenvolvimento da planta (SOAHNE; OUWERKERK, 1995; BRANDÃO et al. 2006); ii. redução da capacidade de aeração ocasionado pela redução dos macroporos do solo (STRECK, et al. 2004); iii. diminuição da permeabilidade ao ar e água gerado pela redução dos macroporos e aumento da densidade, provocando impedimento mecânico ao crescimento do sistema radicular, conforme constatado por Streck et al. (2004) em Argissolo Vermelho-Amarelo de textura arenosa sob semeadura direta.

Como solução desses problemas tem-se a escarificação, porém, fica a dúvida, se ela realmente resolve o problema. O escarificador é considerado por alguns autores como um implemento que consegue deixar mais de 1/3 da cobertura vegetal intacta, mantendo, assim, uma das características idealizadas pelo sistema de semeadura direta (ORTIZ-CAÑAVATE; HERNANZ, 1989; TAYLOR; BELTRAME, 1980). Nesse contexto, Suzuki (2005) encontrou eficiência do escarificador na descompactação do solo até a profundidade de 0,20m de um Latossolo Vermelho sob semeadura direta há seis anos.

Outro problema está na substituição de áreas de campo nativo para áreas agrícolas sem tratamento prévio e o manejo adequado. A substituição de tal sistema gera alterações estruturais físicas no solo que, sem os devidos cuidados, pode resultar em declínio expressivo na produtividade. O uso adequado do manejo da integração lavoura-pecuária é importante na manutenção da pastagem, pois auxilia na sustentabilidade do sistema, sendo que o uso errôneo do sistema deve acelerar a sua degradação (KLUTHCOUSKI, et al., 2005). Tal degradação é originada pela ausência ou mal uso de práticas de conservação e pelo preparo inadequado do solo, bem como sistemas ou métodos de semeadura impróprios, entre outros motivos.

Com a grande expansão das fronteiras agrícolas, em face à crescente demanda mundial por alimentos, tais problemas na estrutura do solo expressos principalmente pela presença da compactação, são uma realidade. A otimização das técnicas de manejo utilizadas no campo é imprescindível, pois resultam na sustentabilidade do sistema. Nesse contexto, este trabalho objetivou realizar um estudo envolvendo parâmetros da relação solo-máquina-planta, a fim de encontrar os efeitos nocivos do tráfego em um Argissolo cultivado e sob campo nativo.

2 HIPÓTESES

O aumento da intensidade de tráfego de um trator de pequeno porte com um pulverizador montado gera aumento da densidade e redução da porosidade de um solo sob semeadura direta. Isso reflete na redução em ambas as condutividades, hidráulica saturada e ao ar, proporcionando uma redução do desenvolvimento radicular. Já em solos sob campo nativo, o tráfego de máquinas reduz o espaço poroso significativamente, repercutindo no aumento da densidade e na resistência do solo à penetração com consecutivo aumento da exigência de tração de uma haste sulcadora de uma semeadora agrícola.

3 OBJETIVOS

Objetivo geral deste estudo foi avaliar a influência da intensidade de tráfego na condutividade ao ar e hidráulica saturada do solo, bem como, a variação da demanda energética de uma haste sulcadora de semeadora agrícola e no desenvolvimento radicular de milho em função das condições físicas impostas ao solo pela compactação.

4 CAPÍTULO 1.

INTENSIDADE DE TRÁFEGO: EFEITO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E DESEMPENHO DE UM SULCADOR NUM ARGISSOLO SOB SEMEADURA DIRETA E CULTIVO MÍNIMO

4.1 Introdução

A maioria dos solos que usam sistema moto-mecanizado vem sofrendo problemas de compactação (HÅKANSSON, 2005) devido ao manejo errôneo do tráfego de tratores e máquinas agrícolas que, em alguns casos, chegam a ter uma área anual de tráfego de pneu muitas vezes maior que a área total de campo. Tudo isso gera alterações nas propriedades do solo.

Alterações impostas pelo tráfego começaram a ser pesquisadas no início da década de 50. Os resultados das pesquisas foram discutidos na época, mas não foram resolvidos (BARNES et al., 1971), sendo abandonados por mais de 20 anos. Atualmente, pesquisas que englobam o tema compactação tornam-se cada vez mais comuns.

As propriedades físicas do solo e alguns fatores relacionados à fisiologia da planta podem determinar o potencial produtivo de uma cultura. Funcionalmente, a estrutura ideal do solo é aquela que permite: i. espaço poroso suficiente e contínuo para o movimento da água e dos gases; ii. resistência do solo à penetração não impeditiva ao crescimento de raízes e da parte aérea da planta (KOPI; DOUGLAS, 1991).

A densidade do solo é outra propriedade diretamente afetada pelo tráfego de máquinas agrícolas, uma vez que com a compressão do solo ocorre a substituição do espaço poroso pela parte sólida. O aumento da densidade foi encontrado por Ball et al. (1997) quando o solo foi submetido à alta intensidade de tráfego de máquinas agrícolas que, nesse caso, foi considerada pesada pelo autor. Nesse contexto, Lima et al. (2006) trabalhando em um Argissolo Vermelho de textura franco arenosa sob semeadura direta, encontraram elevação da densidade de $1,55\text{Mg m}^{-3}$ a $1,73\text{Mg m}^{-3}$, quando o solo foi submetido à compactação adicional por meio de uma pá carregadora com mais de 200kPa de pressão de contato pneu/solo.

O processo de compactação é complexo, pois envolve modificações em propriedades do solo de diferentes naturezas. A compressão do solo, além de causar restrição ao sistema radicular e redução da disponibilidade de água e nutrientes para a planta, causa problemas para o funcionamento dos elementos sulcadores das semeadoras devido à elevada resistência do solo (KLEIN, 1990).

A compressão do solo gera também um aumento da resistência de ruptura que proporcionará um aumento da demanda global de tração, gerando desvantagens como: i. maior desgaste dos mecanismos do trator e implementos agrícolas; ii. maior consumo de combustível e maior patinação. Além desses fatores, a profundidade do sulco de semeadura é reduzida no sentido em que aumenta a compactação (CASÃO JUNIOR et al., 1998).

Analisando os objetivos e a forma como são realizadas as pesquisas em compactação do solo, Silva et al. (2003b) concluíram que a maioria é feita em condições estáticas quase sempre voltada à obtenção de um resultado qualitativo e comparativo, cujas variáveis avaliadas são a densidade do solo e a porosidade. Neste caso, os autores concluíram que três ponderações podem ser feitas: a primeira, as operações agrícolas ocorrem de forma dinâmica, à segunda, a densidade do solo e a porosidade são fortemente dependentes do manejo e a terceira, quase sempre são desconsideradas informações tais como o tipo de pneu, a pressão de insuflagem, pressão de contato, teor de água do solo, a profundidade de trabalho e as especificações técnicas dos implementos utilizados.

O objetivo deste estudo foi avaliar a influência da intensidade de tráfego nas propriedades físicas do solo e sua relação com desenvolvimento de plantas e demanda energética de sulcadores, contribuindo, assim, para o aperfeiçoamento das ações de manejo das máquinas, para minimizar a degradação da qualidade física do solo.

4.2 Revisão bibliográfica

4.2.1 Efeito da compactação no fluxo de ar e água no solo

Uma das propriedades físicas mais influenciadas pela ação antrópica é a condutividade da água e do ar do solo, sendo esses essenciais ao desenvolvimento das plantas, pois regulam os demais fatores físicos do solo que influenciam diretamente no crescimento e na produtividade das culturas (LETEY, 1985). Para entender melhor tal constatação, deve-se compreender como ocorre o processo de compactação no solo.

Ao aplicar uma carga externa ao solo, essa afeta a estrutura através do rompimento da continuidade de poros (STRECK et al. 2004), o que resulta na alteração dos fluxos de ar e água do solo. Em função da redução da condutividade hidráulica, pode ocorrer escoamento superficial mais frequente, implicando na perda da cobertura vegetal em condições extremas.

O fluxo de ar no solo pode ser considerado como um indicador de qualidade física (CZYZ, 2004), pois possui influência sobre atividade biológica do solo que necessita de oxigênio para seu metabolismo. Com a redução do fluxo de ar, em função dos aspectos abordados anteriormente, além da redução da atividade biológica, temos a diminuição da metabolização das raízes, que refletirá na redução do enchimento de grãos (GILL; VANDEN BERG, 1967).

A condição de aeração do solo é considerada por alguns pesquisadores como um dos parâmetros mais críticos ao desenvolvimento das culturas (LIPIEC; SIMOTA, 1994; CZYZ; TOMASZEWSKA, 1993a; GRABLE, 1971). Segundo Warkentin (1971), a distribuição do tamanho de poros é a mais afetada por práticas agronômicas, refletindo conseqüentemente na relação de ar e de água do solo. Redução da aeração com o aumento da intensidade de tráfego foi observada por Czyz (2004), sendo acompanhada pelo aumento da densidade de solos com textura arenosa.

O uso de máquinas agrícola em condições de umidade inadequada na implantação das culturas (SILVA et al., 1984) e a utilização inadequada da pressão de insuflagem dos pneus agrícolas (RICHART et al., 2005; TESSIER; LAGUE, 1991; HÅKANSSON, 2005) e uso errôneo do tipo de pneu corroboram para potencialização do processo de compactação no solo.

Estudando a condutividade hidráulica saturada de um Argissolo Vermelho, Suzuki et al. (2007) demonstraram que o aumento da compactação reduziu linearmente a condutividade hidráulica saturada. Isso está relacionada à obstrução dos poros maiores, os quais são responsáveis pela aeração e infiltração de água no solo, ou sua transformação em poros menores, quando na aplicação de carga pelo tráfego de máquinas agrícolas (BOONE; VEEN, 1994). Silva (2003a) verificou que a compactação reduziu em até cinco vezes a condutividade hidráulica saturada de um Latossolo Vermelho sob semeadura direta na camada 0,1-0,3m. Tal condição irá acarretar na redução da infiltração da água no solo, reduzindo, assim, a disponibilidade de água às plantas.

4.2.2 Efeito do tráfego na demanda de esforços em semeadoras

Com o tempo temos uma crescente preocupação com os efeitos negativos causados pelo tráfego de máquinas agrícolas ao solo, os quais têm sido caracterizados por alguns pesquisadores brasileiros STRECK et al., 2004; SUZUKI et al., 2007; SECO et al., 2004; OLIVEIRA et al., 2003; DIAS JUNIOR, 1994; ROSA, 2007).

Notadamente, o sistema de semeadura direta reduziu os problemas de degradação do solo, particularmente aqueles relacionados à erosão. Porém, após alguns anos, tem sido constatado problemas de compactação sub-superficial, os quais se agravam pelo não revolvimento do solo, restrito à linha de semeadura, em profundidades superficiais (em torno de 0,13m quando utilizada haste sulcadora), pelo acúmulo de tráfego, devido ao uso de máquinas agrícolas em condições inadequadas de teor de água no solo.

A compactação pelo tráfego de tratores e implementos agrícolas tende a ser mais expressiva nas camadas mais superficiais, o que resulta no aumento da energia de tração (HÅKANSSON, 2005), causando maiores gastos com combustíveis; bem como redução da profundidade explorada pela raiz (COLLARES et al., 2006). Ao invés de gastar energia para produção de grãos, a planta gasta para exploração do solo em busca de ar e de água.

O efeito da compactação no desempenho de uma semeadora foi estudado por Oliveira et al. (2003) em dois solos de distintas características texturais, em

Argissolo Vermelho-Amarelo (textura arenosa) e Latossolo Vermelho-Amarelo (textura argilosa), verificando-se maiores patinagens, consumo de combustível e, conseqüentemente, maior exigência de potência do trator no momento da sementeira no Argissolo, atribuída à sua maior densidade.

Tais efeitos podem ser reduzidos com uso de escarificadores, conforme salientam Rosa et al. (2008), Raper (2005) e Håkansson (2005). Por outro lado, Furlani et al. (2005) não encontraram diferença no esforço de tração de uma sementeira usando haste sulcadora em um Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo convencional, sementeira direta e cultivo mínimo. Similarmente, Mahl et al. (2004) não encontraram diferença em Nitossolo sob sementeira direta e escarificado há 18 meses. A explicação de não se observa mais o efeito da escarificação se dá em conseqüência do tempo da mesma (BOTTA et al., 2006; RAPER, 2005 e TORMENA et al. 2002), pois o solo já deve ter retornado às condições em que se encontrava inicialmente. O tempo de duração do efeito da escarificação no solo está entre 2 e 4 anos, conforme Rosa et al. (2008), Botta et al. (2006), Raper (2005) e Tormena et al. (2002).

A profundidade da camada compactada pelo tráfego de máquinas agrícolas foi investigada por Håkansson & Reeder (1994), concluindo que a compactação pode alcançar os 0,30m de profundidade no solo, quando a massa total da carga sobre o solo for de 4Mg, 0,4m quando for 6Mg, e 0,6m ou mais, para a massa de 15Mg ou mais.

O controle do tráfego é essencial, pois ao ultrapassar a capacidade de suporte de carga do solo, as práticas biológicas não são passíveis de reduzir a compactação, apenas práticas mecânicas. Em experimento em solo argiloso com tráfego controlado, um trator de 140cv (2,8Mg no eixo traseiro) induziu alterações ao longo de todo o perfil analisado por Botta et al. (2004), resultando no aumento da resistência de 1,25 para 1,85MPa na profundidade de 0,25m, quando a intensidade de tráfego de 4 passadas foi duplicada.

Em dois solos, um Nitossolo Vermelho e um Latossolo Vermelho distroférico, Casão Junior et al. (2000) atribuíram a variação da demanda do esforço horizontal da sementeira ao nível de compactação do Nitossolo Vermelho, que gerou variações no coeficiente de variação de até 20%.

Nem sempre as alterações no solo pelo aumento de tráfego podem ser verificadas. Isso ocorre apenas quando a pressão exercida pelo maquinário não

exceder a capacidade de suporte do solo. Em solo franco siltoso que se encontrava com azevém (*Lolium Multiflorun L.*) e trevo branco (*Trifolium repens L.*), Jorajuria & Draghi (2000) concluíram que o aumento na intensidade de tráfego de uma vez (5,8Mgkm ha⁻¹) para cinco vezes (28,8Mgkm ha⁻¹) com um trator pesado (com pressão de 73kPa) não foi suficiente para alterar a resistência do solo à penetração na camada de 0-0,15m.

4.2.3 Efeito da compactação do solo na planta

O incremento na capacidade operacional das máquinas agrícolas trouxe várias vantagens ao setor agrícola, como redução de custos com operadores, aumento na autonomia das máquinas e melhoria na qualidade das operações. Pesquisadores como Draghi et al. (1989) e Jorajuria e Draghi (2000) comentam que estes fatores são alguns dos responsáveis pelo aumento no tamanho das máquinas agrícolas. Se analisarmos que máquinas maiores resultam em menores áreas trafegadas, devido ao aumento da largura de trabalho, teremos como consequência a redução da área compactada. No entanto, o problema está na condição que o solo se encontra no momento do tráfego, de modo que o uso de máquinas sob elevados teores de água e o uso inadequado da pressão de insuflagem dos pneus e o tipo de pneu originam danos ao solo.

A compactação gera alterações físicas no solo expressas pela redução do volume de macroporos (STONE et al., 2002), que diminui a aeração, repercutindo num ambiente inadequado ao desenvolvimento das raízes. Conforme Séguy et al. (1999), a compactação aumenta a resistência à penetração das raízes em função da elevada resistência da estrutura física do solo e da diminuição da concentração de oxigênio, resultando na menor taxa de mineralização da matéria orgânica e difusão lenta dos nutrientes e oxigênio para as raízes.

Os efeitos desse processo nem sempre são prejudiciais conforme salienta Håkansson (2005). Em solos que sofreram aração mais gradagem, o autor encontrou melhorias no desenvolvimento de plantas em função do aumento do contato raiz-solo, havendo uma combinação ideal entre a densidade e a porosidade para tal desenvolvimento. Porém, a compactação excessiva provoca efeitos não desejáveis ao desenvolvimento radicular, podendo em certos casos ser restritiva.

Nesse contexto, em cultivares de milho híbrido, Foloni et al. (2003) encontraram redução do crescimento da parte aérea e do crescimento radicular com maiores níveis de compactação do solo. O alongamento radicular só é possível quando a pressão de crescimento das raízes for maior do que a resistência mecânica do solo à penetração (PASSIOURA, 1991). Em experimentos em casa de vegetação com Latossolo Vermelho, Foloni et al. (2003) encontraram restrições ao desenvolvimento radicular de milho quando a resistência do solo foi de 1,4MPa.

Os efeitos gerados pela compactação do solo na planta irão acarretar na redução da produtividade. Uma relação direta entre a produção consorciada de azevém e trevo branco com o número de passadas do trator (pressão ao solo de 96kPa) foi encontrada por Jorajuria e Draghi (2000), em que uma passada de trator, correspondente à intensidade de 5,8Mgkm ha⁻¹, promovendo a redução de 60% da produção de tais culturas, com o aumento da intensidade de tráfego para 28,88Mgkm ha⁻¹, a redução foi para 74%.

Uma técnica passível de redução de tais efeitos na planta é o uso de tráfego controlado, conforme identificado por Botta et al. (2007) em experimento conduzido por 3 anos. Os pesquisadores encontraram maior produção de milho quando a intensidade de tráfego passou de 38,45 a 15,2Mgkm ha⁻¹.

O impacto da compactação do solo na planta foi investigado por Sidhu & Duiker (2006) em experimento conduzido de 2002 a 2005 com milho em solo franco siltoso. A compactação induzida anualmente pelo tráfego de um caminhão de 10Mg por eixo gerou redução no rendimento da cultura de 27% em 2002, 11% em 2004 e 14% em 2005, quando comparada à testemunha. Os mesmos não encontraram efeito da compactação no rendimento do solo que sofreu apenas um ano de compactação comparando com a testemunha. Os pesquisadores salientam que, em períodos de seca, alterações mais severas são esperadas.

A intensidade de tráfego foi também investigada por Jorajuria et al. (2000) em um solo argiloso, em que os autores concluíram que há uma relação direta entre a massa do trator com a compactação sub-superficial, independentemente da pressão média aplicada, sendo que a profundidade que alcança a compactação possui uma relação inversa com a intensidade de tráfego.

4.2.1 Prática de descompactação do solo

Algumas práticas mecânicas de manejo podem ser usadas para redução dos efeitos negativos da compactação, como a escarificação do solo (ROSA et al. 2008, BOTTA et al., 2006, RAPER, 2005). Com o decorrer dos anos, a escarificação passou a ter atenção especial de alguns pesquisadores (COLLARES et al., 2006; OLIVEIRA et al., 2003; CAMARA; KLEIN, 2005), porém ainda há poucos estudos.

A escarificação possui alguns efeitos imediatos, como a redução da resistência interna do solo (BOTTA et al., 2006), aumento da macroporosidade (ROSA, 2007), que, conseqüentemente, resulta no aumento da aeração e da condutividade hidráulica do solo. Nesse sentido, em um Latossolo Vermelho escarificado há 6 meses, Rosa et al. (2008) encontraram maior macroporosidade que um solo escarificado há quatro anos e outro sob semeadura direta há 13 anos. Similarmente, Collares et al. (2006) encontraram efeitos benéficos nas propriedades físicas de um Argissolo Vermelho escarificado, manifesto pelas reduções da densidade e da resistência à penetração e do aumento da macroporosidade na camada superficial de solo.

Em experimento conduzido em um Latossolo Vermelho, Camara e Klein (2005) concluíram que a escarificação do solo sob semeadura direta reduziu a densidade e aumentou a rugosidade superficial, a condutividade hidráulica e a taxa de infiltração de água no solo. Tais autores encontraram, após seis meses decorridos da escarificação, níveis semelhantes de restos culturais na superfície entre o solo escarificado e o não escarificado. Quando realizada a escarificação em um solo de textura arenosa que se encontrava sob semeadura direta, Abreu et al. (2004) encontraram menor resistência à penetração, sendo constatado maior estabelecimento de poros condutores de água.

Em solo recentemente subsolado, Xu e Mermoud (2001) encontraram redução da densidade acompanhada pelo aumento do número de macroporos e a redução dos microporos, condições consideradas adequadas ao desenvolvimento de uma cultura. Tais constatações são advindas do processo de manutenção da maior parte da cobertura vegetal sobre a superfície e mobilização sub-superficial. A escarificação, segundo Mazuchowski e Derpsch (1984), favorece a permeabilidade do solo à água e ao ar, elimina plantas invasoras e permite uma semeadura mais adequada.

Em lavoura de milho sob semeadura direta há três anos, Seixas et al. (2005) estudaram 4 áreas, uma submetida ao tráfego de um trator (4Mg), outra de uma colhedora (12Mg), uma área subsolada e uma testemunha. Os pesquisadores encontraram variação na distribuição de raízes, que se concentraram na camada de 0-0,40m, sendo que o solo que foi subsolado proporcionou a maior densidade de raízes nessa camada.

A descompactação com subsoladores em solos que possuem camada compactada superior a 0,30m associada com o tráfego controlado podem aumentar o rendimento de uma cultura. Isso foi encontrado por Raper (2005) em lavoura de algodão, que gerou um aumento de 14,7% na produtividade em tais condições.

4.3 Material e Métodos

4.3.1 Caracterização da área experimental

As coletas das informações foram realizadas em abril de 2008, em área experimental do Departamento de Solos da UFSM, Santa Maria-RS. A área está delimitada entre as coordenadas 29° 43' 8.8"S e 53° 42' 27.1"W, com altitude de aproximadamente 95m. O clima da região é classificado como "Cfa" (Köppen), caracterizado por clima subtropical úmido sem estiagem com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C, e temperatura do mês mais frio variando entre -3°C a 18°C (MORENO, 1961), sendo que esta área tem sido cultivada há mais de 13 anos sob semeadura direta.

As parcelas possuíam 6m de largura por 8m de comprimento, sendo que o intervalo entre parcelas foi de 2m e entre bloco foi de 7m.

A precipitação média mensal durante o estudo está apresentada na Figura 1.

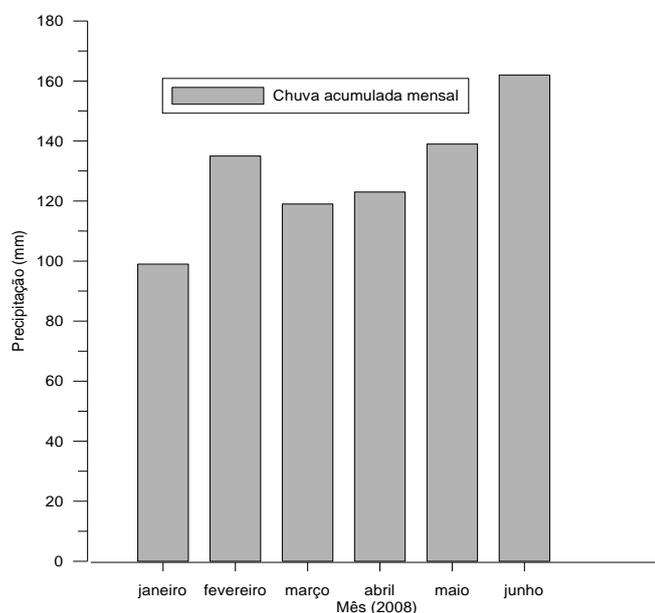


Figura 1 -Precipitação mensal acumulada durante o estudo (fonte: INMET 2008)

4.3.2 Solo

O solo do experimento é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (EMBRAPA, 2006) de textura franco argilo arenoso. A granulometria do solo e sua caracterização química estão apresentadas na Tabela 1. Salienta-se que o horizonte Bt encontra-se a mais de 0,60m.

Tabela 1 - Composição granulométrica do Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico em estudo

Camada (m)	Areia	Silte	Argila	pH*	MO	Saturação (%)		P	K	CTCef
	g kg ⁻¹			%	%	Al	Bases	--cmol dm ⁻³ --		
0,0-0,1	600	212	188	5.3	2.5	2	71	22.8	136	5.4
0,1-0,2	566	215	219	5	1.5	14	69	6.8	84	5.1
0,2-0,3	558	232	210	5.1	1.2	19	60	3.7	28	4.8
0,3-0,4	566	236	198	5	1.2	31	53	2.2	32	4.2

* pH em água 1:1

4.3.3 Tratamentos e delineamento experimental empregado

O delineamento adotado foi blocos ao acaso, com três repetições e os seguintes tratamentos: SD - semeadura direta há 13 anos, SDc4 – semeadura direta com compactação por 4 passadas de máquina, SDc8 – semeadura direta com compactação por 8 passadas de máquina, CM – cultivo mínimo e CMc – cultivo mínimo em solo compactado (descrito logo a seguir). Os níveis de compactação empregados nos tratamentos SDc4 e SDc8 foram realizados com o auxílio de um conjunto trator-pulverizador em que resultou em uma intensidade de tráfego de 24,79Mgkm ha⁻¹ e 49,59Mgkm ha⁻¹, respectivamente.

A intensidade de tráfego foi estimada pela seguinte equação (1):

$$IT = \frac{(P_t \times D_l)}{A_t} \quad (1)$$

Onde:

IT = intensidade de tráfego (Mgkm ha⁻¹);

P_t = peso total do equipamento (Mg);

D_l = distância linear percorrida pelo trator (km);

At = área total trafegada (ha).

No momento da compactação do solo em SDc4 e SDc8, os mesmos estavam com teor de água igual a $0,18\text{kg kg}^{-1}$ na camada 0,0-0,3m.

Anteriormente à escarificação do solo sob cultivo mínimo, o mesmo foi compactado pelo tráfego de uma pá carregadora (Figura 2), pesando aproximadamente 10Mg, sendo executadas 2 passadas no dia 22 de junho de 2007, resultando em uma intensidade de tráfego de $24,67\text{Mgkm ha}^{-1}$.

A compactação de todo o experimento foi realizada de tal forma que os pneus comprimissem áreas paralelas entre si sendo executadas passadas sobrepostas às anteriores, fazendo assim com que toda área fosse igualmente trafegada. No momento da compactação com a pá carregadora, a área encontrava-se com $1,43\text{t ha}^{-1}$ de azevém (*Lolium Multiflorum Lam*) da parte aérea.

O teor de água no solo sob cultivo mínimo no momento da compactação está apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Teor de água no dia da execução da compactação, limites de plasticidades e estado de consistência do Argissolo Vermelho-Amarelo.

	Camada (m)			
	0,0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,3-0,4
Umidade gravimétrica (kg kg^{-1})	0,14	0,16	0,15	0,15
Limite de liquidez (kg kg^{-1})	0,20	0,20	0,20	0,20
Limite de plasticidade (kg kg^{-1})	0,17	0,16	0,16	0,18
Índice de plasticidade (kg kg^{-1})	0,03	0,04	0,04	0,02
Estado de consistência	Seco	Friável	Seco	Seco

A escarificação foi realizada aproximadamente cinco meses após a compactação do solo (19/11/2007) em que o teor de água encontrava-se com $0,18\text{kg kg}^{-1}$.

4.3.4 Especificações das máquinas e operações utilizadas

A compactação do solo sob cultivo mínimo foi executada com uma pá carregadora (Figura 2) da marca Case, modelo W18, com massa total de 8,531Mg,

sendo que a concha foi preenchida com solo para aumentar a massa no eixo frontal do equipamento, garantindo uma massa total de aproximadamente 10Mg. As garradeiras encontravam-se desgastadas pelo uso, evitando assim o cisalhamento superficial.

Tabela 3 – Especificações da pá-carregadora usada para compactação do Argissolo Franco argilo arenoso

Descrição	Especificação
Massa do equipamento (Mg)	8,531
Massa total do equipamento carregado (Mg)	10,0
Potência no motor, cv (kW)	140 (103,6)
Pressão insuflagem do pneu traseiro e dianteiro (lbf pol ⁻²)	40,0
Pneus dianteiro e traseiro Firestone SGG ROAD BUILDER G-2	14.0-24
Área de contato pneu traseiro-solo (m ²)	0,188
Pressão média de contato solo-pneu traseiro (kPa)	260,7

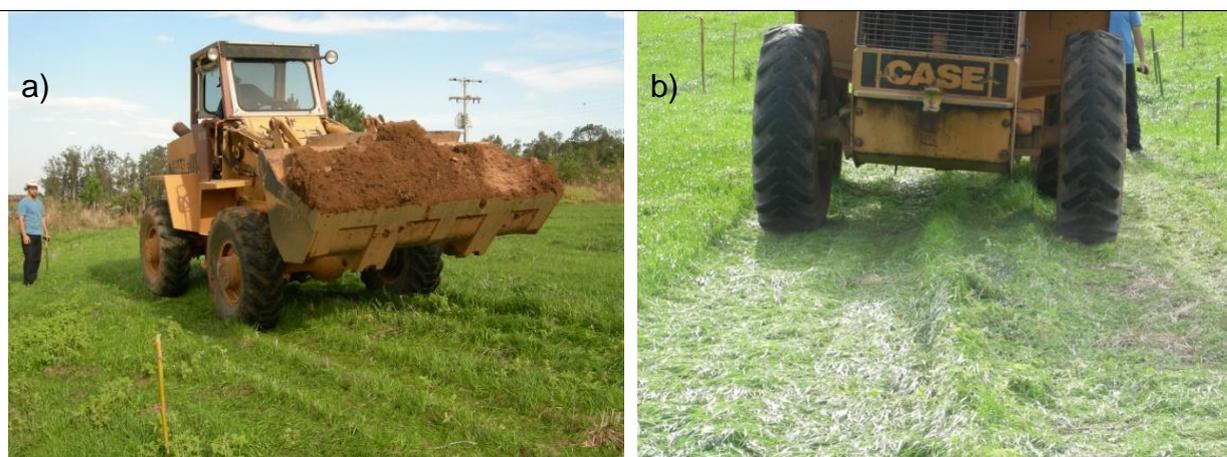


Figura 2 -a) Compactação do Argissolo Vermelho Amarelo antes da escarificação. b) Deformação do solo após o tráfego.

A pressão de contato pneu/solo foi calculada dividindo a massa total do trator por roda pela área de contato, tomando por base uma distribuição de 35% da massa para eixo traseiro e 65% para o eixo dianteiro, adicionando a massa da concha repleta de solo no eixo dianteiro. A área de contato foi mensurada com a delimitação da área de contato pneu-solo no campo com farinha, como ilustrado na Figura 3, onde uma foto digital foi tirada e após, efetuou-se a medição da área com

uso de software CAD. Para a determinação da pressão das demais máquinas foi considerada a distribuição de 25% - 75% para o trator MF 275 e 40% - 60% para o trator MF 295, sendo considerado o peso dos equipamentos.



Figura 3 -Delimitação da área de contato pneu-solo.

Para a compactação da área sob semeadura direta, foi usado um conjunto trator+pulverizador montado, pertencentes ao Departamento de Solos da UFSM, com as seguintes especificações constantes na Tabela 4.

Tabela 4 - Descrição do trator e pulverizador usado na compactação do solo sob semeadura direta.

Descrição	Especificação
Massa total do trator MF275 simples (Mg)	2,953
Potência no motor, cv (kW)	75 (55,5)
Potência na TDP, cv (kW)	57 (42)
Bitola do trator (m)	1,77
Pneu dianteiro (Goodyear), lastro sem água	7.5-16
Pressão insuflagem do pneu dianteiro (lbf pol ⁻²)	32,0
Pneu traseiro (Pirelli), lastro com água	18.4-30 R2
Área de contato pneu traseiro-solo (m ²)	0,1934
Pressão insuflagem do pneu traseiro + água (lbf pol ⁻²)	15,0
Massa total do pulverizador Jacto condor 600 (Mg)	875
Capacidade do pulverizador (l)	600
Massa total do conjunto (Mg)	3,838
Pressão média de contato solo-pneu traseiro (kPa)	102,95

A escarificação foi realizada através de um subsolador (Figura 4b) pertencente ao Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria, com as seguintes especificações: estrutura porta ferramenta em formato quadrangular, com rodas niveladoras de profundidade acopladas ao chassi, equipado com cinco hastes retas com ponteiros estreitas de 0,08 x 0,175m e, 20° de ângulo de ataque e espaçamento de 0,368m. A profundidade média de trabalho foi de 0,25m na velocidade de operação de 4,31km h⁻¹. O solo encontrava-se com teor de água de 0,18kg kg⁻¹. A profundidade média de trabalho foi medida com auxílio de um perfilômetro, com o qual se realizou 3 medições por tratamento.

Os 2 tratores utilizados no experimento não sofreram alterações na pressão de insuflação em razão da não autorização dos responsáveis.

O trator empregado para tracionar esse implemento foi um MF295, com as especificações mostradas na Tabela 5.

Tabela 5 – Trator usado para tracionar o subsolador.

Descrição	Especificação
Massa total do trator MF295 (c/TDA) com lastro (Mg)	5,2
Potência no motor, cv (kW)	95 (70,3)
Potência na TDP, cv (kW)	57 (42)
Bitola do trator (m)	1,94
Pneu dianteiro (Goodyear), lastro sem água	15.9-24 R2
Pressão insuflagem do pneu dianteiro (lbf pol ⁻²)	30,0
Pneu traseiro (Goodyear), lastro com água	23.1R2-26
Pressão insuflagem do pneu traseiro (lbf pol ⁻²)	17,0

Embora o solo tenha sofrido ação do tráfego no momento da semeadura da soja, o plantio do milho foi realizado utilizando o mesmo trajeto de deslocamento da implantação da soja, sendo que a coleta de amostras foi realizada no centro da parcela, ou seja, no centro do trator.

O milho (*Zea mays*) foi semeado no dia 22 de janeiro de 2008, usando a semente híbrido 3069 (Pionner) de ciclo super precoce, pureza de 98%, germinação mínima de 85%, e tratada com: Fludioxonil, Metalaxi_m, Deltmetrina, Pirimifós-metilico. A semeadura ocorreu nesta data em função da variabilidade ocorrida anteriormente com a semeadura da soja, razão pela qual se optou por implantar a cultura do milho. A semeadura da soja foi executada com a mesma máquina usada para o cultivo do milho, contudo, o espaçamento foi de 0,45m.

A semeadura foi executada com uma semeadora-adubadora Semeato, modelo Personale drill 17, com as seguintes especificações na Tabela 6.

Tabela 6 – Especificações da semeadora- adubadora empregada no experimento.

Descrição	Componentes
Linhas de semeadura	4
Espaçamento entre linhas (m)	0,6
Dosador de semente	Disco perfurado com furo oblongo
Dosador de adubo	Acanelado tipo helicoidal
Sulcador de adubo	Facão
Sulcador de semente	Disco desalinhado
Mecanismo de pressionamento do solo	Roda dupla lisa
Pneu Pirelli modelo TM95	9.5-24
Sementes por metro (plantas ha ⁻¹)	6,1 (65.000)
Dose de adubo (kg ha ⁻¹)	83

A semeadora-adubadora (Figura 4a) foi tracionada pelo mesmo trator usado para compactação do solo sob semeadura direta. O trator foi ajustado para operar com rotação média de 1400rpm e 3º marcha reduzida, resultando numa velocidade de 4,2km h⁻¹. O adubo empregado possuía formulação 2-20-20.



Figura 4 -Máquinas usadas no experimento. a) Trator (72cv) tracionando a semeadora; b) trator (92cv) tracionando o subsolador.

A dessecação foi realizada no dia 5 de janeiro de 2008, usando o defensivo Glifosate (dose de 5L ha^{-1}) que foi aplicado com auxílio de um pulverizador costal de 20L, adaptado com uma barra de quatro bicos.

A aplicação de inseticida e uréia foram realizadas no dia 7 de fevereiro de 2008, com doses de 600mL ha^{-1} de lannat e 75kg de N ha^{-1} , respectivamente. Uma segunda aplicação de uréia, na mesma quantidade, foi realizada 22 dias após a primeira.

4.3.5 Coleta das amostras de solo

As amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas na linha de cultivo do milho (Figura 5a) para avaliar as condições que o sistema radicular da cultura se encontrava. As amostras foram extraídas das camadas 0-0,05m, 0,05-0,15m, 0,15-0,25m e 0,25-0,35m. Os cilindros de solo foram extraídos com auxílio de um extrator e um martelo, sendo aberta uma trincheira de 0,50m e após, realizando-se a abertura das camadas do solo em patamares, conforme ilustra a Figura 5b.

Nas mesmas camadas foram coletadas amostras com estrutura alterada, para a determinação da consistência e textura do solo.



Figura 5 -a) Coleta de amostras de solo, b) Cilindros, extratores e martelo na trincheira de coleta.

4.3.6 Determinações realizadas

a) Análise granulométrica e consistência do solo

Com a amostra de solo de estrutura alterada realizou-se a análise granulométrica seguindo o método da pipeta (EMBRAPA, 1997). A dispersão foi feita por meio de agitação horizontal (120rpm) de solo com dispersante químico NaOH 6% (10ml) durante 4h. Tal conteúdo encontrava-se em *snap cap* de 100ml, o qual foi completado com 50ml de água destilada e duas esferas de nylon de massa 3,04g, diâmetro 17,1mm e densidade de $1,11\text{Mg m}^{-3}$ (SUZUKI et al., 2004). Tais esferas têm a função de auxiliar na dispersão da argila na amostra. A caracterização granulométrica do solo em estudo encontra-se na Tabela 1 (ver item 4.3.2. solo).

Para a obtenção da consistência do solo, necessitou-se estimar os limites de liquidez e plasticidade (SOWERS, 1965). No limite de plasticidade (LP), 200g de terra fina seca ao ar foram homogeneizadas com água destilada dentro de uma cápsula de porcelana com o auxílio de uma espátula. Após esta, separou-se uma porção da amostra e moldou-se o solo em formato de um bastonete de aproximadamente 3mm de diâmetro em cima de uma placa de vidro. Três pontos de umidades foram tomados, o primeiro, quando em movimentos alternados (vai vem) no bastonete de solo, ao juntar as pontas, este não trincava; o segundo, quando este começava a romper; e o último ponto, o bastonete rompia-se totalmente. Ato contínuo, as amostras foram secas em estufa para determinação do teor de água do solo. O limite de plasticidade foi obtido pela média das umidades.

Para o limite de liquidez (LL), utilizou-se o aparelho de Casagrande, com o qual foi aberto um sulco com o uso de uma espátula de dimensões padronizadas, fechando-se numa extensão aproximada de 13mm, com o número de golpes igual a 25.

O cálculo do índice de plasticidade é obtido pela equação a seguir (2).

$$IP=LL - LP \quad (2)$$

b) Densidade e porosidade do solo

Para a determinação da macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo, foram realizadas coletas a campo em cilindros de aço inoxidável de 60mm de diâmetro e 50mm de altura. Essas mesmas amostras também foram utilizadas para a determinação da condutividade ao ar e água do solo.

No laboratório, as amostras foram saturadas por capilaridade durante 24h, para a determinação da condutividade hidráulica saturada e, posteriormente, pesadas e levadas à mesa de tensão, onde foram submetidas à tensão de 6kPa, permanecendo nessa até que se estabeleceu o equilíbrio entre a água retida na amostra e a sucção aplicada. Pesou-se novamente a amostra para, posteriormente, determinar a macroporosidade e medir a condutividade ao ar. Após essas determinações, as amostras foram secadas em estufa a 105-110°C (EMBRAPA, 1997), permanecendo até que a massa se mantivesse constante.

c) Condutividade hidráulica saturada e condutividade ao ar

A condutividade do ar no solo (K_i) foi mensurada com um permeâmetro de carga constante de pressão do ar (Figura 6). As amostras foram as mesmas utilizadas na determinação da porosidade do solo, porém, após a medição da massa destas na tensão de 6kPa, elas foram submetidas à tensão de 10kPa para medir a condutividade ao ar com o teor de água do solo próximo à capacidade de campo. O equipamento de medição possui uma série de fluxímetros com diferentes vazões, por onde passa o ar (Figura 7) antes de passar pela amostra de solo. A pressão do ar é de 0,1kPa e constante, com a finalidade de evitar fluxo turbulento. Com o uso de um manômetro de água, realizou-se a leitura do gradiente de pressão entre o ambiente e o ar que flui pela amostra de solo (VOSSBRINK, 2004 apud STRECK, 2007).



Figura 6 -Permeômetro de carga constante de ar.

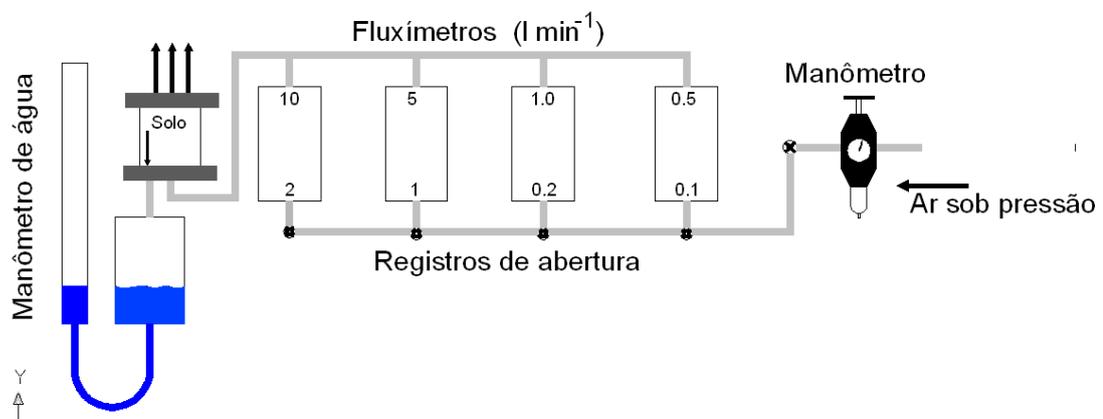


Figura 7 -Ilustração do funcionamento do permeômetro de carga constante de ar.

O cálculo da condutividade ao ar foi realizado pela seguinte equação (3):

$$KI = Da \times g \times \left(\frac{\Delta v \times h}{\Delta t \times \Delta p \times A} \right) \quad (3)$$

Onde:

KI = condutividade ao ar em $m \, s^{-1}$;

Da = densidade do ar na medição em $kg \, m^{-3}$;

g = aceleração da gravidade, $9,81m \, s^{-2}$;

Δt = duração do tempo de ensaio;

Δv = leitura feita no fluxímetro em m^3 ;

h = altura do cilindro em m;

Δp = pressão de ar aplicada em hPa;

A = área do cilindro em m².

Como havia variação da densidade do ar em função da variação da pressão atmosférica e da temperatura, foi realizada a correção da densidade em função das condições predominantes no momento do ensaio. Para tal, fez-se uso da equação (4):

$$D_a = D_{ar} \times \left(\frac{T \times P_{atm}}{D_{ar} \times T} \right) \quad (4)$$

Onde:

D_{ar} = densidade do ar na medição numa condição padrão de 1013mbar a 273,15°K, em kg m⁻³;

P_{atm} = pressão atmosférica no momento do ensaio, em mbar;

T = Temperatura no momento em que foi feito o ensaio, em K.

Após a medição da condutividade ao ar, as amostras foram re-saturadas por capilaridade durante 24h e encaminhadas para a medição da condutividade hidráulica saturada do solo. Exceto pela camada superficial (0-0,05m), foram utilizadas as mesmas amostras da porosidade do solo. Isso se deve ao fato que as amostras da camada superficial sofreram alterações na estrutura após a determinação da condutividade hidráulica saturada em função da fraca estrutura física em tal camada.

Para a determinação da condutividade hidráulica saturada, utilizou-se um permeâmetro de re-carga constante (LIBARDI, 2005), sendo estimada pela equação (5):

$$k\theta_s = \frac{q \times l}{A \times h \times t} \quad (5)$$

Onde:

$k\theta_s$ = é a condutividade hidráulica saturada em cm h⁻¹;

q = é o volume percolado pela amostra em cm³;

l = é a altura da amostra em cm;

A = é a área da amostra de solo em cm²;

h = é a lâmina de água aplicada em cm;

t = é o tempo de medição em h.

d) Resistência mecânica à penetração do solo

Como um dos indicadores de presença de compactação, mediu-se a resistência do solo à penetração. Foram realizadas medidas no momento da semeadura e na floração do milho. Tais épocas de medição foram selecionadas com o objetivo de avaliar o nível da resistência do solo oferecida à emergência da semente e ao desenvolvimento radicular na floração.

Foram executadas leituras de resistência mecânica à penetração em transecto a cada 0,05m no sentido do comprimento horizontal, totalizando 0,30m, gerando assim, mapas de resistência do solo. A linha de cultivo ficava no meio deste comprimento, permitindo a amostragem na área efetiva do sistema radicular no solo. Foram realizadas duas medições, uma na semeadura e outra na floração do milho, sendo que a profundidade de medição foi 0,4m na semeadura e 0,5m na floração.

Foi realizada uma leitura por tratamento e por bloco. Posteriormente, gerou-se um arquivo gride com os dados interpolados pelo método de krigagem para gerar um mapa de contorno.

Na linha da semeadura, a resistência à penetração foi medida até 0,40m, sendo realizadas três leituras ao longo da parcela. Para tais análises fez-se uso de um penetrômetro digital marca Remik CP20 Ultrasonic equipado com ponta cônica (ângulo de penetração de 30°) e armazenamento eletrônico dos dados. A aquisição dos dados foi realizada a cada 0,015m de profundidade.

e) Desenvolvimento radicular e massa seca de raiz

As influências do manejo e do tráfego de máquinas agrícolas no desenvolvimento da planta foram avaliadas pela quantidade de massa seca de raiz e sua distribuição no solo.

As avaliações foram realizadas na fase de floração do milho, pois nessa fase temos o máximo de expressão fisiológica da cultura quanto às condições impostas pelo manejo do solo.

O desenvolvimento e a distribuição do sistema radicular nos diferentes tratamentos foram avaliados pelo método do perfil cultural, conforme descrito por Böhm (1979).

A análise da distribuição do sistema radicular das plantas foi realizada visualmente (Figura 8) com a abertura de uma trincheira transversal a uma linha de cultivo, onde se expuseram as raízes de uma planta escolhida aleatoriamente de maneira que representasse o conjunto de plantas da parcela experimental. Em seguida, realizou-se a exposição das raízes em uma secção transversal à linha de cultivo com auxílio de uma malha de 0,50 x 0,30m, dividida em quadrículas de 0,05m, o qual foi colocado em contato com o solo. Posteriormente, obteve-se uma fotografia digital adquirindo-se, assim, o perfil radicular da cultura.

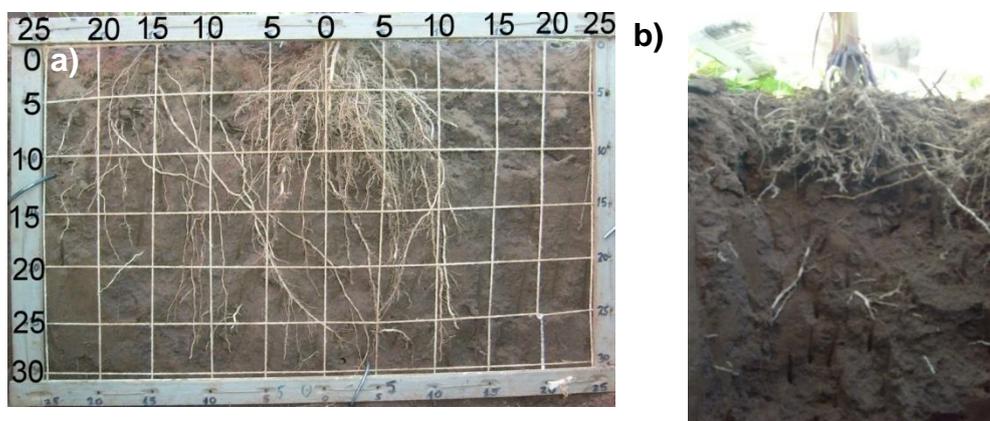


Figura 8 -Avaliação do perfil cultural. a) Uso de malha no perfil; b) exposição da raiz

As mesmas plantas usadas para avaliação do desenvolvimento radicular foram encaminhadas para medição da massa seca de raiz seguindo a metodologia proposta por Hanway (1966). As plantas foram seccionadas na base, removendo a parte aérea e preservando, assim, o sistema radicular. Este foi separado da massa de solo por lavagem em água corrente, bem como isolado das raízes adventícias e raízes seminais. Posteriormente, as raízes foram secas em estufa com circulação

forçada de ar a 65°C até obtenção de massa constante, a qual corresponde à massa seca de raiz.

f) Esforços solicitados à haste sulcadora

Para a avaliação da influência do manejo e da compactação do solo no desempenho da haste sulcadora da semeadora (Figura 9b), dados de esforços horizontais, verticais e momento associado a esses mecanismos foram coletados como uso de um anel octogonal acoplado entre o trator e a haste sulcadora. Para o acoplamento do conjunto anel-haste sulcadora ao trator, utilizou-se a estrutura de um escarificador conforme ilustra a figura 9a. A velocidade de trabalho foi de 4,3km h⁻¹, sendo que o teor de água em que se encontrava o solo está descrito na Tabela 7.



Figura 9 -a) Obtenção dos esforços solicitados a haste sulcadora no campo. b) Anel octogonal acoplado a haste sulcadora.

Tabela 7 – Teor de água médio (kg kg^{-1}) do solo nos tratamentos, no momento que passou a haste sulcadora.

Tratamento*	Camada (m)		
	0,0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3
SD	0,11	0,11	0,09
SDc4	0,11	0,12	0,14
SDc8	0,09	0,12	0,13
CM	0,10	0,12	0,11
CMc	0,11	0,12	0,13

*SD – semeadura direta; SDc4 – semeadura direta com compactação por 4 passadas de máquina; SDc8 – semeadura direta com compactação por 8 passadas de máquina; CM – cultivo mínimo e CMc – cultivo mínimo em solo compactado.

O anel octogonal (Figura 9b) consiste em um bloco retangular de aço usinado de forma a obter dois anéis octogonais. Extensômetros elétricos são adicionados estrategicamente a estes anéis e interligados em três pontes de Wheatstone, transformando-os em sensores capazes de identificar os componentes de força vertical e horizontal, bem como o momento associado à ferramenta, ou seja, são dispostos de tal forma que ao deformar-se devido à aplicação de uma carga ao anel, resultam em tais medições. Para o estudo, o anel foi configurado para uma taxa de aquisição de 20 medições/segundo, possuindo as seguintes especificações técnicas: material de aço 4340; tratamento térmico de têmpera e revenimento para 41,5RC; capacidade nominal: força vertical de 8kN, força horizontal de 20kN, momento de 13kN m; resistência das pontes de 120ohm.

Após a montagem mecânica do anel, este foi conectado ao módulo de aquisição de dados, sendo ligado e aguardado 15min para estabilização térmica dos circuitos elétricos. Este módulo é totalmente controlado por um laptop, não necessitando de ajustes e calibrações. Este anel foi desenvolvido pelo Laboratório de Instrumentação e Eletrônica da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

O esforço de tração (F_T) foi determinado por cálculo vetorial, pois a partir da força horizontal (F_h) e o ângulo formado pela ponteira e o solo (α), o esforço de tração é determinado pela equação (6):

$$F_T = \frac{F_H}{\cos\alpha} \quad (6)$$

Onde:

F_h = esforço horizontal (kN);

α = ângulo de ataque (°).

Os *outliers* (picos) foram retirados dos dados de esforços via *software* Grapher (Golden Software), que foi o mesmo empregado na plotagem dos gráficos.

A profundidade de trabalho foi mensurada com auxílio de uma régua, sendo realizadas leituras em três linhas de cultivo aleatórias na parcela, tomando 4 leituras por linha.

A análise estatística constou de análise da variância pelo teste F, e comparação de médias pelo teste de Tukey, com o nível de 5% de significância, ambas as análises foram executadas pelo programa SAS (1990). Para cada parâmetro avaliado, foi testado sua normalidade, sendo que os dados de condutividade ao ar e hidráulica saturada não apresentaram distribuição normal, enquanto os logaritmos dos valores apresentaram distribuição normal, avaliado pelo teste de Shapiro-Wilk, já os demais apresentaram normalidade.

4.4 Resultados e discussão

4.4.1 Efeito da compactação nas propriedades físicas do solo

Os valores médios de densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo encontram-se na Tabela 8. O solo apresentou baixos valores de macroporosidade ao longo do perfil, sendo que em alguns momentos inferior aos 10%, o que é considerado crítico ao desenvolvimento da planta (FORSYTHE, 1967). Na camada inicial (0,00-0,05m), diferenças ocorreram entre o solo que teve a maior intensidade de tráfego (SDc8) com o solo com cultivo mínimo em solo compactado e a testemunha, sendo que esses tratamentos não diferiram dos demais. Diferenças não foram encontradas na densidade do solo até a profundidade dos 0,15m. A segunda camada apresentou os maiores valores de densidade combinado com a menor macroporosidade ao longo do perfil, demonstrando uma camada compactada. Isso também foi encontrada por Abreu et al. (2004) e Streck et al. (2004) que, segundo estes autores, é a camada de concentração das tensões geradas pelo tráfego de máquinas agrícolas.

Outro parâmetro influenciado pelo tráfego na camada superficial foi a microporosidade, em que o solo sob cultivo mínimo diferiu do sob semeadura direta com 4 passadas, não diferindo dos demais.

Alterações na camada 0,15-0,25m são visualizadas em quase todas as propriedades físicas analisadas, exceto pela microporosidade. Nessa camada percebeu-se que a intensidade de tráfego de 24,67Mgkm ha⁻¹ de uma pá carregadora (260,7kPa de pressão ao solo) gerou um nível de compactação que não foi reduzido pela escarificação, fato corroborado pela menor porosidade do solo. Segundo Mantovani (1987), a porosidade se constitui no parâmetro de maior expressividade do efeito da compactação do solo, pois fornece a informação direta da proporção de volume do solo disponível ao fluxo de ar e água.

Tabela 8 – Macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (Pt), densidade (Ds) e resistência à penetração (RP) médios do Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes manejos.

Trat.**	Ma	Mi	Pt	Ds	RP
	-----%-----			Mg m ⁻³	MPa
Camada 0-0,05m					
SD	14,4* a	30,1 ab	44,5 ns	1,40 ns	0,52 b
SDc4	10,8 ab	28,5 b	39,3	1,53	1,22 a
SDc8	9,3 b	30,8 ab	40,0	1,51	0,83 ab
CM	13,2 ab	32,2 a	45,3	1,38	0,76 ab
CMc	15,2 a	29,6 ab	44,8	1,39	0,77 ab
CV (%)	22,4	5,2	7,0	5,16	36,19
Camada 0,05-0,15m					
SD	6,2 ns	29,1 ns	35,3 ns	1,63 ns	1,18 ns
SDc4	6,1	30,5	36,6	1,60	1,79 ns
SDc8	4,9	29,5	34,4	1,65	2,20 ns
CM	8,5	29,6	38,1	1,56	1,87 ns
CMc	6,5	28,6	35,1	1,64	2,17 ns
CV (%)	41,2	3,9	6,1	3,38	37,21
Camada 0,15-0,25m					
SD	7,5 ab	28,9 ns	36,4 ab	1,63 ab	1,70 c
SDc4	11,0 a	29,2	40,1 ab	1,54 ab	1,85 bc
SDc8	10,1 ab	30,4	40,6 a	1,52 b	2,24 abc
CM	9,5 ab	29,4	38,9 ab	1,57 ab	2,82 a
CMc	6,4 b	28,7	35,1 b	1,67 a	2,67 ab
CV (%)	20,4	4,7	6,1	3,90	25,44
Camada 0,25-0,35m					
SD	7,4 b	29,6 ns	36,9 b	1,61 ab	2,19 ns
SDc4	9,5 ab	29,7	39,2 ab	1,55 abc	1,86
SDc8	11,2 ab	30,6	41,8 a	1,49 bc	1,69
CM	12,1 a	29,7	41,9 a	1,48 c	2,30
CMc	7,2 b	29,2	36,3 b	1,63 a	2,30
CV (%)	21,5	3,4	5,4	3,44	20,20

*Médias seguidas da mesma letra, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

**SD - semeadura direta há 13 anos; SDc4 – semeadura direta com compactação de 4 passadas; SDc8 – semeadura direta com compactação de 8 passadas; CM – cultivo mínimo; CMc – cultivo mínimo em solo compactado; ns – não significativo.

A maior densidade foi encontrada no tratamento CMc na camada de 0,15-0,25m, corroborando com a constatação anterior. No solo SDc4 e SDc8 a maior densidade ocorreu na camada 0,05-0,15m. Similarmente, em Argissolo Vermelho sob semeadura direta, Kamimura (2008) encontrou maiores densidades na camada

0,12-0,15m, sendo que o solo trafegado por um trator agrícola não diferiu do solo submetido ao tráfego de uma colhedora. Em experimentos com feijão sob semeadura direta, próximo ao local do presente estudo, Collares et al. (2006) constataram que a maior densidade ocorreu na profundidade de 0,12m, sendo restritiva ao desenvolvimento da cultura. Já em experimentos conduzidos em solos arenosos sob intensidades de tráfego de 0-4 passadas de trator (1,7Mg no eixo traseiro), Czyz (2004) encontrou maior densidade na camada 0,32-0,37m, sendo que os valores são similares a este estudo. Por outro lado, Botta et al. (2004) encontraram uma camada mais densa nos 0,30-0,60m do solo arenoso submetido a 4, 6 e 8 passadas de trator. Tais diferenças estão aliadas ao teor de água do solo que vem a contribuir na maximização ou não da transmissão das tensões de compactação no solo. Nesse sentido, Håkansson (2005) salienta que, além do teor de água do solo, o nível de compactação é outro fator determinante.

Tomando como base o triângulo textural proposto por Reichert et al. (2008), o limite crítico de densidade de um solo de textura franco arenosa é $1,7 - 1,8 \text{Mg m}^{-3}$, valores bem superiores aos encontrados no presente estudo. Contudo, cuidados devem ser tomados, pois segundo Daddow & Warrington (1983), uma densidade de $1,65 \text{Mg m}^{-3}$ já impõe restrições ao desenvolvimento radicular. Nesse sentido, Nasr & Seles (1995) afirmam que o aumento da densidade do solo gera retardamento na velocidade de emergência que irá refletir na queda da produtividade da cultura.

O aumento da intensidade de tráfego de $24,79 \text{Mgkm ha}^{-1}$ (SDc4) para $49,59 \text{Mgkm ha}^{-1}$ (SDc8) não foi suficiente para gerar alteração significativa na macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo. Tal fato pode estar atribuído à textura, pois, em solo franco siltoso, Jorajuria & Draghi (2000) encontraram diferença na densidade de um solo submetido a intensidades de tráfego similares a este estudo. Isto ocorre em função da transmissão de tensões geradas pelo tráfego de máquinas agrícolas ser mais expressiva no solo argiloso, função da maior adesão do solo que ajuda no aumento do teor de água, propriedades influenciáveis no nível de compactação (GUÉRIF, 1984; LARSON et al., 1980)

Poucas alterações foram geradas pela intensidade de tráfego no solo sob semeadura direta (Figura 10) no que concerne à macroporosidade e porosidade total ao longo do perfil de estudo, mas diferenças são visualizadas na resistência do solo à penetração.

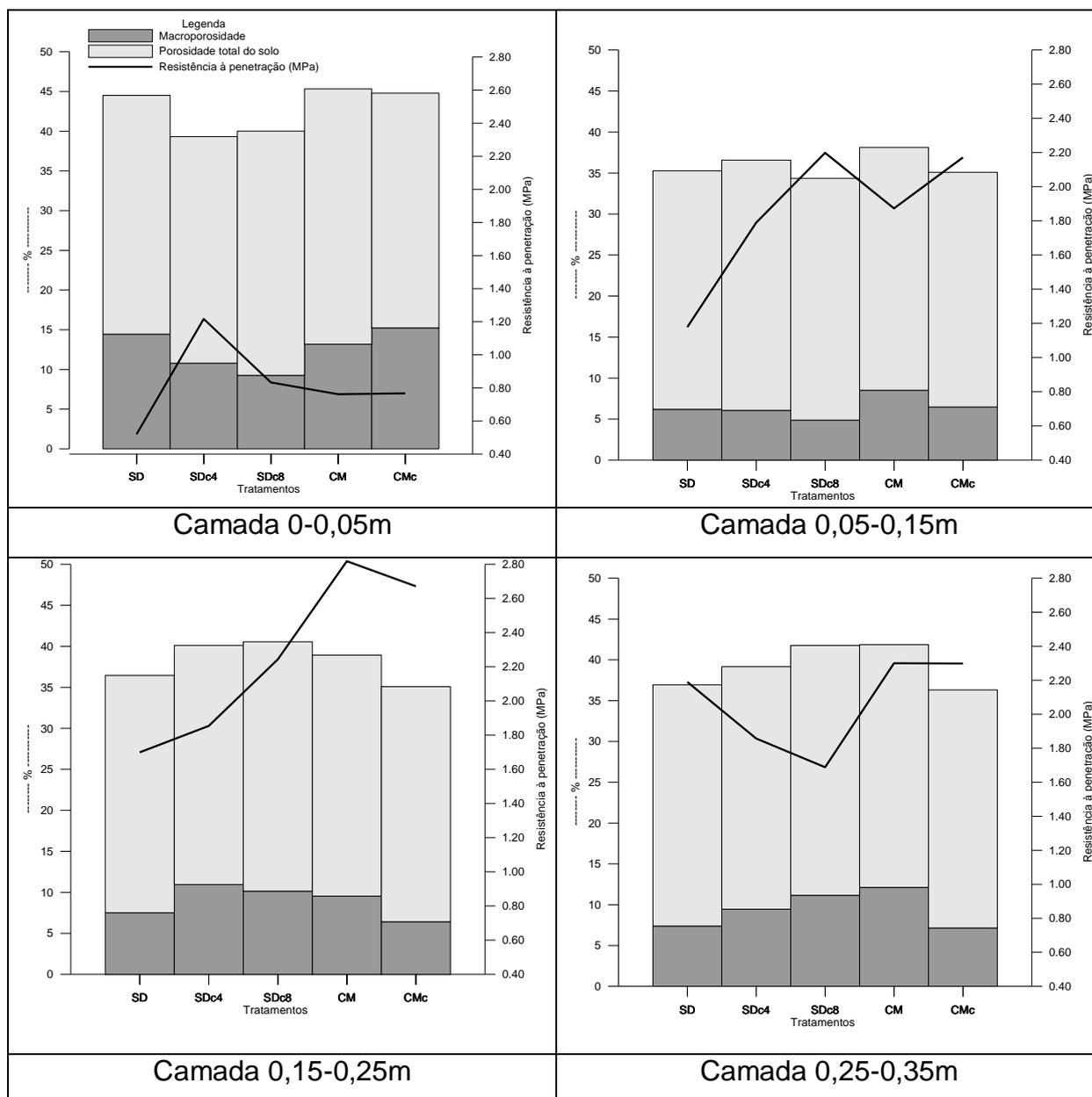


Figura 10 -Macroporosidade com a porosidade total e resistência à penetração de um Argissolo Vermelho-Amarelo.

O aumento da intensidade de tráfego não gerou efeito nocivo a macroporosidade e porosidade total além dos efeitos gerados pelo tráfego rotineiro no solo sob semeadura direta. Efeito similar foi encontrado por Botta et al. (2002b), que constataram que a densidade de um solo com 18% de teor de água (0,00-0,15m) submetido a diferentes carregamentos não ofereceu diferença significativa. Esses autores encontraram maiores manifestações na resistência à penetração do solo assim como foi encontrado neste presente estudo. A compactação do solo em

áreas de semeadura direta cultivadas por longo período também foi estudada por Goedert et al. (2002), os quais não encontraram variação restritiva ao desenvolvimento radicular impostas pela variação da densidade e porosidade do solo. Isto foi evidenciado pelos dados de produtividade das culturas, que não apresentaram diferença significativa. A explicação da não variação destas propriedades com adição de tráfego pode estar relacionada ao teor de água do solo.

Em geral, na camada superficial, a resistência do solo não ultrapassou 1,2MPa, fato atribuído a mobilização realizada pelo sulcador no momento da semeadura. A partir da profundidade de 0,05m até a de 0,25m, a resistência do solo à penetração aumentou expressivamente quando a intensidade de tráfego foi duplicada de 24,79Mgkm ha⁻¹ para 49,59Mgkm ha⁻¹, visto que o teor de água no solo variou de 0,14-0,18kg kg⁻¹ (Figura 13). Considerando a camada de 0,05-0,15m como a de maior concentração de raízes de milho sob semeadura direta, como encontrado por Seixas et al. (2005), a intensidade de tráfego de 49,59Mgkm ha⁻¹ poderá proporcionar impedimento mecânico ao desenvolvimento radicular, visto que o valor alcançado foi superior a 2MPa, considerado crítico por Taylor et al. (1966). O planejamento de uma lavoura agrícola, segundo Jorajuria (2005), deve levar em consideração a intensidade de tráfego das máquinas agrícolas, tendo como referência a trafegabilidade máxima 10 passadas com um trator de pequeno porte durante o ciclo vegetativo. Assim sendo, com oito passadas de trator, a trafegabilidade máxima deste solo já foi ultrapassada.

A potencialização da intensidade de tráfego expresso no aumento da resistência à penetração também foi encontrada por Balbuena et al. (2003) em solo de textura franco argilosa sob semeadura direta quando houve aumento da intensidade de tráfego. O solo sem ação do tráfego apresentou 1,3MPa, enquanto que o que teve 12 passadas com um trator de 3Mg de peso total apresentou 1,5MPa, sendo que em ambos os casos o solo se encontrava com a consistência seca.

A elevada resistência na camada sub-superficial do solo pode ser atribuída à compactação gerada pelo tráfego ao solo. Isso é corroborado por Botta et al. (2002b), que concluíram que a compactação do solo sub-superficial é induzida pela repetição do número de passadas no mesmo local.

Efeito do tráfego no aumento da resistência do solo também foi encontrado por Tormena e Roloff (1996) em Latossolo Vermelho-Escuro. Eles observaram um

aumento drástico da resistência à penetração quando foi adicionado o tráfego no solo e ressaltaram que aumentos maiores são esperados com o avanço do tempo. Os autores constataram também que, ao longo do tempo, a resistência variou significativamente, fato não encontrado no solo sem ação do tráfego.

Resumidamente, neste estudo o tráfego gerou uma maior resistência na camada do solo de 0,05-0,15m, provocando reduções maiores que 15% na macroporosidade. No solo sob cultivo mínimo a redução não ultrapassou 11%, demonstrando a ação do escarificador na homogeneização da estrutura do solo. O efeito da compactação prévia permanece no solo que foi escarificado, conforme é visualizado no CMc, que apresentou uma redução da macroporosidade de 24% em relação ao CM. A compactação do solo gera uma estrutura massiva, densa e com condições impróprias ao desenvolvimento de plantas, sendo que há uma redução na transmissão de ruptura tanto por implementos mobilizadores (sulcadores ou escarificadores), como pela coifa da raiz, assim, o processo de mobilização do escarificador é reduzido. Isso foi constatado por Rosa et al. (2008) em um Latossolo Argiloso sob cultivo mínimo, no qual a compactação gerou redução na área mobilizada pelo sulcador de uma semeadora.

O solo sob cultivo mínimo apresentou a maior resistência na camada de 0,15-0,25m, porém essa não foi acompanhada pela redução da macroporosidade (Figura 10). Isso pode se atribuído ao fato de que, no momento da obtenção deste parâmetro no campo, o ponto de coleta encontrava-se em uma área não atingida pela haste escarificadora, pois variações na profundidade impostas pela compactação são passíveis de ocorrência, fazendo com que a relação entre o espaçamento entre hastes e a profundidade teórica de trabalho do escarificador fosse maior ou menor que 1,3.

Alterações impostas pelo tráfego de 4 e 8 passadas no solo sob semeadura direta podem ser visualizadas na Figura 11. Na camada superficial, 4 passadas originaram um incremento na resistência à penetração de 134,2%. Já nas demais camadas o solo que teve 8 passadas apresentou o maior incremento. Na camada inicial, a explicação do maior incremento pelo SDc4, segundo Domínguez et al. (2000), pode ocorrer em algumas condições de densidade, resistência e teor de água do solo que favorece tal constatação. Segundo Nasr e Seles (1995), tais condições físicas do solo podem não só gerar uma impedância mecânica, como emergência mais lenta e menos completa.

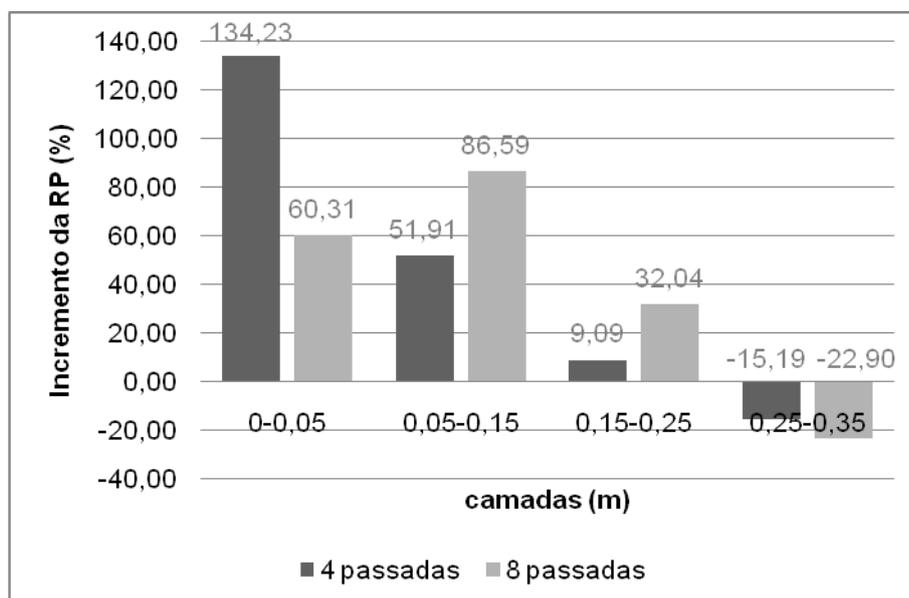


Figura 11 - Incremento da resistência à penetração (RP) ao longo do perfil de solo sob semeadura direta imposta pelo tráfego.

O incremento da resistência à penetração foi reduzindo ao longo do perfil, sendo que não foram encontradas mais evidências na camada de 0,25-0,35m. Isso pode ser atribuído ao peso da máquina sobre o solo, pois, segundo Botta et al. (2002b), em condições de máquinas pesadas, a compactação chega a níveis bem profundos, o que é manifestado pela alta resistência à penetração. Os mesmos encontraram aumento da resistência do solo devido ao aumento do carregamento, chegando a 55%. Como técnica de solução, os autores recomendam o uso de rodas duplas, reduzindo assim a pressão de contato pneu/solo.

A resistência à penetração é considerada como o parâmetro do solo mais sensível na detecção do efeito da compactação por alguns pesquisadores como Collares et al. (2006), Jorajuria e Draghi (2000), Botta et al. (2002b) e Streck et al. (2004). Assim, pode-se utilizar esse parâmetro no planejamento do tráfego de máquinas agrícolas, para evitar a compressão excessiva ao solo.

Na Figura 12 verifica-se que a relação entre a densidade com a resistência à penetração do solo obedeceu a uma tendência linear, concordante com Kamimura (2008) em um Argissolo Vermelho sob semeadura direta, e Secco et al. (2004) em Latossolo Vermelho submetido à semeadura direta e cultivo mínimo. Os últimos

autores citados também encontraram uma relação inversa entre a resistência e a macroporosidade do solo com o aumento do nível de compactação. Contudo, Suzuki et al. (2008) não encontraram relação entre estes parâmetros.

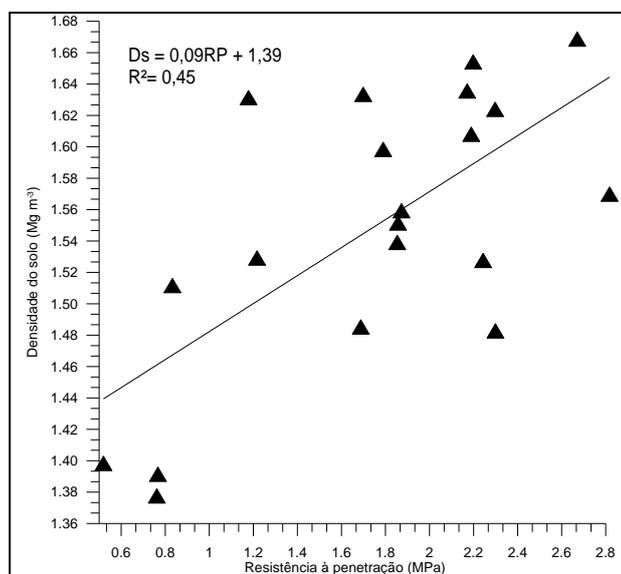


Figura 12 -Resistência à penetração em função da densidade do Argissolo Vermelho-Amarelo.

Ao longo do perfil de estudo, percebe-se que, no início do aumento da resistência do solo, há uma redução da densidade até um ponto que começa aumentar. Isto foi encontrado até a profundidade de 0,25m. Essa constatação deve estar aliada a reologia do solo, que também foi identificado por Suzuki et al. (2008) em solos do Rio grande do Sul.

4.4.2 Efeito da intensidade de tráfego e manejo na condutividade ao ar e hidráulica saturada do solo

A camada superficial do solo compreendida 0-0,05m apresentou diferenças nos fluxos de ar e água e também na resistência à penetração (Tabela 9). A intensidade de tráfego gerou alterações significativas na condutividade ao ar e a água. O tráfego proporcionou alguns efeitos danosos ao solo, como a redução da condutividade hidráulica que repercute na diminuição do armazenamento de água.

Os altos valores de fluxo de ar e de água deste solo devem estar atribuídos à mobilização realizada pelo sulcador da semeadora e a ação do sistema radicular, proporcionando um ambiente favorável para escoamento da água e do ar no solo. Tomando como base a relação direta entre o fluxo de ar com a taxa de difusão de oxigênio, em quatro solos de textura arenosa e franca arenosa de diferentes locais, Czyz (2004) encontrou efeitos danosos do tráfego, em que o aumento do tráfego de 0 a 4 passadas de trator (1,7Mg) gerou redução da taxa de difusão de oxigênio de 98,1 a 57,9g m⁻² s⁻¹. O autor ressalta que a aeração do solo é um fator limitante ao desenvolvimento de plantas em solos compactados.

Diferenças significativas na condutividade ao ar e hidráulica saturada foram encontradas somente na camada superficial, o que pode estar relacionado com a alta variação dos dados ao longo do perfil de solo observado pelo coeficiente de variação. Tsegaye & Hill (1998) e Warrick & Nielsen (1980) comentam que a variabilidade da condutividade hidráulica é geralmente alta, podendo chegar a valores de coeficiente de variação de 190%.

Na superfície, o maior fluxo de ar ocorreu no solo com oito passadas de trator, podendo estar relacionado ao cisalhamento no momento da compactação. Aliado a isso, a condutividade hidráulica saturada do solo foi maior nos tratamentos que sofreram compactação (SDc4, SDc8 e CMc), corroborando para essa constatação.

Tabela 9 – Condutividade ao ar (Kar) e hidráulica saturada (K θ s) médios nos tratamentos em estudo.

Tratamento**	K θ s	Kar
	-----cm h ⁻¹ -----	
Camada 0,00-0,05m		
SD	8,06 ns*	6,29 ns
SDc4	52,85	5,87
SDc8	25,96	12,18
CM	11,01	4,75
CMc	34,81	5,38
CV (%)	64,75	39,00
Camada 0,05-0,15m		
SD	1,24 ab	7,15 ns
SDc4	1,85 ab	3,43
SDc8	0,73 b	4,50
CM	4,18 a	11,39
CMc	1,48 ab	4,63
CV (%)	84,47	98,38
Camada 0,15-0,25m		
SD	0,91 b	9,91 ns
SDc4	2,95 ab	5,24
SDc8	10,44 a	5,82
CM	1,43 ab	3,92
CMc	0,86 b	4,37
CV (%)	163,41	90,82
Camada 0,25-0,35m		
SD	0,94 ns	5,78 ns
SDc4	1,31	9,08
SDc8	1,96	4,24
CM	1,84	8,01
CMc	0,94	3,50
CV (%)	53,43	56,29

*Médias seguidas da mesma letra, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

**SD - semeadura direta há 13 anos; SDc4 – semeadura direta com compactação de 4 passadas; SDc8 – semeadura direta com compactação de 8 passadas; CM – cultivo mínimo; CMc – cultivo mínimo em solo compactado e ns - não significativo.

Ao longo do perfil, o aumento da intensidade de tráfego não provocou mudanças significativas na condutividade ao ar, fato discordante com Czyz e Tomaszewska (1993), os quais demonstraram que a redução da aeração de um solo arenoso com aumento da intensidade de tráfego pode chegar de 23-68% na camada

arável (0-0,25m). Isso pode estar relacionado ao alto coeficiente de variação dos dados que não resultaram em diferença estatística.

Na camada de maior alteração estrutural do solo pelo tráfego (0,05-0,15m), não houve diferenças nas condutividades, porém, a escarificação proporcionou um aumento expressivo tanto na condutividade hidráulica saturada quanto na de ar. No SDc8 a elevada resistência do solo com a baixa condutividade hidráulica poderá promover restrições ao desenvolvimento radicular.

A condutividade hidráulica teve maior redução na camada 0,05-0,15m, chegando a 84,63% para o SD; 96,51% para o SDc4; 97,19% no SDc8; 62,04% no CM e 95,75% no CMc. Analisando a adição do tráfego no solo sob semeadura direta, percebe-se que a redução foi maior, fato também encontrado no solo sob cultivo mínimo compactado. Nessa camada, foi constatado o maior nível de compactação pelos dados de porosidade total e densidade do solo (Tabela 8), fato concordante com Beltrame et al. (1981) que encontraram uma redução da condutividade hidráulica do solo em até 5 vezes, resultando em um maior tempo de drenagem que originou um maior encharcamento de um Planossolo. Consonante a isso, Abreu et al. (2004) encontraram maior condutividade hidráulica no solo sob cultivo mínimo com crotalaria (*Crotalaria spectabilis*) do que sob semeadura direta em experimentos com escarificação mecânica e biológica por plantas de cobertura em um solo similar ao do presente estudo. Os pesquisadores atribuíram aquele comportamento a maior formação de macroporos verticais.

Tudo isso pode ser esperado, visto que a condutividade hidráulica do solo está associada com a porosidade e a densidade do solo (BAGARELLO, 1997). Assim, as alterações impostas nessas propriedades (Tabela 8) proporcionaram as evidências citadas anteriormente.

Baseando-se na relação direta entre a condutividade hidráulica e a infiltração de água no solo, Camara & Klein (2005) observaram que a infiltração da água em um Latossolo Vermelho escarificado há 12 meses foi 2,2 vezes maior que a em solo sob semeadura direta. Isso foi atribuído ao processo de escarificação que gerou mobilização da estrutura com respectiva redução da densidade do solo.

Na camada sub-superficial do solo, não houve efeito significativo do manejo e do tráfego nos fluxos de ar e de água.

A ação biológica do sistema radicular do milho chamada de escarificação biológica por Abreu et al. (2004) é perceptível na primeira camada do solo, sendo

que a ação do tráfego é observada na segunda e na terceira camada. Além da ação “escarificadora” das raízes, a atividade biológica do solo é responsável pela estabilização dos agregados que afetam positivamente ou negativamente as condutividades. O processo de compactação foi mais expressivo na camada de 0,05-0,15m, reduzindo a condutividade hidráulica pela metade quando o solo foi submetido a $49,59\text{Mgkm ha}^{-1}$ (SDc8). Isso é explicado pela ação do carregamento ao solo, onde Streck et al. (2004), Håkansson (2005) e Horn e Fleige (2003) comentam que o tráfego de máquinas agrícolas gera redução dos poros maiores, aqueles responsáveis, principalmente, pela drenagem da água no solo, em poros menores, responsáveis pela retenção de água, repercutindo, principalmente, na diminuição da condutividade hidráulica do solo que, em épocas de estiagem, pode vir a restringir o desenvolvimento do sistema radicular.

Em solos de textura franco arenosa a arenosa, Czyz (2004) encontrou redução da aeração do solo na medida em que aumentou a densidade, concordante com as camadas de maiores densidade dos tratamentos SD e CMc (Tabela 8) e menores fluxos de ar e água (Tabela 9).

A escarificação foi mais eficiente na camada de maior alteração estrutural do solo (0,05-0,15m), manifesto pelo maior fluxo de ar e água. Em Latossolo Vermelho escarificado há 12 meses, Camara e Klein (2005) concluíram que o solo ainda mantinha uma capacidade significativa de conduzir água, sendo encontrada condutividade hidráulica oito vezes superior ao solo sob semeadura direta. Consonante a isso, em Latossolo Vermelho sob semeadura direta há 13 anos, Araujo et al. (2004) encontraram benefícios da escarificação na camada de 0-0,15m, expresso pela maior porosidade de aeração. Tal efeito também foi encontrado por Klein et al. (2008), que investigaram solo escarificado recentemente e sob semeadura direta há seis anos. Isto está relacionado à reologia do solo durante o processo de escarificação.

O cultivo mínimo não gerou a maior condutividade ao ar e hidráulica saturada na camada superficial, o que pode estar relacionado à rugosidade superficial do solo que estava alterada, função da escarificação e a semeadura que foi realizado no início de implantação do experimento. Tudo isso pode ter gerado selamento superficial no momento das chuvas (Figura 1) que ocorreram durante a execução do experimento. Camara e Klein (2005) ressaltam que a rugosidade do solo é um dos fatores que afeta a dinâmica da água no solo. Tal alteração foi

proporcionada pelo escarificador que não possuía disco de corte de palha. Esta alteração foi menor no cultivo mínimo compactado. Vasquez e De Maria (2003) observaram que, além das alterações no escoamento superficial da água, há alterações no armazenamento temporal da água no solo.

Como já abordado neste estudo, a aeração é um dos fatores físicos mais importantes no desenvolvimento radicular e rendimento das culturas que se desenvolvem em solos compactados (CZYŻ; TOMASZEWSKA, 1993; LETEY, 1985). Assim, em situações de elevada compactação são esperadas reduções no desenvolvimento das plantas pela deficiência na difusão de gases junto ao sistema radicular (STEPNIEWSKI et al., 1994). Alguns desses efeitos, segundo SOJKA (1992), são manifestados pelo murchamento das plantas, fechamento dos estômatos e o desbalanço nutricional e hormonal das plantas.

A resistência do solo à penetração comprova que a camada de maior nível de compactação está situada ao redor dos 0,05-0,15m (Figura 13a), onde o solo sob cultivo mínimo com e sem ação da compactação apresentou maior resistência, levando a duas hipóteses: i. o solo já retornou ao seu estado inicial, ii. a resistência foi mensurada na entrelinha das hastes. Relacionado à duração da escarificação no solo, Rosa et al. (2007) encontraram duração de 2-4 anos, Botta et al. (2006) 2 anos e Mahl et al. (2004), 18 meses. Assim sendo, a possibilidade de ter ocorrido a segunda hipótese é maior.

Considerando 2MPa como limite crítico ao desenvolvimento radicular da planta (TAYLOR et al., 1966), constatou-se que os únicos que não excederam isso na camada efetiva de raiz (0-0,3m), foi o SDc4 e o SD. Isso corrobora com o fato de que a intensidade mais limitante foi a de 8 passadas e que o cultivo mínimo não foi eficaz na ruptura da camada compactada pelo tráfego da pá carregadora. Abaixo dessa camada, o SDc8 e o SDc4 apresentaram as menores resistências, podendo estar relacionado às alterações sofridas pelo solo antes do experimento. A elevação do nível de resistência interna do solo já era esperada e, segundo Kirkegaard et al. (1993), essa compactação afeta a distribuição e morfologia das raízes. Nesse sentido, Håkansson (2005) salienta que, mesmo em condições de boa aeração, o sistema radicular não consegue se desenvolver em solos com elevada resistência à penetração, sendo que em solos arenosos, o desenvolvimento é cessado quando a resistência à penetração chega a 2,5MPa.

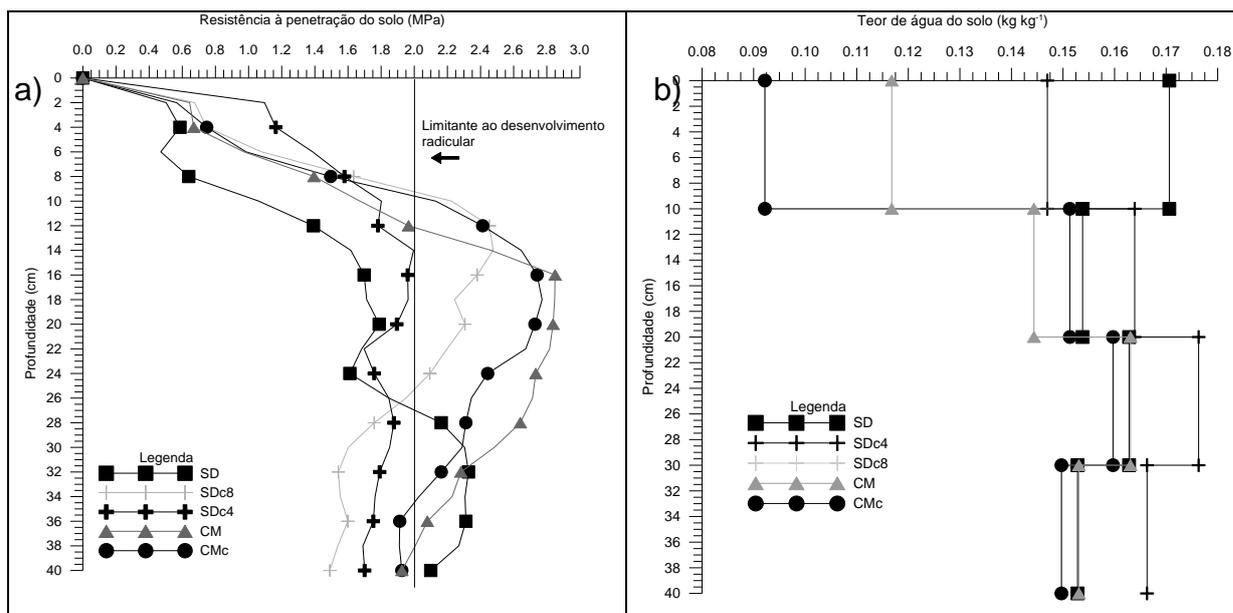


Figura 13 -a) Resistência à penetração do Argissolo Vermelho sob semeadura direta e cultivo mínimo e b) umidade gravimétrica

Avaliando o efeito da escarificação, não houve redução da resistência do solo em profundidade, efeito contrário aos dados de Collares et al. (2008). Estes autores, em um Argissolo Vermelho próximo ao presente estudo, encontraram efeitos da escarificação até 0,25m, manifestados pela redução da resistência do solo, porém a mesma não foi acompanhada pelo aumento da macroporosidade. Abreu et al. (2004), Secco et al. (2004) e Tormena et al. (2004) também verificaram menor resistência à penetração, porém maior macroporosidade em solos submetidos à escarificação. Al-Suhaibani & Al-Janobi (1997) observaram maior resistência na SD camada de 0,14–0,21m em solo arenoso, comportamento similar a este estudo. Isto pode estar relacionado à coleta em área não escarificada, como já comentado, ou área que sofreu ação do pneu da semeadora.

4.4.3 Efeito do manejo e do tráfego na relação solo-planta-máquina

A resistência do solo no início do desenvolvimento da cultura pode ser visualizada na Figura 14. A ação do tráfego de 24,79Mgkm ha⁻¹ (SDc4) elevou a resistência do solo sob semeadura direta a níveis críticos. O aumento da intensidade de tráfego para 49,59Mgkm ha⁻¹ gerou uma região de maior compactação nos 0,05-

0,20m, corroborando as constatações de Kamimura (2008) e Collares et al. (2006) de que essa é a zona de maior nível de compactação. Cuidados devem ser tomados neste solo, pois, segundo Soane e Ouwerkerk (1995), o efeito da compactação induzida pelo tráfego de máquinas agrícolas perdura durante todo o ciclo de cultivo em solos sob semeadura direta, podendo ou não ser restritivo ao desenvolvimento da planta.

A elevação da resistência também foi encontrada por Botta et al. (2002a) em solo franco argiloso sob sistema frutícola, no qual um trator de 44,6kW, considerado leve pelos autores, exercendo uma pressão de 81kPa, gerou incremento de 600% da resistência à penetração na camada 0-0,18m quando houve apenas uma passada com o trator, sendo acompanhada pelo aumento da densidade do solo. O aumento da densidade do solo não foi verificado no presente estudo, o que pode estar relacionado à umidade do solo, que foi maior no estudo dos referidos autores.

A escarificação reduziu a resistência do solo ao longo de todo o perfil do Argissolo Vermelho em estudo, não ultrapassando 1500kPa. Constata-se uma maior homogeneização da resistência deste solo comparado aos demais. Segundo Terminiello et al. (2007) e Spoor et al. (2003), isso é resultado do fissuramento e movimentação do solo pelo escarificador, em que há quebra da camada compactada e o movimento ascendente das camadas. Os primeiros pesquisadores encontraram que o escarificador conseguiu reduzir pela metade a resistência do solo no início de implantação da soja, o que proporcionou um ambiente mais favorável ao desenvolvimento da planta, conforme identificado pelas maiores quantidades de plantas e grãos por metro quadrado.

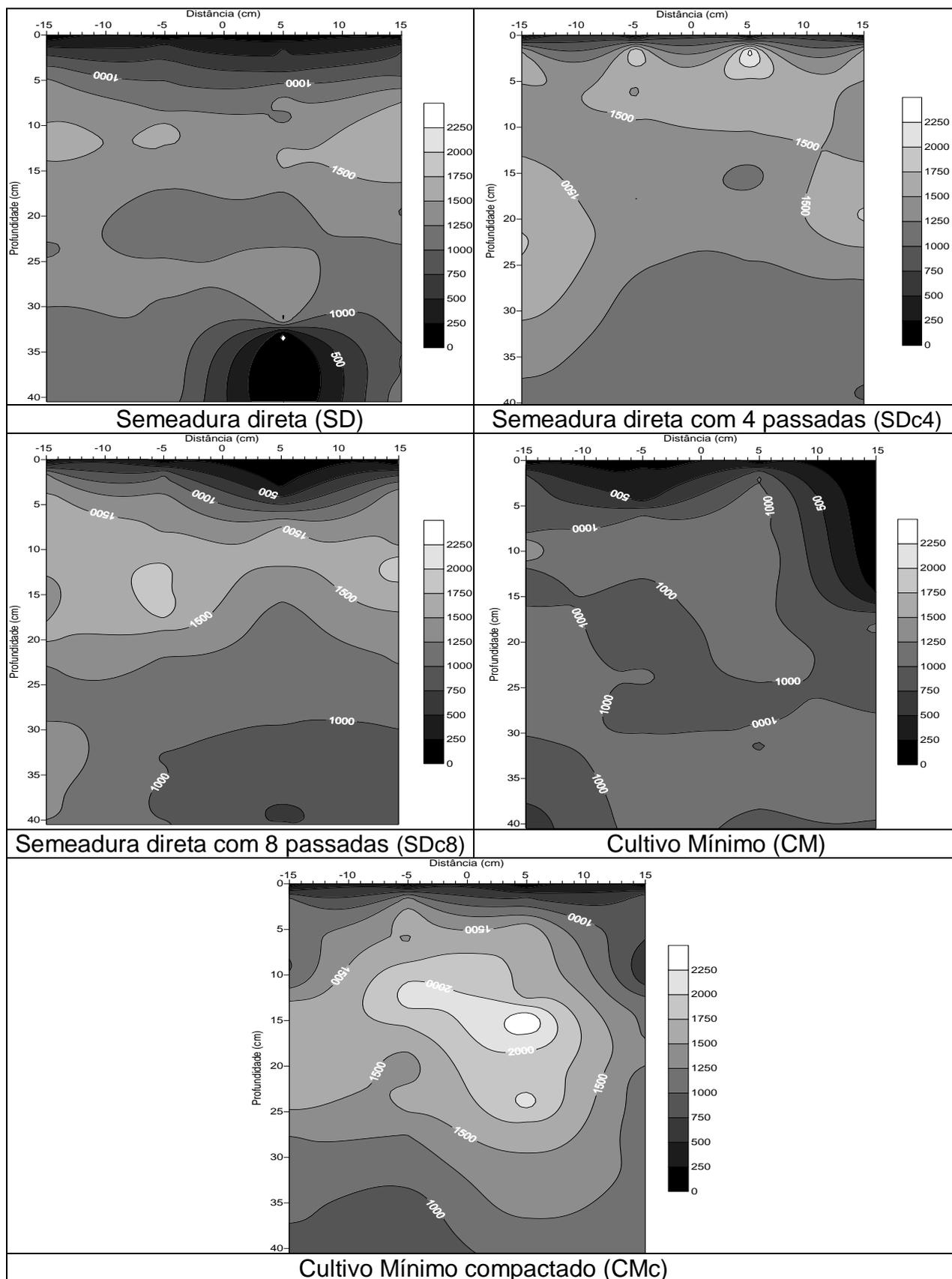


Figura 14 - Resistência à penetração (kPa) do Argissolo Vermelho submetido a níveis de compactação e manejo diferentes na sementeira do milho.

O solo compactado que foi escarificado (CMc) apresentou condições adversas do solo escarificado (CM), manifesto pela maior resistência ao longo do perfil. Isso demonstra que ação da compactação pelo tráfego se manteve mesmo após a descompactação mecânica.

No florescimento do milho, a resistência à penetração do solo sob semeadura direta (Figura 15) apresentou-se elevada na camada 0,05-0,15m, chegando a demonstrar zonas de alta resistência que proporcionou modificação da estrutura radicular. Isso foi encontrado no SDc4, porém, não se percebe mais efeito desta compactação. Ao contrário dos resultados deste estudo, Botta et al. (2002a) e Terminiello et al. (2007) encontraram efeito do tráfego até o fim do ciclo da cultura. Este fato pode estar relacionado à textura, conforme ressaltam Reichert et al. (2008), a compactação ocorre com maior intensidade nos solos argilosos, entretanto, esses solos são mais resistentes à desagregação que os solos arenosos.

A elevada resistência do solo sob semeadura direta (testemunha) já era esperado, manifestando o efeito acumulativo do tráfego ao longo do tempo. Alta resistência do solo sob semeadura direta acompanhada pela alta densidade foi encontrada por Balbuena et al. (2003). Nesse sentido, Reichert et al. (2008) explicitam que o grau com que o manejo de semeadura direta altera as propriedades físicas ainda é pouco conhecido e muito variável, devido às diferenças existentes de solos e climas onde é usada, e também as grandes variações de operações, tamanho de equipamentos e tipos de culturas empregados no sistema.

O efeito da intensidade de $49,59\text{Mgkm ha}^{-1}$ foi potencializada durante o desenvolvimento da cultura, pois o solo apresentou camadas com 2100kPa já nos primeiros $0,05\text{m}$, aumentando até 3500kPa nos $0,15\text{m}$. Se compararmos com a resistência no início do ciclo da cultura, percebe-se que a camada de $0,05-0,15\text{m}$, que apresentava resistência ao redor de 2000kPa , foi alterada. Isso está em consonância com Botta et al. (2002a). Tudo isso manifesta os efeitos nocivos do tráfego à estrutura física do solo que, segundo Raper (2005) e Botta et al. (2007) pode ser minimizado com o controle do tráfego ou uso de subsoladores, porém, a segunda hipótese deve ser acompanhada pelo controle do tráfego. Botta et al. (2002b) complementa que o uso do carregamento adequado entre eixos e o uso de rodado duplo podem minimizar a compactação na camada superficial, mas deve-se cuidar com as perdas de resistência do rolamento ao utilizar essa prática.

A alta resistência imposta pelo tráfego com $49,59 \text{ Mg km ha}^{-1}$ poderá induzir desenvolvimento superficial do sistema radicular. O efeito do tráfego na resistência do solo foi encontrado por Seixas et al. (2005), que observaram que o tráfego gerou redução da profundidade explorada pelas raízes do milho nos solos sob semeadura direta submetidos ao tráfego intensivo de uma colhedora agrícola de 12 Mg , a um trator de 4 Mg e outro solo submetido à subsolagem. Observaram ainda que as raízes se concentraram nos primeiros $0,15 \text{ m}$, sendo que o solo sob cultivo mínimo proporcionou um aprofundamento maior das raízes, resultando em maior produtividade.

No solo sob cultivo mínimo e cultivo mínimo compactado, embora havendo aumento da resistência, apenas o solo sob cultivo mínimo compactado chegou a valores considerados críticos. No presente estudo, no solo que foi compactado com uma pá carregadora e sofreu escarificação posteriormente, os resultados corroboram para a constatação da redução da eficiência do escarificador no rompimento de camadas excessivamente compactadas.

O tráfego não alterou a resistência nas camadas mais sub-superficiais, ao contrário do observado por Botta et al. (2002b). Contudo, isto, segundo os autores, pode estar relacionado à pressão do carregamento que não foi tão excessiva. No estudo de Rosolem et al. (1994), a resistência à penetração de $0,69 \text{ MPa}$ já ocasionou redução de 50% no crescimento radicular da cultura da soja, sendo que precauções devem ser tomadas.

O efeito do manejo na planta pode ser visualizado através da distribuição do sistema radicular do milho na Figura 16. As raízes nos solos sob SD, SDc4, SDc8 e CMc se concentraram nos 0,15m. O solo sob CM foi o único a apresentar concentração além desta profundidade, demonstrando uma melhoria física proporcionada pela escarificação do solo. O efeito da escarificação está consonante a Seixas et al. (2005), que encontraram maior distribuição das raízes de milho em profundidade no solo subsolado do que sob semeadura direta. Em solo argiloso compactado com uma pá carregadora, Collares et al. (2008) concluíram que a escarificação promove um ambiente mais favorável ao desenvolvimento da planta ocasionado pela redução da resistência do solo. Os mesmos encontraram raízes se desenvolvendo até 0,30m, sendo que no solo sob ação do tráfego, essas não ultrapassaram os 0,10m, tendo como consequências a redução da área foliar, altura da planta e o declínio de 17% da produtividade.

A eficiência da escarificação foi reduzida no solo sob ação do tráfego da pá carregadora, sendo que (pressão de contato pneu/solo de 260,7kPa aproximadamente) as raízes não ultrapassaram os 0,10m (Figura 16). Isso é explicado pelo movimento do solo na mobilização, pois, conforme relata Godwin (2006), o movimento do solo perante a ação de ferramentas verticais estreitas ocorre de forma ascendente; sendo assim, com o solo compactado, a resultante das forças internas de ruptura tende a ser reduzida, proporcionando redução da área mobilizada e, conseqüentemente, a redução da resistência interna do solo. A baixa eficiência da escarificação em solo com elevado nível de compactação também foi encontrada por Collares et al. (2006) em Argissolo Vermelho, em que os solos que sofreram ação do tráfego de uma pá carregadora (similar a usada no presente estudo) com intensidades e tempos de aplicação diferentes promoveram maior impedimento mecânico à passagem da raiz. Os autores encontraram que a eficiência do escarificador foi afetada pela alta resistência, pois os solos que não sofreram compactação prévia apresentaram um melhor desenvolvimento radicular, concordando com este estudo.

A variação do sistema radicular também é afetada pela variabilidade temporal do teor de água do solo, que por sua vez é influenciada pela compactação do solo.

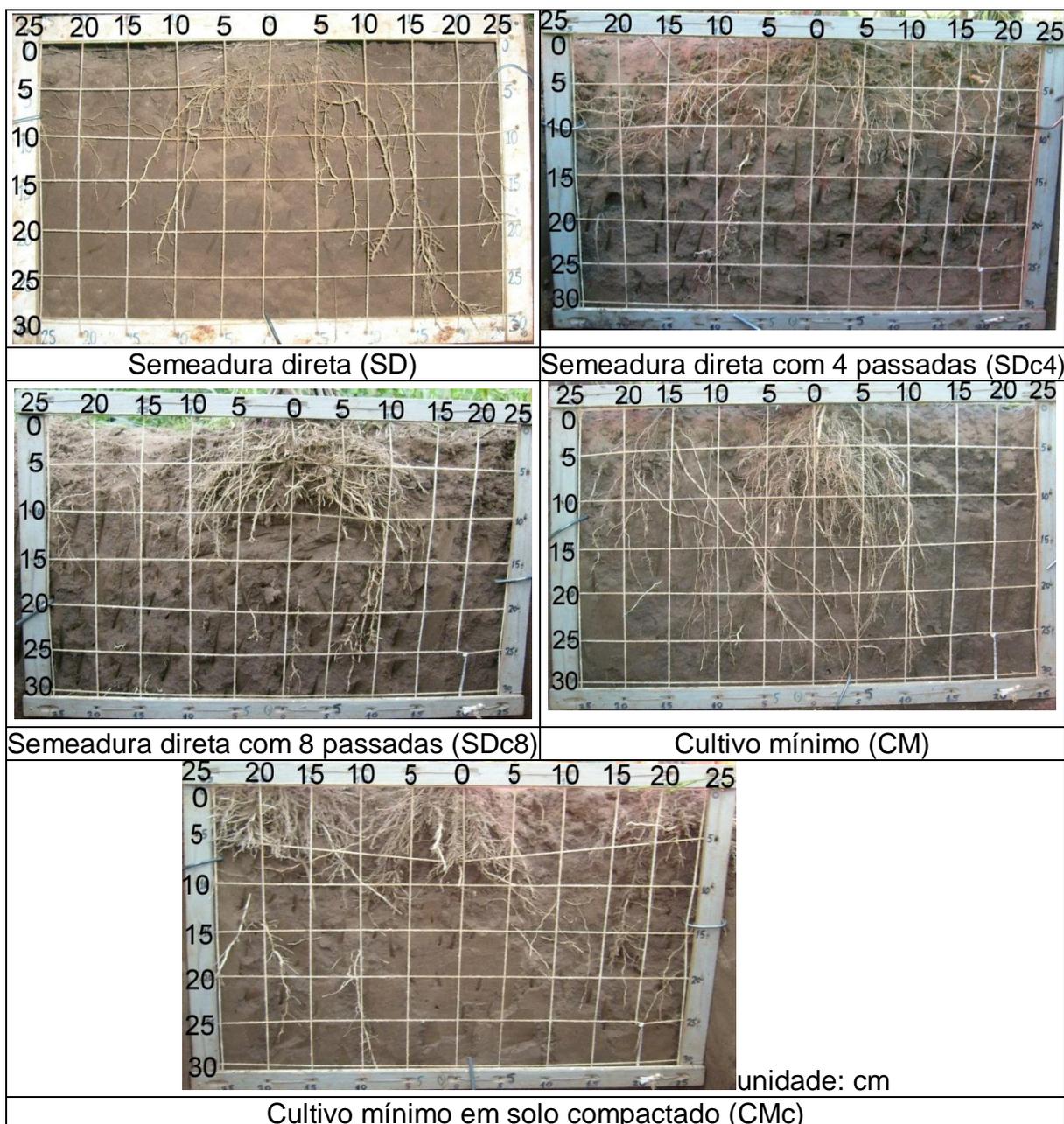


Figura 16 -Distribuição do sistema radicular no Argissolo Vermelho-Amarelo sob semeadura direta e cultivo mínimo.

O aumento da intensidade de tráfego gerou uma redução da área explorada pelo sistema radicular (Figura 16), pois, além de se concentrar em superfície, as mesmas se concentraram ao redor do caule da planta. Isso está relacionado à alta resistência deste solo em superfície, como identificado na Figura 15 e também à alta saturação por alumínio (Tabela 1) e baixa fertilidade natural do solo, demonstrando que este solo deveria ter sido corrigido com calagem e mobilizações mecânicas. Restrição ao desenvolvimento de planta também foi encontrado por Jorajuria &

Draghi (2000) quando a intensidade de tráfego de um trator pesado foi de 105 Mgkm ha⁻¹ (10 passadas). A baixa fertilidade natural explica o crescimento restrito das raízes em profundidade (Tabela 1), porém, a concentração dessas ao redor do caule demonstra o efeito do tráfego.

O manejo de semeadura direta já impõe uma estrutura mais densa ao solo, em função do acúmulo de tráfego ao longo do tempo e pode ser prejudicial à planta quando há falta de rotação de culturas e o não controle do nível de tráfego na área. Nesse sentido Reinert et al. (2008) concluíram que a semeadura direta elevou a densidade de um Argissolo Vermelho a níveis restritivos à expansão do sistema radicular. Essa compactação do solo afeta a morfologia e a distribuição das raízes no solo (SILVA; ROSOLEM, 2002), sendo que pode causar redução de até 60% do crescimento radicular de algumas espécies (SILVA; ROSOLEM, 2002; PANAYIOTOPOULOS et al., 1994).

A redução da área explorada pela raiz pode resultar no declínio da produtividade da cultura, gerando impactos econômicos negativos. Nesse contexto, Botta et al. (2007) investigando o impacto econômico da intensidade de tráfego, relatam que uma lavoura de milho que teve intensidade 15,5Mgkm ha⁻¹ gerou uma renda de US\$ 161,5 ha⁻¹ no primeiro ano e US\$ 331 ha⁻¹ no segundo ano, sendo que o preço do milho era de US\$ 85 t⁻¹. Os mesmos, estudando a intensidade de 36,4Mgkm ha⁻¹ encontraram redução na produtividade de 1,5, 3,8 e 5,0% respectivos ao primeiro, segundo e terceiro ano de estudo. Em solo com cevada (*Ordem vulgare L.*), Riley (1994) não observou grandes diferenças no rendimento entre o solo com 26Mgkm ha⁻¹ do 14Mgkm ha⁻¹, porém, aquele solo que foi submetido a 4 passadas de 26Mg km ha⁻¹ gerou uma compactação que perdurou por até 3 anos.

O nível de tráfego de 24,79Mgkm ha⁻¹ no solo sob semeadura direta não interferiu na profundidade efetiva do sistema radicular, pois as mesmas se concentraram na mesma camada do solo sob SD. A menor distribuição das raízes no solo sob semeadura direta está de acordo aos dados de Mello Ivo e Mielniczuk (1999), os quais encontraram raízes de milho em um solo Argissolo Vermelho escuro sob semeadura direta e sistema convencional concentradas na camada superficial. Isso é resultado do tráfego acumulado ao longo do tempo. Seixas et al. (2005) também encontraram maior concentração das raízes na superfície, sendo que o solo

compactado com um trator agrícola proporcionou um desenvolvimento mais horizontal das raízes.

Outro fato observado foi à maior concentração de raízes secundárias nos solos sob semeadura direta do que sob cultivo mínimo. Segundo Mello Ivo e Mielniczuk (1999), isso pode ser atribuído ao maior conteúdo de matéria orgânica e à estrutura, que proporciona um contato maior da raiz com o solo. Contudo, Collares et al. (2008) ressaltam que, em condições restritivas à expansão radicular, as raízes, além de se desenvolverem em superfície, modificam sua morfologia, manifestando um maior número de raízes secundárias.

O sistema de semeadura direta proporcionou um ambiente mais favorável à planta, pois houve a maior massa seca de raiz (MSR) dentre os tratamentos (Tabela 10), chegando a ser quase 3 vezes superior ao menor que foi o solo sob cultivo mínimo compactado. Ressalta-se que as condições meteorológicas que ocorreram durante o período de estudo (semeadura-floração) foram favoráveis a um bom teor de água no solo, como pode ser visualizada nos dados de precipitação média mensal (Figura 1).

Tabela 10 – Massa seca de raiz média de milho em Argissolo Vermelho sob semeadura direta com intensidades de tráfego diferenciadas e cultivo mínimo.

Tratamentos	Massa seca de raiz (g planta ⁻¹)
Semeadura direta	39,8 a*
Semeadura direta com 4 passadas	24,1 b
Semeadura direta com 8 passadas	13,3 b
Cultivo mínimo	19,0 b
Cultivo mínimo em solo compactado	14,0 b
Desvio padrão	11,5
Coeficiente de variação (%)	33,3

* Médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

O aumento da intensidade de tráfego gerou redução significativa da MSR no solo sob semeadura direta. Isso pode estar atribuído ao incremento da resistência à

penetração do solo (Figura 16) que nas camadas superficiais chegou a valores superiores a 50%. Além disso, na camada de 0,05-0,15m houve uma redução da condutividade ao ar (Tabela 9). Essa redução também foi encontrada por Silva e Rosolem (2002). Essa redução da MSR é explicada pelo desenvolvimento das plantas em solos compactados, nos quais há redução do comprimento das raízes associada ao aumento do diâmetro (FERNANDEZ, 1995), resultando em restrições ao desenvolvimento da planta. Nesse contexto, Czyz (2004), trabalhando com trigo cultivado em solos arenosos submetidos a intensidades de tráfego diferenciadas, encontrou redução da MSR com o aumento do nível de compactação, também havendo restrições o desenvolvimento radicular. Contraditório a isso, Mello Ivo e Mielniczuk (1999) não encontraram influência no sistema de preparo de um Argissolo Vermelho-Escuro sob semeadura direta, cultivo mínimo e sistema convencional, embora havendo diferenças na morfologia das raízes. Essa constatação também foi encontrada por Foloni et al. (2003) em experimento de milho cultivado em vaso, submetido a níveis de compactação. Isto é explicado pelo fato de que, apesar da diferença morfológica e da distribuição das raízes nas fases iniciais de crescimento, não houve nenhum fator limitante ao crescimento nestas áreas a ponto de interferir de maneira diferenciada no crescimento final das plantas (MELLO IVO; MIELNICZUK, 1999).

O nível de compactação aumentou gradualmente a demanda de esforços solicitados à haste sulcadora (Figura 17 e 18), tanto o esforço horizontal como o vertical. O aumento da intensidade de 24,79Mgkm ha⁻¹ para 49,59Mgkm ha⁻¹ não provocou muitas alterações no esforço. Efeito similar foi encontrado por Bonini et al. (2008) em Latossolo Vermelho compactado com intensidades de 0 a 5 passadas com rolo compactador. Isso pode estar relacionado com as alterações impostas pelo tráfego de 24,79Mgkm ha⁻¹ ao solo que já provocou compactação; assim, a estrutura aumentou sua capacidade de suporte. Esse aumento foi acompanhado pelo maior nível de resistência do solo (Figura 16).

Os sistemas de manejo apresentaram variações diferenciadas tanto no esforço horizontal e vertical, como no de tração, onde a compactação no solo sob cultivo mínimo gerou a maior resistência à mobilização executada pelo sulcador. Isso também foi encontrado em solo argiloso por Rosa et al. (2008), onde a menor demanda de esforço horizontal foi apresentada pelo solo escarificado há 6 meses, porém, em um Nitossolo Vermelho Mahl et al. (2004) não encontraram variação na

demanda de esforço de tração entre o solo submetido à semeadura direta e cultivo mínimo há 18 meses. Efeito similar a Mahl et al. (2004) foi encontrado por Furlani et al. (2005) em um Latossolo Vermelho-Escuro, mas encontraram maior consumo de combustível no solo sob cultivo mínimo. O maior consumo de combustível é proporcionado pela maior patinação das rodas motrizes do trator. Tal comportamento pode estar associado ao tempo de realização da escarificação que foi suficiente para que o solo retorne às condições iniciais. Alta demanda de esforços no solo sob cultivo mínimo compactado em conjunto com a maior resistência à penetração e menor porosidade do solo confirmam o maior nível de compactação deste e a ineficiência do escarificador na redução de tais efeitos.

Algumas práticas podem ser empregadas para redução da compactação no CMc, como estímulo a atividade biológica do solo (quando o nível de compactação não é excessivo), controle de tráfego (BOTTA et al., 2004), adequada pressão de insuflagem (HÅKANSSON, 2005), tráfego em condições de friabilidade do solo, uso de mecanismos rompedores de solo com mínima perturbação da estrutura (SPOOR et al., 2003) e uso de haste sulcadora na semeadura. Cada prática dependerá do nível de compactação do solo. A descompactação deve ter a meta de fissurar o solo e não rotacioná-lo, sendo que o emprego de escarificadores vem a contribuir para esse efeito (SPOOR et al., 2003). O autor ressalta que independente da prática utilizada para descompactação, deve-se considerar a não alteração da capacidade de suporte; como exemplo disso, não deve ser realizado tráfego sobre o solo após a escarificação, pois o mesmo está em fase de reestruturação.

O cultivo mínimo no solo compactado, além de demonstrar as maiores demandas de esforços, restringiu o aprofundamento do sistema radicular, conforme relatado anteriormente. As demandas de tração encontradas neste estudo foram superiores aos valores preconizados pela ASAE (1996), demonstrando a importância de sua medição para alimentação do banco de dados deste em relação solos do Rio Grande do Sul.

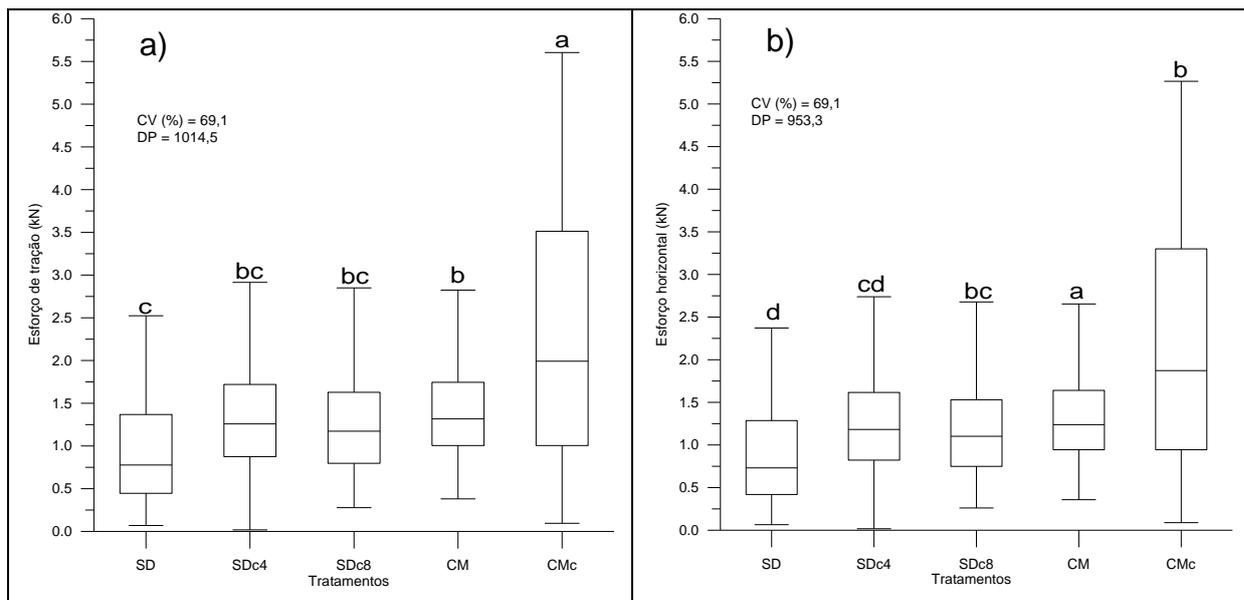


Figura 17 -Percentis do esforço tração (a) e do esforço de horizontal (b) nos tratamentos.

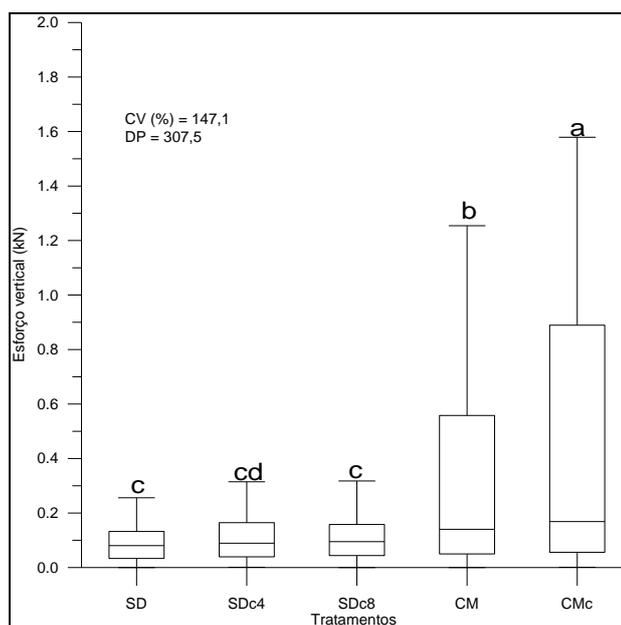


Figura 18 -Percentis dos esforços verticais

Comparando a variação dos quartis 25–75% do esforço horizontal nos solos sob semeadura direta, verifica-se que o SD variou de 0,53 a 1,16kN, o SDc4 de 0,62 a 1,43kN e o SDc8 de 0,55 a 1,40kN. Percebe-se que houve aumento da demanda quando o solo foi trafegado, porém, o SDc8 não provocou muitas alterações em

relação ao SDc4. Como comentado, tal fato pode ser explicado pela pressão exercida ao solo que não deve ter sido maior que a pressão de pré-consolidação.

O esforço vertical máximo foi encontrado no solo CMc, sendo que o valor foi maior que a média do esforço horizontal da maioria dos tratamentos em estudo. Isso pode acarretar em maior desuniformidade da profundidade de trabalho, gerando maior consumo de combustível. Em Latossolo Vermelho sob semeadura direta e cultivo mínimo com diferentes tempos de implantação, Rosa et al. (2008) encontraram no máximo 5,5kN de esforço vertical, valor bem abaixo deste estudo, porém, a demanda de esforço horizontal chegou a 3,17kN. Isto pode demonstrar que a ação do carregamento em solo arenoso é maior na compactação vertical.

Avaliando o teste de médias (Figura 17) dos esforços, constata-se que o solo sob SD diferiu do CM e CMc no esforço de tração, mas não diferiu do SDc4 e do SDc8. A escarificação elevou a resistência do solo, pois demandou a maior tração dentre os tratamentos, confirmando que não há mais efeito deste processo no solo na demanda de esforços e, o solo, encontra-se em situações diferentes da condição inicial. Após quatro anos decorridos da escarificação, Rosa et al. (2008) concluíram que o solo apresentava condições diferentes do solo sob semeadura direta, isto foi manifestado pela maior demanda de tração. Similarmente, Furlani et al. (2004) encontraram demanda de tração diferente entre o Nitossolo Vermelho escarificado do solo sob semeadura direta, sendo que a maior demanda foi exigida pelo escarificado. Os mesmos encontraram que a capacidade de campo efetiva no solo escarificado foi menor em função da maior patinação e demanda de tração. A elevação da demanda de tração no solo escarificado resultará em maior demanda energética. Conforme Casão Júnior et al. (1998), é comum o trator não possuir reserva de torque suficiente para o serviço de semeadura.

A demanda de tração no solo compactado que sofreu escarificação pode ser considerada elevada, visto que em Nitossolo Vermelho escarificado, Furlani et al. (2004) encontraram 2,42kN e, em Latossolo Vermelho, Rosa et al. (2008) encontraram 2,3kN, sendo que ambos os solos são argilosos.

A intensidade de tráfego aumentou a demanda de tração, porém, ao dobrar a intensidade, não houve diferença significativa. Realizando uma relação entre o aumento da intensidade de tráfego que gera aumento da densidade do solo que por sua vez aumenta a demanda de tração, Botta et al. (2004) não observaram diferenças na densidade e resistência à penetração do solo sob semeadura direta

entre as intensidades de 0 a 4 passadas de um trator com pressão de contato de 65,64kPa. Por outro lado, Botta et al. (2007) encontraram diferenças na resistência e densidade do solo quando submetido ao trânsito de um trator pequeno que exercia 81kPa ao solo manejado com pomares. Efeitos maiores poderiam ter acontecido em maiores umidades do solo. Mesmo não alterando significativamente a demanda de esforços, as modificações ocasionadas pela intensidade de tráfego do SDc8 permanecerão no banco de tensões do solo ao longo do tempo, podendo ser potencializadas se utilizar o solo em condições inadequadas de teor de água.

A estrutura do solo não ofereceu efeito rotacional à haste sulcadora, visto que o momento foi constante entre os tratamentos (Tabela 11). Tal fato é concordante com Rosa et al. (2008).

O manejo do solo e o nível de tráfego não provocaram alterações na profundidade de trabalho (Tabela 11). Este fato pode estar relacionado às dimensões geométricas usadas na haste que não favorece a tal diferenciação. A demanda de tração, segundo Collins & Fowler (1996) é dependente de propriedades do solo, velocidade de operação, design da haste sulcadora e profundidade de trabalho. Nesse sentido, os mesmos observaram que, com o aumento da profundidade de trabalho, há aumento da demanda de tração. Seguindo esse raciocínio, o aumento de tração demonstrado entre os tratamentos estudados está relacionado à estrutura massiva do solo originada pela compactação e demonstrada pela concentração do sistema radicular na profundidade que atuou a haste sulcadora.

Uma variação da profundidade de trabalho de haste sulcadora pode ser esperada em situações diferenciadas de cobertura vegetal, alterações de velocidade (CASÃO Jr, 2000) e nível de compactação. Porém, neste estudo, o nível não foi capaz de provocar alteração deste parâmetro.

Tabela 11 – Momento e profundidade de trabalho da haste sulcadora.

Tratamento	Mo		Pt	
	Nm		cm	
SD	3,12	ns	10,3	ns
SDc4	3,12		10,0	
SDc8	3,12		10,0	
CM	3,12		9,9	
CMc	3,12		9,3	
CV (%)	0		1,02	
DP	0		0,86	

* FH – esforço horizontal; FT – esforço de tração; FV – esforço vertical; Mo - momento associado à ferramenta; Pt – profundidade de trabalho; CV – coeficiente de variação; DP desvio padrão; ns - não significativo.

** Médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

O solo que foi escarificado, embora não demonstrasse a menor demanda de tração como constatado por Al-Suhaibani e Al-Janobi (1997) em solo arenoso e Rosa et al. (2008) em solo argiloso, apresentou raízes desenvolvendo-se em profundidade e com um fluxo maior de ar e de água (38,6% e 95,7% respectivamente), aparentemente não demonstrando efeito da compactação no solo. Tais efeitos benéficos da escarificação também foram encontrados por Araujo et al. (2004) quando investigaram um Latossolo Vermelho sob semeadura direta há 13 anos contra cultivo mínimo.

4.5 Conclusões

A intensidade de tráfego de 24,79Mgkm ha⁻¹ de um trator + pulverizador de médio porte potencializa a compactação de um Argissolo Vermelho-Amarelo sob semeadura direta, gera concentração das raízes em superfície.

A duplicação da intensidade de tráfego não gera alterações na porosidade e densidade do solo e nem na exigência de tração de uma haste sulcadora de semeadora.

A escarificação como única técnica/solução da descompactação do solo trafegado com pressão de 260,7kPa não é suficiente. Esse solo apresenta a maior exigência de tração do que solo sob semeadura direta, bem como o menor desenvolvimento de raízes.

Após seis meses transcorridos, a escarificação no solo franco argilo-arenoso sob semeadura direta (sem ação do tráfego adicional) não há mais alterações na exigência de tração, bem como apresenta condições físicas similares a condição inicial.

O nível de compactação imposto pelo tráfego de máquinas aumenta gradualmente à demanda de esforços horizontal e vertical solicitados à haste sulcadora, sendo que a estrutura desse solo não oferece efeito rotacional à haste sulcadora.

5 CAPÍTULO 2.

ALTERAÇÕES FÍSICAS E MECÂNICAS DO SOLO SOB CAMPO NATIVO IMPOSTAS PELO TRÁFEGO E DESSECAÇÃO

5.1 Introdução

O campo nativo ainda é o maior recurso forrageiro no Rio Grande do Sul, havendo a consorciação de gramíneas e leguminosas que convivem diretamente sob a ação do pastejo, fogo e variações climáticas (FARINATTI et al., 2006).

O Rio Grande do Sul possuía em torno de 12 milhões de hectares de campo nativo em 2002 (MOOJEN; MARASCHIN, 2002). Contudo, o pisoteio de animais em demasia e o uso de maquinários regulados erroneamente podem afetar drasticamente a qualidade física do solo, devido à compactação. Com a modernização do sistema moto-mecanizado, objetivando atender a alta demanda agrícola, teve-se um aumento no tamanho e, conseqüentemente, da massa das máquinas agrícolas, o que resultou em modificações das propriedades físicas do solo, quando o tráfego ocorre em condições errôneas de teor de água. Salienta-se que tal aumento associado à pressão inadequada de inflação dos pneus, potencializa tais efeitos.

Os pneus utilizados nos tratores e colhedoras agrícolas comercializadas no Brasil possuem a parte lateral rígida, sendo chamados de pneus de banda diagonal. Essa rigidez impede que o pneu se molde ao solo de acordo com as irregularidades do terreno e, por isso, a sua área de contato fica reduzida, aumentando a pressão na superfície do solo (SILVA et al., 2000b). Assim, a compactação do solo resultante do tráfego de máquinas e implementos agrícolas em condições de elevado teor de água, tornou-se uma das principais causas da degradação física do solo, na qual características do solo como a porosidade e densidade são alteradas de forma nociva à estrutura, podendo levar ao impedimento da expansão do sistema radicular das culturas.

Degradação da estrutura física de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob integração lavoura-pecuária foi encontrada por Ayarza et al. (1999) manifestada pela redução da percentagem de agregados maiores que 2mm após quatro anos de cultivo de soja. Similarmente, Alvarenga e Davide (1999) encontraram maiores

densidades em Latossolo Vermelho-Escuro sob culturas anuais do que pastagem nativa, sendo 1,1 contra 1,4Mg m⁻³, respectivamente. Os autores encontraram uma redução de 50% na percentagem do tamanho de agregado maiores que 2mm, e uma redução de 23 a 15% da macroporosidade. Os autores, com base na análise de componentes principais, chegaram à conclusão que as características físicas mais correlacionada com as alterações dos agroecossistemas são a densidade do solo, porosidade total e percentagem de agregados maiores que 2mm.

Outros cuidados com a conversão de campo nativo em lavoura agrícola envolvem o manejo das espécies ali presentes via controle químico para a implantação da cobertura vegetal do manejo da semeadura direta. Conforme comenta Pitelli (1987), a competição é conhecida como a interferência direta das plantas daninhas sobre as culturas agrícolas, resumindo-se em concorrência por nutrientes minerais, luz, água e espaço, resultando em declínio da cultura implantada. Nesse sentido, na medida em que se reduz a competição entre as espécies via uso de herbicidas, aproximando-se a uma monocultura, obtêm-se os máximos rendimentos das espécies introduzidas (MAGALHÃES, 1986 apud GOMAR et al., 2004). Assim sendo, além dos cuidados com o manejo de máquinas agrícolas, têm-se, também, os cuidados com a dessecação de tais plantas.

Para o cultivo de plantas em área de campo nativo, o emprego de haste sulcadora de adubo nas semeadoras agrícolas torna-se necessário, uma vez que essa promove a ruptura da camada superficial do solo (em torno de 0,13m) que por ventura esteja sob compactação advinda do tráfego de máquinas ou pisoteio animal. Reis et al. (2006) ressaltam que o sucesso da produtividade de uma cultura está em parte relacionado com o ambiente ao redor da semente, onde aspectos relacionados à temperatura, teor de água e aeração do solo são diretamente influenciados pelo tipo de mecanismo de abertura do sulco.

A demanda de tração de hastes sulcadoras em campo nativo é influenciada pela vegetação ali remanescente, pois o sistema radicular, além de favorecer uma estrutura física mais resistente, acaba funcionando como barreira à passagem da haste. Bertol et al. (1997) encontraram redução da profundidade de trabalho de todos sulcadores avaliados (disco defasado, disco côncavo e disco duplo) quando aumentou a massa de resíduos.

Com isso, torna-se necessária a criação e adaptação de metodologias que visem mensurar outras propriedades do solo que considerem a sua resistência

mecânica em condições dinâmicas que geralmente são pouco estudadas na física do solo convencional. Dentre essas propriedades está a resistência ao cisalhamento considerada uma importante propriedade dinâmica na interação máquina-solo (BAVER et al., 1960).

Há alguns aparelhos de medição da resistência ao cisalhamento *in situ*, como o *torvane* e *sheargraph* (McKYES, 1989), considerados testes de cisalhamento torcional. O *torvane*, além de possibilitar a mensuração da resistência do solo a cisalhar *in situ*, possui vantagens como: verificação do nível de compactação do solo; redução de custos por não necessitar da realização de análises de solo, visto que poucos laboratórios possuem aparelhagem de medição da resistência ao cisalhamento; e a rápida obtenção da resistência do solo (McKYES, 1989).

Visto que o campo nativo mostra-se como uma atividade ecologicamente sustentável pelo baixo uso de insumos, baixa quantidade de resíduos produzidos e manutenção da biodiversidade tanto animal como vegetal (SOARES et al., 2007), o estudo de técnicas de soluções para redução da compactação é vital para a sustentabilidade do sistema.

O objetivo deste estudo foi avaliar as alterações das propriedades físicas do solo sob campo nativo, proporcionadas pelo tráfego de máquinas agrícolas e a dessecação, bem como, as alterações geradas na exigência de tração de uma haste sulcadora de semeadora.

5.2 Material e métodos

5.2.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido no segundo semestre do ano de 2007, em área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria. Delimitada entre as coordenadas 28° 38' 21.9''S e 53° 02' 20.4''O, com altitude de aproximadamente 95m, sendo que o clima da região enquadra-se como "Cfa" (Köppen), caracterizado por clima subtropical úmido sem estiagem, com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C, e temperatura do mês mais frio variando entre -3°C a 18°C (MORENO, 1961).

A área encontra-se sob campo nativo há mais de 20 anos, sendo que a vegetação predominante é grama boiadeira (*Paspalum notatum*), grama-paulista (*Cynodon dactylon*) e trevo-branco (*Trifolium repens*).

5.2.2 Solo

O solo do experimento é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (EMBRAPA, 2006) de textura franco arenosa com características granulométricas e químicas apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Composição granulométrica e química do Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico em estudo

Camada (m)	Areia	Silte	Argila	pH*	MO	Saturação (%)	P	K	CTCef	
	-----g kg ⁻¹ -----				%	Al	Bases	----mg dm ⁻³ ----		
0,0-0,1	674	224	102	5,1	1,5	24	54	6,8	0,13	3,3
0,1-0,2	647	236	117	4,8	0,9	39	39	3,0	0,05	3,1
0,2-0,3	616	255	129	4,9	0,9	42	45	2,2	0,04	3,8
0,3-0,4	605	261	134	4,8	0,9	54	18	1,5	0,05	2,8

* pH em água 1:1.

5.2.3 Tratamentos e delineamento experimental empregado

Os tratamentos no campo foram distribuídos em blocos ao acaso, com três repetições, possuindo quatro tratamentos como segue: campo nativo - CN; campo nativo dessecado CNd; campo nativo com compactação adicional - CNc; campo nativo com dessecação e compactação adicional - CNdc.

A dessecação da área foi realizada no dia 18 de junho de 2007, utilizando 3% de roudaup, 5% de óleo mineral em um pulverizador costal de 20L.

Para avaliar o efeito do tráfego de máquinas agrícola na implantação de uma lavoura agrícola em solo sob campo nativo, foi simulado a compactação do solo através do tráfego de uma pá carregadora, a mesma empregada no capítulo 1. A compactação foi realizada no dia 22 de junho de 2007, executando duas passadas (Figura 19) que resultou em $24,67\text{Mgkm ha}^{-1}$ de intensidade de tráfego. Deslocando-se a 2km h^{-1} , o tráfego da parcela foi realizado de tal forma que os pneus comprimissem áreas paralelas entre si, e, com tráfego sobreposto ao anterior, para que toda área fosse igualmente compactada.



Figura 19 -a) Compactação do Argissolo Vermelho-Amarelo sob campo nativo. b) resultado da compactação

A pressão de contato pneu/solo foi estimada com o mesmo princípio utilizado no capítulo 1.

As parcelas possuíam 3m de largura por 8m de comprimento, sendo que o intervalo entre parcelas foi de 2m e entre bloco de 4m.

5.2.4 Especificações das máquinas e operações utilizadas

Como já comentado, a compactação da área utilizou a mesma pá carregadora descrita no capítulo 1 (ver p.31), e também o mesmo trator (ver p.33) para tracionar a haste sulcadora.

5.2.5 Coleta das amostras

As amostras com estrutura preservada do estudo foram extraídas aleatoriamente na parcela, sendo obtidas amostras das camadas 0,0-0,1m, 0,1-0,2m, 0,2-0,3m e 0,3-0,4m. As amostras foram coletadas em cilindros de aço inoxidável com auxílio de um extrator e de um martelo, sendo aberta uma trincheira até 0,50m. Em seguida, realizou-se a abertura das camadas do solo em patamares, evitando, assim, que a coleta de uma amostra afetasse a estrutura física do solo da próxima. Nessas mesmas camadas foram coletadas amostras com estrutura não preservada, para a determinação da consistência e da textura.

5.2.6 Determinações realizadas

a) Análise granulométrica e consistência do solo

A análise granulométrica foi efetuada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997), sendo que, para auxiliar a dispersão, empregou-se a metodologia proposta por SUZUKI et al. (2004).

A caracterização granulométrica do solo em estudo encontra-se na Tabela 12 (ver item 5.2.2. solo).

Para a obtenção da consistência do solo, utilizou-se a metodologia proposta por Sowers (1965). Foram determinados os limites de plasticidade e de liquidez e calculado o índice de plasticidade.

b) Porosidade e densidade do solo.

Foram realizadas coletas de solo com estrutura preservada no campo com cilindros de aço inoxidável de 60mm de diâmetro e 50mm de altura, para a determinação da macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo.

Primeiramente, as amostras foram saturadas e encaminhadas à mesa de tensão para determinação da macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo (EMBRAPA, 1997).

c) Resistência ao cisalhamento

Para detecção do nível de compactação do solo, mensurou-se a resistência ao cisalhamento no campo com uso do torvane (Figura 20). No campo, aplicou-se uma pressão normal ao equipamento até este penetrar todo o comprimento das aletas ao solo. Após, zerou-se o leitor de tensão e aplicou-se uma torção em sentido anti-horário até o momento em que a energia acumulada na mola de torção excedesse a resistência do solo a cisalhar. Posteriormente, realizou-se a leitura no medidor. Para o experimento, foi utilizada a aleta cisalhante com capacidade de medir até 98kPa, sendo que o teor de água do solo estava com $0,17 \text{ kg kg}^{-1}$.



Figura 20 -Torvane para medição da resistência do solo ao cisalhamento.

d) Esforços demandados à haste sulcadora

A obtenção dos esforços demandados à haste sulcadora de uma semeadora agrícola estão descritos no capítulo 1. (p. 47)

e) Profundidade de trabalho da haste sulcadora

A profundidade de trabalho da haste foi medida com auxílio de um perfilômetro desmontável, constituído de 31 varetas de alumínio vazadas, com diâmetro de 15mm e altura de 1000mm equidistantes 15mm, com uma lona graduada a 50mm, conforme a figura 21.



Figura 21 -Perfilômetro desmontável usado para mensurar a profundidade de trabalho da haste sulcadora.

A análise estatística constou de análise da variância e comparação de médias pelo teste de Tukey, executadas pelo software SAS (1990). Para cada parâmetro avaliado foi testado sua normalidade através do teste de Shapiro-Wilk.

5.3 Resultado e discussão

A macroporosidade, microporosidade e porosidade total encontram-se na Tabela 13. Na primeira camada não houve diferenças entre os tratamentos na microporosidade, sendo que esta propriedade não apresentou diferenças ao longo de todo o perfil do solo. A compactação aumentou a densidade do solo, com a redução da macroporosidade e porosidade total, gerando diferenças entre o solo sob campo nativo compactado (CNC) do campo nativo (CN) e do nativo dessecado (CNd).

A porosidade do solo sob CNd diferiu do sob CNC e do sob CNdc, corroborando para a presença da compactação no solo. Ao longo do perfil, os solos que sofreram ação de tráfego apresentaram as menores porosidades que, segundo Mantovani (1987), é a propriedade de maior expressividade do efeito da compactação do solo, pois fornece a informação direta da proporção de volume do solo disponível ao fluxo de ar e água. Capurro (2005) salienta que a redução da porosidade é um dos maiores impactos produzidos pela compactação no solo, resultando em maior resistência das raízes para buscar água e nutrientes.

Na segunda camada (0,1-0,2m), diferenças na macroporosidade surgiram entre o solo com ação do tráfego e sem ação deste, no qual a ação da pressão da máquina reduziu a macroporosidade ao longo de todo o perfil. Esta constatação manifesta a presença de compactação, pois nesse processo há uma redução da macroporosidade com conseqüente aumento da densidade do solo. Nesse sentido, Reichert et al. (2008) salientam que, além disso, tem-se alterações na condutividade hidráulica saturada do solo, permeabilidade ao ar, infiltração de água e outras características que são ligadas à porosidade do solo.

A densidade do solo foi o parâmetro mais influenciado pela compactação ao longo do perfil, demonstrando o efeito do tráfego no solo. Contudo, alguns tratamentos não excederam o limite crítico de densidade para solos de textura franco arenosa que é, conforme sugerido por Reichert et al. (2008) $1,7-1,8 \text{Mg m}^{-3}$. Tomando esses limites como referência, percebe-se que, na primeira camada, a densidade não foi limitante, mas na segunda camada a compactação induzida poderá gerar restrições às plantas. Nas demais camadas, o solo sob CNC sempre excedeu os valores críticos, manifestando o efeito prejudicial da compactação via o

tráfego de máquinas agrícolas. Nesse sentido, Nasr & Sellers (1995) concluíram que altas densidades do solo provocam queda na emergência de plântulas.

Tabela 13 - Valores médios de macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (Pt) e densidade (Ds) de um Argissolo Vermelho-Amarelo sob campo nativo.

Tratamento	Ma	Mi	Pt	Ds
	-----%-----			Mg m ⁻³
Camada 0,0-0,1m				
CN	13,9* a	27,6 ns	41,5 ab	1,55 bc
CNd	13,0 ab	29,7	42,8 a	1,52 c
CNc	10,1 b	28,2	38,2 c	1,64 a
CNdc	10,0 b	29,3	39,4 bc	1,62 ab
CV (%)	8,9	9,7	4,2	2,2
Camada 0,1-0,2m				
CN	14,3 a	24,0 ns	38,3 ab	1,63 ab
CNd	16,1 a	23,8	40,0 a	1,59 b
CNc	11,1 b	23,8	35,0 b	1,72 a
CNdc	9,3 b	26,8	36,1 b	1,70 a
CV (%)	8,1	6,8	4,4	2,6
Camada 0,2-0,3m				
CN	13,3 ab	25,8 ns	39,1 ab	1,61 ab
CNd	16,2 a	25,5	41,7 a	1,55 b
CNc	9,7 bc	24,3	34,0 b	1,74 a
CNdc	9,0 c	27,2	36,2 ab	1,69 ab
CV (%)	15,9	5,4	6,6	4,0
Camada 0,3-0,4m				
CN	13,7 ab	25,9 ns	39,6 ab	1,60 ab
CNd	15,9 a	26,3	42,1 a	1,53 b
CNc	8,2 c	26,8	35,0 b	1,71 a
CNdc	11,5 bc	27,4	38,9 ab	1,62 ab
CV (%)	13,3	5,4	6,2	4,0

*Médias seguidas da mesma letra, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CN – campo nativo; CNc – campo nativo compactado; CNd – campo nativo dessecado; CNdc – campo nativo dessecado com compactação adicional; CV – Coeficiente de Variação.

Precauções devem ser tomadas com a densidade do solo que, segundo Reichert et al. (2008), não pode ser considerada como fator isolado da qualidade estrutural do solo, uma vez que a elevação dessa propriedade pode promover poros contínuos no solo. Segundo Reis et al. (2006), o sucesso do desenvolvimento de uma cultura sob sistema de semeadura direta, bem como sua produção, depende em parte do ambiente ao redor da semente, sendo que a densidade e a macroporosidade podem estar relacionadas a tal sucesso. Nesse sentido, é

importante realizar alguns cuidados para a redução do efeito da compactação, tais como: utilizar tráfego controlado (BOTTA et al., 2004), usar uma adequada pressão de insuflagem dos pneus agrícolas (HÅKANSSON, 2005), trafegar em condições de friabilidade do solo e usar mecanismos rompedores de solo com mínima perturbação da estrutura (SPOOR et al., 2003). A redução da resistência da camada superficial pode ser proporcionada pelo uso de haste sulcadora de adubo na semeadora, que irá proporcionar o rompimento desta camada de solo. Nesse contexto, Spoor et al. (2003) salienta que a descompactação deve ser realizada por meio do fissuramento e não pela rotação do solo, como é realizado na aração, onde o emprego de escarificadores contribui para tal feito, mas na contextualização da semeadura direta o emprego de haste sulcadora poderá favorecer a descompactação.

A densidade do solo foi elevada na segunda camada, contudo, como já comentado, esta pode ser reduzida com uso de haste sulcadora na semeadora. A comprovação dessa constatação foi encontrada em Latossolo Vermelho-Amarelo sob semeadura direta, em que Reis et al. (2006) comparando a densidade do solo ao redor da semente proporcionada pela haste sulcadora contra disco defasado, e concluíram que esta haste proporcionou a menor densidade, sendo responsável pela maior emergência de plântulas.

A adição de tráfego no solo (CNc e CNdc) aumentou a densidade, demonstrando que esta propriedade é afetada pelo tráfego de máquinas. Esse efeito nocivo também foi encontrado por Bertol et al. (2001) em Cambissolo Húmico sob semeadura direta e sob campo nativo, onde a maior densidade manifestada pelo solo sob semeadura direta foi atribuída ao não revolvimento e ao acúmulo de tráfego. Contudo, em Argissolo Vermelho, Cruz et al. (2003) encontraram efeito do tráfego somente na camada 0,0-0,1m, não sendo considerado limitante ao desenvolvimento radicular.

O rodado da pá carregadora alterou a porosidade e a densidade do solo até a camada de 0,3-0,4m, similarmente ao observado por Hakansson (2005), mas contraditório a Cruz et al. (2003) e Tormena et al. (1998). Tal fato é explicado pelo elevado nível de compactação imposta ao solo. Essa influência do tráfego de máquinas também foi encontrada por Bertol et al. (2004) em um Cambissolo Húmico, onde os autores observaram maior densidade ao longo de todo o perfil do solo que se encontrava sob semeadura direta ao sob campo nativo.

A macroporosidade não apresentou diferença ao longo do perfil, embora apresentando valores diferentes que margeiam o limite crítico proposto por Forsythe (1967), demonstrando-se, nesse tipo de solo e manejo, não sensível as alterações do tráfego. Isso também foi encontrado por Cruz et al. (2003) quando compararam um Argissolo Vermelho sob ação do tráfego das máquinas realizadas no manejo de semeadura direta em relação ao solo sob campo nativo. Essa ocorrência também foi encontrada em um Cambissolo Húmico por Bertol et al. (2004). Por outro lado, assim como observado no presente estudo, Tormena et al. (1998) concluíram que o tráfego foi determinante nas alterações da porosidade de aeração ocorridas na camada superficial (0-0,05m) de um Latossolo Vermelho-Escuro, gerando uma redução de 24% da porosidade de aeração. Esses pesquisadores encontraram redução em tal propriedade chegando a valores próximos a zero nos solos que foram manejado com enxada rotativa e arado de aiveca. Isso provavelmente implicará nas reduções dos processos de difusão gasosa e movimento de água no solo. No ano seguinte, os pesquisadores observaram que a redução desta propriedade chegou a 91% quando comparada ao mesmo manejo mecânico do solo, porém sem ação do tráfego.

A dessecação das plantas forrageiras não alterou a porosidade e a densidade do solo, quando comparada ao mesmo manejo (CN com CNd e CNc com CNDc) do solo. Diferenças maiores poderiam ser esperadas visto que os poros biológicos do solo, aqueles de seção aproximadamente circular formados principalmente pela atividade da mesofauna e pela decomposição das raízes, (REICHERT et al., 2003) resultam no aumento da macroporosidade. Contudo, tal fato pode estar aliado ao tempo que foi realizado este estudo que, deve ter sido inferior a tal processo de decomposição do sistema radicular, assim, pela alta densidade radicular, pode ser o responsável pelas constatações realizadas.

Tomando como referência a relação entre a macroporosidade com a porosidade total (Ma/Pt) de 0,3, proposta por Olness et al. (1998), percebe-se que o tráfego gerou valores menores que este número (Figura 22) independentemente da dessecação. Isso só não foi encontrado no CNc na camada de 0,1-0,2m. Segundo os autores, esse valor é suficiente para permitir adequada circulação de água e difusão de oxigênio nos macroporos, bem como o armazenamento de água nos microporos. Pela alta relação demonstrada por este solo, poder-se-ia constatar a ausência de compactação e a presença dessa no solo sob ação do tráfego, sendo corroborado pelos valores de porosidade total e densidade do solo. Similarmente,

Bertol et al. (2000, 2004) concluíram que o tráfego de máquinas agrícolas gerou compactação no Cambissolo Húmico, manifestado pela relação Ma/Pt inferior a 0,3.

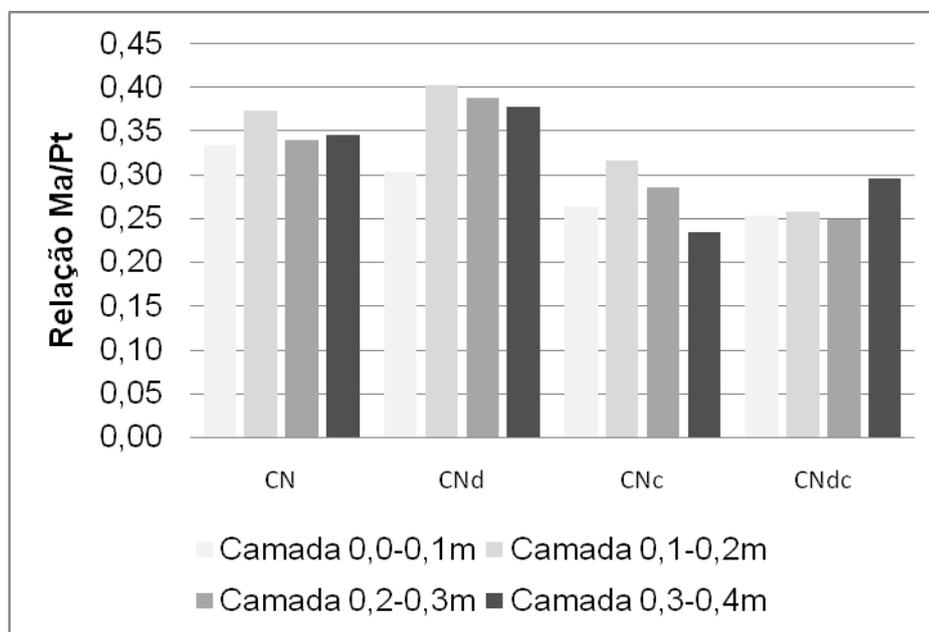


Figura 22 -Relação volume de macroporos (Ma) e o volume total de poros (Pt) em diferentes camadas do Argissolo Vermelho-Amarelo sob campo nativo.

Em solos com textura arenosa, Reinert et al. (1998) comentam que a matéria orgânica e as raízes são determinantes da agregação e do espaço poroso que, segundo Gomar et al. (2002), resultam em alterações na densidade do solo. Estes pesquisadores trabalhando em um solo com 100g kg^{-1} de argila e 800g kg^{-1} de areia, observaram que a decomposição da biomassa radicular permitiu um melhor arranjo das partículas de areia fina, resultando em maior densidade do solo, fato não encontrado neste presente estudo.

A dessecação gerou na camada 0,2-0,3m (Figura 22), uma maior relação Ma/Pt, fato explicado pela maior macroporosidade em relação à porosidade do solo. Isso poderá proporcionar um aumento da entrada de ar e água, bem como uma maior difusão do oxigênio.

Analisando o efeito isolado da compactação e da dessecação no incremento da macroporosidade (Figura 23) em relação à testemunha (CN), percebe-se que,

independentemente da camada, a compactação gerou redução da macroporosidade.

A compactação foi mais expressiva na camada de 0,1-0,2m e 0,2-0,3m, onde o CNc e o CNdc ofereceram uma redução na macroporosidade variando de 20,0-33,3%. Contudo, se analisarmos os valores de macroporosidade (Tabela 13), percebemos que no geral não são resultados considerados críticos ao desenvolvimento de planta, visto o índice mínimo de 10% (FORSYTHE, 1967).

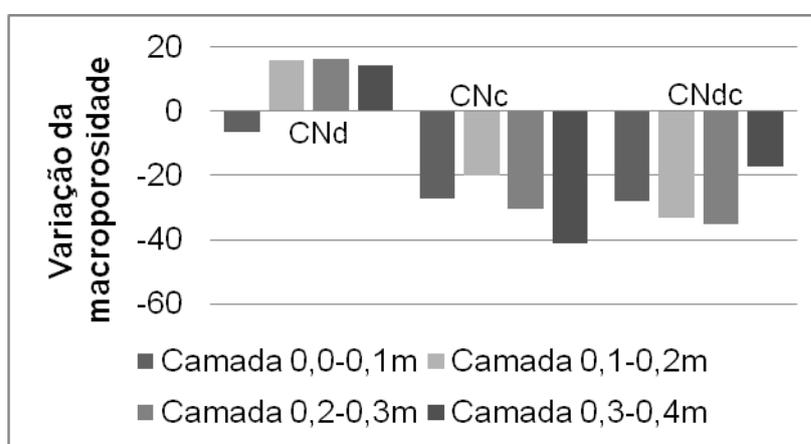


Figura 23 -Variação da macroporosidade no Argissolo Vermelho Amarelo sob campo nativo.

Nos solos que sofreram ação do tráfego percebe-se claramente a redução da macroporosidade em relação à testemunha, em todo o perfil do solo, reforçando a necessidade de se ter cuidados no manejo das máquinas em solos que não sofreram tráfego. Esta ação de compactação na macroporosidade do solo poderá resultar em problemas na difusão dos gases, mecanismo principal de movimento de ar no solo. Nesse sentido, Vomocil e Flocker (1966) comentam que as adequadas taxas de difusão gasosa ocorrem quando a porosidade de aeração situa-se acima de 10%. Assim sendo, se o tráfego continuar gerando tais reduções de tamanha magnitude, poderá implicar na ocorrência de sítios anaeróbicos que, em condições mais úmidas, diminuirão a eficiência de fertilizantes nitrogenados no solo, e no estabelecimento de condições físicas impróprias para o desenvolvimento radicular.

O tráfego não aumentou a densidade desse solo a níveis restritivos ao desenvolvimento da planta proposto por Reichert et al. (2008). A compactação

poderá ser potencializada não somente em função da pressão imputada pelo tráfego, mas também do conteúdo de água do solo, conteúdo de matéria orgânica e da resistência ao cisalhamento do solo (MOUAZEN, 2002). A macroporosidade encontrada nesse estudo é resultado do manejo do solo em campo nativo nas propriedades físicas do solo que, em função da decomposição das raízes das espécies ali existente, favorece a formação de poros contínuos e altamente resistentes, proporcionando, assim, tais valores de macroporosidade. Nesse sentido, Cruz et al. (2003) encontraram maior agregação em Argissolo Vermelho sob campo nativo do que sob semeadura direta, atribuída a maior densidade de raízes favorecida por tal sistema. Bertol et al. (2004) fizeram constatações semelhantes àqueles pesquisadores.

A resistência média ao cisalhamento do solo encontra-se na tabela 14. Os dados não apresentaram diferença significativa ao longo das camadas.

Tabela 14 - Resistência média ao cisalhamento de um Argissolo Vermelho submetido a dois tratamentos.

Camada (m)	Manejo**		
	CNd	CNdc	CV(%)
	Tc (kPa)	Tc (kPa)	
0,0 – 0,1	2,5 a*	3,1 a	13,8
0,1 – 0,2	2,7 a	3,4 a	15,2
0,2 – 0,3	2,5 a	3,1 a	7,4
0,3 – 0,4	2,9 a	3,1 a	21,3

*Médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

**CNd – campo nativo dessecado; CNdc – campo nativo dessecado com compactação adicional; CV – Coeficiente de Variação.

Efeitos semelhantes foram encontrados por Ibarra et al. (2005) em solo arenoso, no qual o aumento da densidade do solo foi acompanhada pelo aumento da resistência ao cisalhamento, sendo potencializado com o aumento do teor de água do solo. Dados em consonância com estes foram encontrados por Mouazen et al. (2002) também em solo arenoso. Estes pesquisadores ressaltam que tal efeito reduz o espaço poroso do solo, reduzindo o armazenamento de oxigênio utilizado pelas raízes e pela biota do solo.

Assim sendo, a resistência ao cisalhamento in situ não foi eficaz na detecção da compactação para estas condições. Contraditório a isso, Rosa et al. (2007) em

Latossolo Vermelho sob semeadura direta, observaram que o solo submetido à maior nível de tráfego demonstrou maior resistência ao cisalhamento in situ. Em Argissolo Vermelho-Amarelo subsolado há dois meses, Barbosa et al. (2004) estudaram a influência da pressão de insuflagem e a patinação na compactação do solo e concluíram que, independentemente do tipo de rodado, o aumento da pressão ao solo gera aumento da resistência ao cisalhamento.

Analisando a porosidade e densidade do solo, encontra-se efeito do tráfego até a profundidade de 0,4m. Segundo Håkansson (2005), estas alterações já são passíveis de ocorrência quando o carregamento sobre as rodas está acima de 3Mg. Segundo o autor, a pressão imputada neste presente estudo poderia gerar alterações em até 1m de profundidade, sendo que tais alterações danosas à estrutura física do solo só podem ser convertidas por processos de mobilizações mecânicas.

Os efeitos negativos do tráfego de máquinas ao solo devem ser prevenidos através do controle do tráfego, sobre o que Horn & Fleige (2003) comentam que o governo da Alemanha vem apoiando a criação de métodos preditivos da trafegabilidade do solo para uso agrícola. Nesse contexto, a resistência ao cisalhamento pode ser usada na detecção in situ da presença de compactação no solo.

Os esforços solicitados à haste sulcadora encontram-se na figura 24 e 25. O tráfego gerou condições ao solo que resultaram no aumento da demanda de esforço horizontal e de tração (Figura 24), demonstrando que a intensidade de tráfego de 24,67Mgkm ha⁻¹ realizado pela pá carregadora (10Mg) gerou compactação no solo. Outra constatação neste solo foi que a compactação originou maior variação dos esforços, conforme se visualiza pela variação entre os valores máximos e mínimos.

A demanda de tração solicitada pela haste sulcadora neste solo pode ser considerada alta, uma vez que os esforços encontrados por Rosa et al. (2008) e Bortolotto et al. (2006) em Latossolo de textura argilosa sob semeadura direta consolidada, não ultrapassaram 3,43kN. Ressalta-se que o segundo trabalho utilizou velocidades altas (7,2km h⁻¹). Em Argissolo Vermelho sob semeadura direta de soja, antes manejado por 15 anos sob pecuária extensiva, Cepik et al. (2005) encontraram, em situações de maior profundidade de trabalho, demanda de tração de 1,47kN a 6,5km h⁻¹. Esses fatos corroboram para a execução de uma prática de descompactação.

As variações entre os valores máximos e mínimos são explicadas pelas condições de irregularidade e desuniformidade do terreno, diferenças na profundidade de semeadura ou no embuchamento (LEVIEN, 1999 apud BORTOLOTTO et al., 2006). Aliado a esses fatores, Reinert et al. (1998) comentam que a matéria orgânica e as raízes são determinantes da agregação e do espaço poroso dos solos de textura arenosa, imprimindo uma estrutura mais resistente.

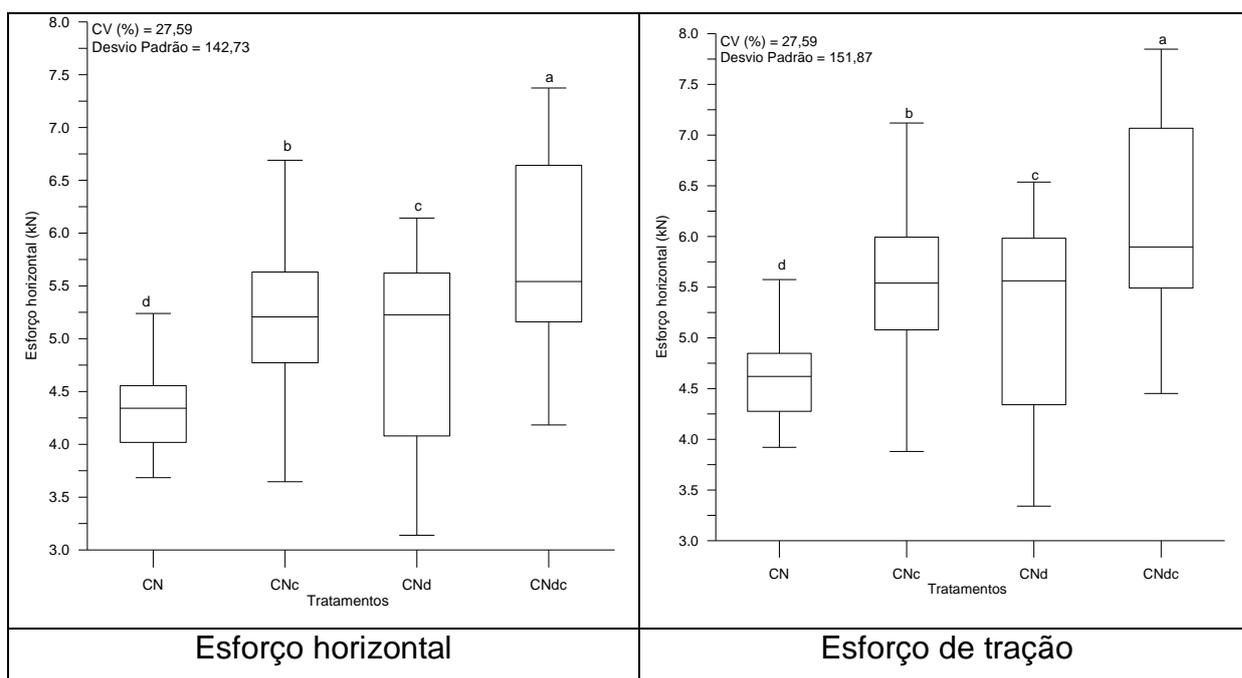


Figura 24 -Box plot do esforço horizontal e de tração solicitados à haste sulcadora da semeadora no Argissolo Vermelho-Amarelo sob campo nativo.

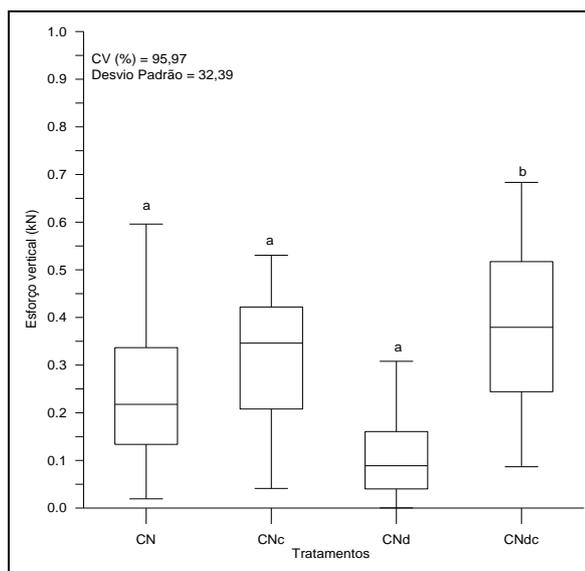


Figura 25 -Box plot do esforço vertical solicitados à haste sulcadora da semeadora no Argissolo Vermelho-Amarelo sob campo nativo.

O esforço vertical (Figura 25) foi maior nos tratamentos que não sofreram ação do carregamento, demonstrando que o rearranjo da estrutura do solo favorece a ruptura vertical, porém, a ruptura horizontal é ampliada em demasia, podendo resultar em aumento de combustível e redução da profundidade de trabalho.

Após 6 meses transcorrida a dessecação, a demanda média de esforço horizontal e de tração apresentou-se similar ao solo sem ação dessa, contudo, a variação dos percentis foi maior no solo dessecado, fato não esperado, uma vez que a dessecação proporcionaria a morte das raízes das plantas, favorecendo, assim, a redução da demanda de esforços. Essa redução nos esforços em função da dessecação também não foi encontrada por Beutler et al. (2003) quando comparou a demanda de tração exigida por uma haste sulcadora tipo facão em solo sob campo nativo dessecado em relação a um solo com aveia e outro com aveia + ervilhaca. Os pesquisadores encontraram maiores valores de força de tração no solo sob semeadura direta do que sob campo nativo dessecado. Nesse caso, o fato pode estar atribuído ao tráfego do solo sob semeadura direta. Já Bortolotto et al. (2006) não encontraram diferença na força de tração média requerida por uma semeadora adubadora trabalhando em um Latossolo Vermelho quando a velocidade de deslocamento foi de $4,7\text{ km h}^{-1}$, estando de acordo com estudos realizados por Levien (1999 apud BORTOLOTTI et al., 2006).

Analisando os percentis dos *Box plot*, percebe-se que a estrutura do solo compactado, independentemente da dessecação, no geral, ofereceu os maiores valores máximos e mínimos tanto no esforço de horizontal, tração e vertical, demonstrando ação da compactação do rodado na alteração estrutural desse solo. O aumento na demanda de tração de uma haste sulcadora de adubo quando foi adicionado o efeito do tráfego ao solo também foi encontrado por Xavier (2005), chegando a 87% quando a profundidade de trabalho foi de 0,064m. O aumento da demanda de tração trouxe consigo um aumento na patinação do trator, gerando compactação no solo e aumento no consumo de combustível.

A dessecação foi eficiente na redução do esforço vertical, no qual o solo sob campo nativo reduziu de 0,22kN para 0,088kN, porém, quando se adicionou a compactação, tal efeito não foi notado. O efeito redutivo da dessecação no esforço vertical se deve ao fato que a raiz, um dos parâmetros biológicos responsáveis pela agregação do solo, trabalha de forma a reduzir a eficiência da ruptura do solo na passagem do sulcador. Dessa forma, o mesmo, além de romper o solo, deve romper fisicamente às raízes.

Analisando a variação dos dados na demanda de tração dentre 25-75%, o CN variou de 4,85-4,28kN, CNc 5,99-5,08kN, CNd 6,0-4,3kN e CNdc 7,1- 5,5kN, respectivos as variações de 0,57kN, 0,92kN, 1,7kN, e 1,6kN. As maiores variações foram impostas pelo solo dessecado.

O aumento na demanda de tração é resultado da condição física imposta pelo tráfego, identificada pela menor macroporosidade e maior densidade do solo (Tabela 13) encontrado nos solos CNc e CNdc, condições já comentadas anteriormente como manifestadoras da presença da compactação do solo.

Os esforços de tração e horizontal diferiram entre os tratamentos, demonstrando o efeito do manejo do solo.

Analisando os dados médios de esforços, percebe-se que o solo não gerou efeito rotacional à ferramenta, pois o valor não variou entre os tratamentos (0,03kNm) e que a demanda de tração maior foi do CNdc, função da alta densidade apresentada por este.

O esforço médio vertical não variou significativamente entre os tratamentos, exceto o CNdc que diferiu dos demais, porém, se analisarmos o *Box plot*, diferenças ocorreram ao longo do trabalho do sulcador no solo.

5.4 Conclusões

O tráfego de um equipamento com 260,7kPa de pressão de contato no Argissolo Vermelho-Amarelo sob campo nativo há mais de 20 anos gera alterações na macroporosidade e porosidade total, gerando reduções acima de 20% na macroporosidade. A porosidade e a macroporosidade são as propriedades físicas mais sensíveis às alterações impostas pelo tráfego. Contudo, as condições resultantes do tráfego não são limitantes ao desenvolvimento de plantas. Porém, precauções devem ser consideradas em função da elevada resistência do solo.

A estrutura física do solo não gera efeito rotacional em sulcadores.

Após 3 meses da dessecação das espécies do solo sob campo nativo, não há alteração na exigência de esforço horizontal, porém, há variação na demanda de esforço vertical, na forma de reduzi-lo, mas ao adicionar o tráfego não há mais alterações. A porosidade e densidade do solo também não são alteradas pela dessecação.

O Torvane não foi sensível à presença de compactação, não sendo viável o seu uso como avaliador da presença de compactação em solo de textura franco argilo arenosa.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Independentemente do uso do solo estudado, a compactação gera alteração nas propriedades físicas e mecânicas, que por sua vez repercute no desenvolvimento das plantas. A compactação originada pelo tráfego do conjunto trator + pulverizador no solo sob semeadura direta concentrou-se na camada de 0,05-0,15m, identificado pela menor macroporosidade e porosidade ao longo do perfil e, maior incremento da resistência à penetração.

O aumento da intensidade de tráfego de 24,79Mgkm ha⁻¹ para 49,59Mgkm ha⁻¹ não gera alterações além das geradas pelo tráfego de 24,79Mgkm ha⁻¹. Estabelecer um valor crítico de intensidade de tráfego é difícil, pois depende, principalmente, do teor de água do solo que está ligado a sua capacidade de suporte.

A compactação gerada por um equipamento de 260,7kPa de pressão de contato pneu/solo com intensidade de tráfego de 24,67Mgkm ha⁻¹ gera condições físicas que não são remediadas pela escarificação, como técnica isolada. Isso demonstra que ações além da escarificação devem ser realizadas para reverter o processo da compactação.

A condutividade ao ar é reduzida com o acréscimo do tráfego, que gera alterações no desenvolvimento radicular da cultura do milho que se concentra até os 0,15m de profundidade. Contudo, o solo sob semeadura direta sem ação do tráfego adicional demonstra algumas raízes em maior profundidade. Isso mostra que o nível de tráfego da área deve ser controlado para não afetar nocivamente a estrutura física do solo.

A exigência dos esforços é afetada diretamente pelo manejo do solo e da máquina, na qual a intensidade de tráfego gera condições físicas ao solo que potencializam a exigência de esforço horizontal e de tração, porém, o aumento da intensidade do tráfego usado aqui não aumenta tal demanda de tração. A exigência de tração no solo com elevado nível de compactação escarificado é maior que num solo sob semeadura direta. Isso demonstra o elevado nível de compactação. Tal aumento energético irá resultar em aumento da potência que, muitas vezes, os tratores disponíveis na propriedade não possuem.

O uso do solo em campo nativo apresenta algumas particularidades em relação ao uso agrícola pela semeadura direta e cultivo mínimo, manifestadas pelas maiores alterações nas propriedades físicas do solo. A redução percentual da macroporosidade e porosidade do solo pelo tráfego são maiores, repercutindo no aumento da densidade do solo, sendo que o tráfego gera reduções na macroporosidade superiores a 20%. Contudo, as condições físicas resultantes dessa ação não são consideradas restritivas ao desenvolvimento de plantas. Mesmo não sendo restritivas às condições físicas do solo, o tráfego deve ser controlado para evitar maiores alterações.

A demanda do solo sob campo nativo é elevada, sendo que 6 meses após a dessecação das espécies não é suficiente para gerar redução da exigência de tração nem alteração da macroporosidade e porosidade do solo.

6.1 Referências

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.

AL-SUHAIBANI, S. A.; AL-JANOBI, A. Draught requirements of tillage implements operating on sandy loam soil. **Journal of Agricultural Engineering Research**, New York, v. 66, n. 3, p. 177-182, May/June 1997.

ALVARENGA, M. I. N.; DAVIDE, A. C. Características físicas e químicas de um Latossolo Vermelho-escuro e a sustentabilidade de agroecossistemas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 4, p. 933-942, jul./ago. 1999.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **Terminology for soil-engaging components for conservation tillage planters, drill and seeders**. In: _____. ASAE Standards 1996: Standards Engineering Practices Data, St. Joseph, 1996. p.309-14.

ARAUJO, M. A. et al. Efeitos da escarificação na qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférrico após treze anos de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 495-504, maio/jun. 2004.

AYARZA, M. A. et al. Sistemas agropastoriles basados en leguminosas de uso múltiples. In: GUIMARÃES, E. P. et al. (Org.). **Sistemas agropastoriles en sabanas tropicales de América Latina**. CALI/BRASÍLIA: CIAT/EMBRAPA, 1999, v. 1. p. 175-193.

BAGARELLO, V. Influence of well preparation on field-saturated hydraulic conductivity measured with the Guelph permeameter. **Geoderma**, Ámsterdam, v. 80, n. 1-2, p. 169-180, Jan./Feb. 1997.

BALBUENA, R. et al. Compactación de suelos. Efectos del tránsito del tractor en sistemas de siembra directa. **Spanish Journal of Agricultural Research**. Madrid, v. 1, n. 2, p. 75-80, Apr./June 2003.

BALL, B. C. et al. Soil structural quality, compaction and land management. **European Journal Soil Science**, Oxford, v. 48, n. 4, p. 593-601, Oct./Dec. 1997.

BARNES, K. K. et al. **Compaction of agricultural soils**. Michigan: ASAE, 1971. 471 p.

BARBOSA, J. A. et al. Resistência ao cisalhamento de um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido ao tráfego de um trator agrícola. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 2-3, p. 321-325, maio/dez. 2004.

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil physics**. 4th ed. New York: John Wiley, 1960. 229 p.

BELTRAME, L. F. S., GONDIM, L. A. P.; TAYLOR, J. C. Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 5, n. 3, p. 145-149, maio/jun. 1981.

BERTOL, O. J. et al. Desempenho de mecanismos sulcadores de semeadura sob condições de preparo reduzido do solo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**. Viçosa, v. 21, n. 2, p. 257-262, mar./abr. 1997.

BERTOL, I. et al. Propriedades físicas e químicas e produtividade de milho afetadas pelo manejo do solo com tração animal, numa Terra Bruna estruturada. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 6, p. 971-976, nov./dez. 2000.

BERTOL, I. et al. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 555-560, maio/jun. 2001.

BERTOL, I. et al. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 155-163, jan./fev. 2004.

BEUTLER, J. F.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R. Força de tração em haste sulcadora tipo facão, operando em diferentes resíduos culturais e configurações da semeadora. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia. **Anais...** Goiânia: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2003. 1 CD-ROM.

BÖHM, W. **Methods of studying root systems**. Berlin: Springer-Verlag BerlinHeidelberg, 1979. 190 p.

BONINI, A. K. et al. Atributos físicos e requerimento de potência de uma semeadora-adubadora em um Latossolo sob estados de compactação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 1, p. 136-144, jan./abr. 2008.

BOONE, F. R.; VEEN, B. W. Mechanisms of crop responses to soil compaction. IN:_____. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 237-264.

BOTTA G.; JORAJURIA, C. D.; DRAGHI, L. Distribución de la compactación inducida por el tráfico agrícola en un sistema frutícola. **Investigación Agraria**, San Lorenzo, v. 17, n. 1, jan./jun. 2002a.

BOTTA, G.; JORAJURIA, C. D.; DRAGHI, L. Influence of the axle load, tire size and configuration, on the compaction of a freshly tilled clayey soil. **Journal Terramechanics**, Oxford, v. 39, n. 1, p. 47-54, Jan. 2002b.

BOTTA, G. F. et al. Mechanical and cropping behavior of direct drilled soil under different traffic intensities: effect on soybean (*Glycine max* L.) yields. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 78, n. 1, p. 53–58, Jan./Feb. 2004.

BOTTA, G.F. et al. Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annus* L.) yields. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 1, n. 1, p. 164-172, Jan./Feb. 2006.

BOTTA, G. et al. Aplicación del tráfico controlado en la cosecha de maíz (*zea mays* l.): efecto sobre rendimientos del cultivo y las propiedades físicas del suelo. **Agro-Ciencia**, México, v. 23, n. 1, p. 7-16, ene./feb.2007.

BORTOLOTTI, V. C.; PINHEIRO NETO, R.; BORTOLOTTI, M. C. Demanda energética de uma semeadora-adubadora para soja sob diferentes velocidades de deslocamento e coberturas do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p.122-130, jan./abr. 2006.

BRANDÃO, V. S. et al. **Infiltração da água no solo**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2006. 120 p.

BRAUNACK, M. V.; McGARRY, D. Traffic control and tillage strategies for harvesting and planting of sugarcane (*Saccharum officinarum*) in Australia. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 89, n. 1, p. 86–102, Jan./Feb. 2006.

CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 2, p.789-796, mar./abr. 2005.

CAPURRO, E. P. G. **Qualidade física de um Vertissolo e produção forrageira em campo nativo melhorado, com irrigação e pastoreio**. 2005. 87 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

CASÃO JÚNIOR, R. et al. **Avaliação do desempenho da semeadora-adubadora Magnum 2850 em plantio direto no basalto paranaense**. Londrina: IAPAR, 1998. 47 p. (Circular IAPAR, 105).

CASÃO JUNIOR, R.; ARAÚJO, A. G. de; RALISCH, R. Desempenho da semeadora-adubadora Magnun 2850 em plantio direto no basalto paranaense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 3, p.523-32, mar. 2000.

CEPIK, C. T. C.; TREIN, C. R.; LEVIEN, R. Força de tração e volume de solo mobilizado por haste sulcadora em semeadura direta sobre campo nativo, em função do teor de água no solo, profundidade e velocidade de operação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 447-457, maio/ago. 2005.

COLLARES, G. L. et al. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 11, p. 1663-1674, nov. 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/jun. 2008.

COLLINS, B. A.; FOWLER, D. B. Effect of soil characteristics, seeding depth, operating speed, and opener design on draft force during direct seeding. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 39, n. 3-4, p. 199-211, May/Aug. 1996.

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.

CHAN, K. Y. et al. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 89, n. 1, p. 13-21, Jan./Feb. 2006.

CZYZ, E. A.; TOMASZEWSKA, J. Changes of aeration conditions and the yield of sugar beet on sandy soil of different density. **Journal of Soil Science**, Edinburg, v. 16, n. 1, p. 1-9. Jan./Feb. 1993a.

CZYZ, E.; TOMASZEWSKA, J. The effect of different compaction of sandy and loamy soils on their physical properties and the spring barley yield. **Journal of Soil Science**, Edinburg, v. 26, n. 1, p. 11-17, Jan./Feb. 1993b.

CZYZ, E. A. Effects of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, n. 2, p. 153-166, Mar./Apr. 2004.

DADDOW, R.; WARRINGTON, G. **Growth-limiting soil bulk densities as influenced by soil texture**. USDA - F5, Watershed systems development group REP. WSD6- TN-00005, USDA - FS, Fort Collins, CO. 203 p. 1983.

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.

DOMÍNGUEZ, J. et al. Reología del suelo bajo tres diferentes tratamientos mecánicos. Avances en Ingeniería Agrícola. In: CONGRESO AMERICANO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA, 2., 2000, Buenos Aires. **Anais...**Buenos Aires: Facultad de Agronomía, 2000, pp. 110-115.

DRAGHI, L. M.; JORAJURÍA, D.; BALBUENA, R. H. La compactación superficial y subsuperficial de un perfil debida al tráfico repetido. **Rivista di Ingegneria Agrária**, Bologna, v. 20, n. 2, p.93-98, apr./ago.1989.

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

_____. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: 2. ed. rev. atual. EMBRAPA, 1997. 212 p.

FARINATTI, L. H. E. et al. Aspectos qualitativos do campo nativo na região da Campanha do Rio Grande do Sul. In: REUNIÃO DO GRUPO TÉCNICO EM FORRAGEIRAS DO CONE SUL – GRUPO CAMPOS DESAFIOS E OPORTUNIDADES DO BIOMA CAMPOS FRENTE A EXPANSÃO E INTENSIFICAÇÃO AGRÍCOLA, 21., 2006, Pelotas. **Anais...**Pelotas: EMBRAPA Clima Temperado, 2006. Disponível em: <http://www.cpact.embrapa.br/publicacoes/download/documentos/documento_166/PDFs/4/4-26.pdf>. Acesso em 20 de dez. 2008.

FERNANDEZ, E. M. et al. Matéria seca e nutrição da soja em razão da compactação do solo e adubação fosfatada. **Científica**, São Paulo, v. 23, n. 1, p. 117-132, jan./jun. 1995.

FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C.; LIMA, S. L. de. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 8, p. 947-953, ago. 2003.

FORSYTHE, W. M. Las propiedades físicas los factores físicos de crecimiento y la productividad del suelo. **Fitotecnia Latino Americana**, San Jose, v. 4, n. 2, p. 165-176, jul./dic. 1967.

FURLANI, C. E. A. et al. Desempenho operacional de uma semeadora-adubadora de precisão, em função do preparo do solo e do manejo da cobertura de inverno. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 2, p. 388-395, maio/ago. 2004.

FURLANI, C. E. A.; LOPES, A.; SILVA, R. P. da. Avaliação de semeadora - adubadora de precisão trabalhando em três sistemas de preparo do solo. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 458-464, maio/ago. 2005.

GILL, W. R.; vanDEN BERG, G. E. **Soil dynamics in tillage and traction**. Washington: Agricultural Research Service United States Department of Agriculture, 1967. 511 p.

GODWIN, R. J. A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 97, n. 2, p. 331-340, Jan./Feb. 2007.

GOEDERT, W. J.; SCHERMACK, M. J.; FREITAS, F. C. Estado de compactação do solo em áreas cultivadas no sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 2, p. 223-227, fev. 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.

GOMAR, E.P. et al. Semeadura direta de forrageiras de estação fria em campo natural com aplicação de herbicidas: I. Produção de forragem e contribuição relativa das espécies. **Ciência Rural**, Santa maria, v. 34, n. 3, p. 761-767, maio/jun. 2004.

GRABLE, A. R. Effect of compaction on content and transmission of air in soils. In: BARNES, K. K. et al. **Compaction of agricultural soils**. Michigan: ASAE, 1971. p. 155-164.

GUÉRIF, J. The influence of water-content gradient and structure anisotropy on soil compressibility. **Journal of Agricultural Engineering Research**, New York, v. 29, p. 367-374, 1984.

HÅKANSSON, I; 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.

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

HANWAY, J. J. Growth stages of corn (*Zea mays*, L.). **Agronomy Journal**, Madison, v. 55, n. 5, p. 487-492, Sept./Oct. 1963.

HORN, R.; 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. 1-2, p. 89-99, Jan./Apr.2003.

IBARRA, S. Y.; McKYES, E.; BROUGHTON, R. S. Measurement of tensile strength of unsaturated sandy loam soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 81, n. 1, p. 15-23, Jan./Feb. 2005.

INMET. Precipitação acumulada entre janeiro a abril de 2008. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/sonabra/iframe.php?codEst=A803&mesAno=2008>>. acesso em: 26 de set de 2008.

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.

JORAJURIA, C. D. Compactación Del suelo agrícola inducida por tráfico vehicular. Una revisión. In:____. **Reología del suelo agrícola bajo tráfico: modificaciones fisicomecánicas del suelo vinculadas a la compactación debida de tráfico agrario**. 1. ed. La Plata: Universidad Nacional de La Plata, 2005. p. 39-56.

KAMIMURA, K. M. **Parâmetros de solo, máquina e planta em função de doses de resíduos vegetais e profundidades de deposição de Fertilizantes em semeadura direta**. 2008. 129 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

KIRKEGAARD, J. A.; SO, H. B.; TROEDSON, R. J. Effect of compaction on the growth of pigeon pea on clays soils. III. Effect of soil type and water regime on plant response. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 26, n. 2, p. 163-178, Mar./Apr. 1993.

KLEIN, V. A. **Desenvolvimento de haste para escarificação em área sob sistema plantio direto**. 1990. 79 f. Dissertação (Mestrado em Eng. Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

KLEIN, V. A. et al. Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho e rendimento de trigo em plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 365-371, mar./abr. 2008.

KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H. **Integração lavoura pecuária**. Embrapa, 2003, 570 p.

KOPI, A. J.; DOUGLAS, J. T. A rapid inexpensive and quantitative procedure for assessing soil structure with respect to cropping. **Soil use and management**, Oxford, v. 7, n. 1, p. 52-56, Jan./Mar. 1991.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Advances in Soil Science**, v. 1, n. 1, p. 277-294, 1985.

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, p. 450-457, 1980.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 2005. 335 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.

LIPIEC, J.; SIMOTA, C. Role of soil climate factors in influencing crop responses to soil compaction in central and eastern Europe. In: SOANE, B. D.; van OUWERKERK, C. (Org.). **Soil Compaction and Crop Production**, Elsevier Science, 1994. 365-390 p.

MAHL, D. et al. Demanda energética e eficiência da distribuição de sementes de milho sob variação de velocidade e condição de solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 1, p. 150-157, jan./abr. 2004.

MANTOVANI, E. C. Compactação do solo. **Informativo Agropecuário**, v. 13, n. 17, p. 52-5, 1987.

MAZUCHOWSKI, J. Z.; DERPSCH, R. **Guia de preparo do solo para culturas anuais mecanizadas**. Curitiba: Associação de Crédito e Extensão Rural do Estado do Paraná, 1984. 68 p.

McKYES, E. **Agricultural engineering soil mechanics**. Amsterdam: Elsevier. 1989. 264 p.

MELLO IVO, W. M. P.; MIELNICZUK, J. Influência da estrutura do solo na distribuição e na morfologia do sistema radicular do milho sob três métodos de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 1, p. 135-143, jan./fev. 1999.

MOOJEN, E. L.; MARASCHIN, G. E. Potencial produtivo de uma pastagem nativa do Rio Grande do Sul submetida a níveis de oferta de forragem. **Ciência Rural**. Santa Maria, v. 32, n. 1, p. 127-132, jan./fev. 2002.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, Diretoria de Terras e Colonizações, Secção de Geografia, 1961. 46 p.

MOUAZEN, A. M. Mechanical behavior of the upper layers of a sandy loam soil under shear loading. **Journal of Terramechanics**, Oxford, v. 39, n. 2, p. 115–126, Feb. 2002.

NASR, H. M.; SELES, F. Seedling emergence as influenced by aggregate size, bulk density, and penetration resistance of the seedbed. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 34, n. 1, p. 61-76, Jan./Feb. 1995.

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, fev. 2003.

OLIVEIRA, M. L. de et al. Desempenho de uma semeadora-adubadora para plantio direto, em dois solos com diferentes tipos de cobertura vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 7, p. 1455-1463, jul. 2000.

OLNESS, C. E.; CLAPP, R.; L.; PALAZZO, A. J. Biosolids and their effects on soil properties. In: WALLACE, A.; TERRY, R. E. (Org.). **Handbook of Soil Conditioners**, New York: Marcel Dekker, 1998. pp. 141–165.

ORTIZ-CAÑAVATE, J.; HERNANS, J. L. **Técnica de la mecanización agraria**. 3. ed. Madrid: Mundi-Prensa, 1989. 641 p.

PANAYIOTOPOULOS, K. P.; PAPADOPOULOU, C. P.; HATJIOANNIDOU, A. Compaction and penetration resistance of an Alfisol and Entisol and their influence on root growth of maize seedlings. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 31, n. 4, p. 323-337, July/Aug. 1994.

PASSIOURA, J. B. Soil structure and plant growth. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 29, n. 6, p. 717-728, Nov./Dec. 1991.

PITELLI, R. A. **Competição e controle das plantas daninhas em áreas agrícolas**. Piracicaba: IPEF, 1987. p.1–24, (Boletim Técnico v. 4, 12).

RAPER, R. L. Agricultural traffics impacts on soil. **Journal Terramechanics**. Oxford, v. 42, p. 259-280, n. 3-4, Mar./Apr. 2005.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade de solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 27, n. 2, p. 29-48, jul./dez. 2003.

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. (Org.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2008. v. 5, p. 49-134.

REINERT, D. J. et al. Qualidade de Solos Derivados de Quartzos da Fronteira Sudoeste do RS: Indicadores Físicos. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2., 1998, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1998. p. 34-38.

REINERT, D. J. et al. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 1805-1816, set./out. 2008

REIS, E. F. dos et al. Densidade do solo no ambiente solo-semente e velocidade de emergência em sistema de semeadura de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 5, p.777-786, set./out. 2006.

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

RILEY, H. The effect of traffic at high axle load on crop yields on a loam soil in Norway. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 29, n. 2-3, p. 211-214, Mar./June 1994.

ROSA, D.P. da. et al. Torvane: método barato, rápido e simples de avaliação da compactação do solo. In: JORNADA DE JÓVENES INVESTIGADORES DE LA AUGM, 15., 2007, Asunción. **Anais...** Asunción: Universidad Nacional, 2007. 1 CDROM.

ROSA, D. P. 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.

ROSOLEM, C. A.; ALMEIDA, A. C. S.; SACRAMENTO, L. V. S. Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. **Bragantia**, São Paulo, v. 53, n. 2, p. 259-266, abr/jun. 1994.

SAS Institute Inc. **SAS/STAT User's Guide**. Version G. 4th ed. Cary: NC; SAS Institute Inc., 1990.

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

SÉGUY, L. et al. Plantio direto do arroz de sequeiro de alta tecnologia na zona tropical úmida do centro-norte do Mato Grosso. **Informações Agronômicas**, n. 86, p. 1-28, jun. 1999. (Encarte técnico)

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, jul./ago. 2005.

SIDHU, D.; DUIKER, S. W. Soil Compaction in Conservation Tillage: Crop Impacts. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, n. 5, p. 1257–1264, Sept./Oct. 2006. SILVA, J. R. et al. **Correlação entre esforços de tração e profundidade de subsolagem**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 18 p, 1984. (Boletim Técnico nº 96).

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. 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, mar./abr. 2000a.

SILVA, M. L.; CURI, N.; BLANCANEUX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 12, p. 2485-2492, dez. 2000b.

SILVA, R. H. da; ROSOLEM, C. A. Crescimento radicular de soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 6, p. 855-860, jun. 2002.

SILVA, V. R. da. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003a. 192 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SILVA, R. B. et al. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 973-983, 2003b.

SOANE, B. D.; van OUWERKERKB, C. Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 35, n. 1-2, p. 5-22, Jan./Apr. 1995.

SOARES, A. B. et al. Intensidades de pastejo em campo nativo melhorado. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 8, n. 4, p. 357-363, out./dez. 2007.

SOWERS, G. F. Consistency. In: BLACK, C. A. (Ed.) **Methods of Soil Analysis**, Part 1, Agronomy, Madison: Asa, 1965, pp. 391–399.

SPOOR, G.; TIJINK, F. G. J.; WEISSKOPF, P. Subsoil compaction: risk, avoidance, identification and alleviation. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1-2, p. 175–182, Jan./Apr. 2003.

STEPNIEWSKI, W.; GLIŃSKI, J.; BALL, B. C. Effects of compaction on soil aeration properties. In: SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. (Org.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.167-189.

STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro: I. nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 213-218, maio/ago. 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.

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.

SUZUKI, L. E. A. S. **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.

SUZUKI, L. E. A. S. 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.

SUZUKI, L. E. A. S. 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/jun. 2008.

TAYLOR, H. M., ROBERSON, G. M.; PARKER, J. J. Soil strength - root penetration relations to medium to coarse – textured soil materials. **Soil Science**, Baltimore, v. 102, n. 1, p. 18-22, Jan. 1966.

TAYLOR, J. C.; BELTRAME, L. F. S. Por que, quando e como utilizar a subsolagem. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v. 33, n. 318, p. 34-44, 1980.

TERMINIELLO, A. M. et al. Descompactación del suelo y tráfico de siembra. efectos sobre el rendimiento de soja (*Glycine max* L merr). In: CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERÍA RURAL, 9., 2007, Córdoba. **Anais...** Córdoba: Facultad di Agronomía, 2007. p. 19-22.

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.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 20, n. 3, p. 333-339, maio/jun. 1996.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; 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, mar./abr. 1998.

TORMENA, C. A. et al. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 4, p. 795-801, jul./ago. 2002.

TORMENA, C. A. et al. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 1023-1031, nov./dez. 2004.

TSEGAYE, T.; HILL, R. L. Intensive tillage effects on spatial variability of soil physical properties. **Soil Science**, Baltimore, v. 163, n. 2, p. 143-154, Feb. 1998.

VASQUEZ, E. V.; DE MARIA, I. C. Influencia del Laboreo sobre la rugosidad del suelo y la retención de agua en un Ferrasol. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., Ribeirão Preto, 2003, **Anais...** Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. 1 CD-ROM.

VOMOCIL, J. A.; FLOCKER, W. J. Effects of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. **Transaction of the ASAE**, Michigan, v. 4, n.1, p. 242-246, Jan./Feb. 1966.

XAVIER, A. A. P. **Comportamento da cultura da soja em função de resíduos culturais, mobilização do solo e irrigação, em semeadura direta.** 2005. 113 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

WARKENTIN, B. P. Effects of compaction on content and transmission of water in soils. In: BARNES, K. K. et al. **Compaction of agricultural soils.** Michigan: ASAE, 1971. p. 225-306.

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

WIERMANN, C.; WAY, T.R.; HORN, R.; BAILEY, A.C.; BURT, E.C. Effect of various dynamic loads on stress and strain behavior of a Norfolk sandy loam. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 50, n. 2, p.127-135, Mar./Apr. 1999.

XU, D.; MERMOUD, A. Topsoil properties as affected by tillage practices in North China. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 60, n. 1–2, p. 11–9, Jan./Apr. 2001.