

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**COMPACTAÇÃO DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO SOB
SISTEMA PLANTIO DIRETO E RENDIMENTO DE GRÃOS DE TRIGO, SOJA
E MILHO**

ANDRÉIA KUSUMOTA BONINI

**CASCVEL – PR
2006**

ANDREIA KUSUMOTA BONINI

**COMPACTAÇÃO DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO SOB
SISTEMA PLANTIO DIRETO E RENDIMENTO DE GRÃOS DE TRIGO, SOJA
E MILHO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Agrícola, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola com área de concentração em **Engenharia Sistemas Agroindustriais**, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Gabriel Filho

Co-orientador: Prof. Dr. Deonir Secco

CASCADEL - PR

2006

Andreia Kusumota Bonini

“Compactação de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistema plantio
direto e rendimento de grãos de trigo, soja e milho”

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre no Programa de Pós-Graduação “stricto sensu” em Engenharia
Agrícola, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, pela
comissão formada pelos professores:

Co-orientador: Prof. Dr. Deonir Secco

UNIOESTE/CCET – Cascavel - PR

Prof. Dr. Vanderlei Rodrigues da Silva

PUC – Toledo - PR

Prof. Dr. Joaquim Odilon Pereira

UNIOESTE/CCET – Cascavel - PR

Prof. Dr. Décio Lopes Cardoso

UNIOESTE/CCET – Cascavel - PR

Cascavel, 05 de junho de 2006.

Dedico

*A meu esposo **Alison** e ao meu filho **Cahuan** que sempre estiveram presentes em minha vida, apesar de muitas vezes eu estar ausente.*

Ofereço

A Deus, que sem ele nada existiria e nada teria um fim.

A meus pais, pelo apoio, amor e carinho nestes longos caminhos pelos quais passei.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meu esposo, pela paciência e amor.

Agradeço a Deus, pela existência de meus familiares que, quando necessário, sempre estiveram presentes.

Aos professores que, direta ou indiretamente, colaboraram para que essa dissertação chegasse até aqui.

Aos Professores: Dr. Antônio Gabriel Filho e Dr. Deonir Secco, pela ajuda, informações, ensinamentos, orientações, sugestões e, por fim, pela amizade desprendida.

Aos amigos do curso de mestrado Dione, Janete, Veruschka, Celso e a todos que compartilharam os momentos de tristeza e alegria.

Aos amigos do laboratório de Zoologia, pelo incentivo prestado e pela amizade.

Aos colegas de trabalho de campo, pela sua ajuda e colaboração nas coletas de dados em campo.

Aos Professores: Luis Francisco Angeli Alves e Gabriel Andrade, pela amizade e compreensão, pelos dias que fiquei ausente do ambiente de trabalho.

Agradeço também à Prefeitura Municipal de Cascavel, à COODETEC e à UNIOESTE, pela estimada colaboração no andamento e término deste projeto.

Por fim, agradeço a todos, pela confiança depositada em meu trabalho, mesmo que às vezes falho. Digo ainda que neste novo caminho que tracei em minha vida, várias vezes tropecei, entretanto no final eu consegui ultrapassar as barreiras e hoje estou aqui. Agradeço sinceramente e realmente a todos, pela estimada confiança e amizade.

SUMÁRIO

<u>INTRODUÇÃO.....</u>	<u>1</u>
<u>REVISÃO DE LITERATURA.....</u>	<u>3</u>
<u>1 PLANTIO DIRETO.....</u>	<u>3</u>
<u>2 COMPACTAÇÃO DO SOLO.....</u>	<u>5</u>
<u>.2.1 Relação Solo e Compactação.....</u>	<u>6</u>
<u>.2.2 A Compactação e Desenvolvimento das Plantas.....</u>	<u>8</u>
<u>3 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO.....</u>	<u>10</u>
<u>.3.1 Densidade do Solo.....</u>	<u>10</u>
<u>.3.2 Porosidade do Solo.....</u>	<u>13</u>
<u>.3.3 Resistência do Solo à Penetração.....</u>	<u>15</u>
<u>4 INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO.....</u>	<u>18</u>
<u>5 INFLUÊNCIA DA COMPACTAÇÃO NO RENDIMENTO DE GRÃOS.....</u>	<u>19</u>
<u>6 MANEJO DO SOLO COM QUALIDADE.....</u>	<u>22</u>
<u>MATERIAL E MÉTODOS.....</u>	<u>25</u>
<u>1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL.....</u>	<u>25</u>
<u>2 IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO.....</u>	<u>25</u>
<u>.2.1 Rolo Compactador.....</u>	<u>26</u>
<u>3 DADOS CLIMÁTICOS.....</u>	<u>27</u>
<u>4 PRIMEIRA FASE EXPERIMENTAL.....</u>	<u>28</u>
<u>.4.1 Tratamentos.....</u>	<u>28</u>
<u>.4.2 Ensaio de Proctor.....</u>	<u>29</u>
<u>.4.3 Determinação da Densidade e do Espaço Poroso do Solo.....</u>	<u>30</u>
<u>.4.4 Caracterização Físico-química da Área Experimental.....</u>	<u>31</u>
<u>.4.5 Caracterização dos Atributos Físicos do Solo Antes da Implantação do Experimento.....</u>	<u>32</u>
<u>.4.6 Velocidade de Infiltração de Água no Solo.....</u>	<u>33</u>
<u>.4.7 Semeadura do Trigo.....</u>	<u>34</u>
<u>.4.8 Emergência, População Inicial, População Final e Estatura Final do Trigo</u>	<u>34</u>
<u>.4.9 Colheita e Rendimento de Grãos de Trigo.....</u>	<u>35</u>
<u>5 SEGUNDA FASE EXPERIMENTAL.....</u>	<u>36</u>
<u>.5.1 Coleta de Dados para a Determinação dos Atributos Físicos do Solo.....</u>	<u>36</u>
<u>.5.2 Determinação da Resistência do Solo à Penetração (Rp).....</u>	<u>36</u>

<u>.5.3 Semeadura da Soja e Milho.....</u>	<u>36</u>
<u>.5.4 Números de Plantas Emergidas, População Inicial, População Final e Estatura Final da Cultura de Soja e Milho.....</u>	<u>37</u>
<u>.5.5 Colheita e Rendimento de Grãos de Soja.....</u>	<u>37</u>
<u>.5.6 Colheita e Rendimento de Grãos de Milho.....</u>	<u>38</u>
<u>6 ANÁLISE DOS DADOS.....</u>	<u>38</u>
<u>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</u>	<u>40</u>
<u>1 PRIMEIRA FASE EXPERIMENTAL.....</u>	<u>40</u>
<u>.1.1 Atributos Físicos do Solo.....</u>	<u>40</u>
<u>2 RELAÇÃO ENTRE PRESSÃO APLICADA PELO ROLO COMPACTADOR, DENSIDADE DO SOLO E MACROPOROSIDADE.....</u>	<u>46</u>
<u>3 INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO.....</u>	<u>49</u>
<u>4 DESENVOLVIMENTO VEGETATIVO DA CULTURA DO TRIGO.....</u>	<u>52</u>
<u>.4.1 Emergência e População Inicial de Plântulas de Trigo.....</u>	<u>52</u>
<u>.4.2 População Final da Cultura do Trigo.....</u>	<u>55</u>
<u>.4.3 Estatura Final da Cultura de Trigo.....</u>	<u>56</u>
<u>.4.4 Rendimento de Grãos da Cultura do Trigo.....</u>	<u>58</u>
<u>5 SEGUNDA FASE EXPERIMENTAL.....</u>	<u>60</u>
<u>.5.1 Atributos Físicos do Solo Pós-colheita do Trigo.....</u>	<u>60</u>
<u>6 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO PÓS-COLHEITA DO TRIGO (RP).....</u>	<u>63</u>
<u>7 DESENVOLVIMENTO VEGETATIVO DAS CULTURAS DE SOJA E MILHO.....</u>	<u>67</u>
<u>.7.1 População Inicial de Plantas.....</u>	<u>67</u>
<u>.7.2 População Final das Plantas de Soja e Milho.....</u>	<u>68</u>
<u>.7.3 Estatura Final de Plantas de Soja e Milho.....</u>	<u>70</u>
<u>.7.4 Rendimento de Grãos das Culturas de Soja e Milho.....</u>	<u>72</u>
<u>8 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO PÓS-COLHEITA DAS CULTURAS DE SOJA E MILHO.....</u>	<u>74</u>
<u>.8.1 Densidade do Solo (Ds).....</u>	<u>74</u>
<u>.8.2 Volume de Macroporos.....</u>	<u>76</u>
<u>.8.3 Volume de Microporos.....</u>	<u>79</u>
<u>.8.4 Porosidade Total.....</u>	<u>80</u>
<u>9 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO NAS DIFERENTES FASES EXPERIMENTAIS.....</u>	<u>81</u>

<u>10 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO (RP) FASE PÓS-COLHEITA</u>	
<u> DAS CULTURAS DE SOJA E MILHO.....</u>	<u>88</u>
<u>CONCLUSÕES.....</u>	<u>93</u>
<u>REFERÊNCIAS.....</u>	<u>94</u>

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações técnicas do rolo compactador.....	27@~
Tabela 2 - Precipitação média mensal, temperatura mínima, temperatura máxima e disponibilidade de água no solo na 1ª e 2ª fases experimentais.....	27@~
Tabela 3 - Caracterização física do solo na área experimental	32@~
Tabela 4 - Parâmetros químicos na área experimental.....	32@~
Tabela 5 - Caracterização dos atributos físicos em cada unidade experimental, antes da aplicação dos tratamentos, nas profundidades de 00-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m.....	33@~
Tabela 6 - Valores médios da densidade do solo (Mg m ⁻³), macroporosidade (dm ³ dm ⁻³), microporosidade (dm ³ dm ⁻³) e porosidade total (dm ³ dm ³), em função dos níveis de compactação em três profundidades.....	41@~
Tabela 7 - Umidade gravimétrica do solo no momento da compactação do solo nas unidades experimentais.....	45@~
Tabela 8 - Velocidade de infiltração de água no solo em estados de compactação do solo.....	50@~
Tabela 9 - População inicial de plantas (pl ha ⁻¹) de trigo em quatro estados de compactação.....	53@~
Tabela 10 - População final de plantas (pl ha ⁻¹) de trigo em quatro estados de compactação do solo.....	56@~
Tabela 11 -- Estatura final da cultura do trigo em quatro estados de compactação do solo.....	57@~
Tabela 12 - Rendimento de grãos (Mg ha ⁻¹) e peso hectolítrico (Kg hl ⁻¹) do trigo em quatro estados de compactação do solo.....	58@~
Tabela 13 - Valores médios da densidade do solo (Mg m ⁻³), macroporosidade (dm ³ dm ⁻³), microporosidade (dm ³ dm ⁻³) e porosidade total (dm ³ dm ⁻³), em função dos níveis de compactação, em três profundidades pós-colheita da cultura do trigo.....	62@~
Tabela 14 - Resistência do solo à penetração (MPa) em quatro estados de compactação, na fase pós-colheita da cultura do trigo.....	64@~

Tabela 15 - População inicial de plantas (pl ha-1) de soja e milho nos quatro estados de compactação.....	67@~
Tabela 16 - População final plantas (pl ha-1) de soja e milho nos quatro estados de compactação do solo.....	68@~
Tabela 17 - Estatura final de plantas de soja e milho em quatro estados de compactação do solo.....	71@~
Tabela 18 - Rendimento de grãos das culturas de soja e milho (Mg ha-1) na safra 2004/2005 em quatro estados de compactação do solo	72@~
Tabela 19 - Densidade do solo (Mg m-3) fase pós-colheita das culturas de soja e milho em quatro estados de compactação e em três profundidades.....	75@~
Tabela 20 - Macroporosidade (dm ³ dm-3) fase pós-colheita das culturas de soja e milho em quatro estados de compactação na profundidade de 0,0-0,1 m.....	77@~
Tabela 21 - Macroporosidade (dm ³ dm-3) na fase pós-colheita das culturas de soja e milho em quatro estados de compactação, nas profundidades de 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m.....	78@~
Tabela 22 - Microporosidade (dm ³ dm-3) na fase pós-colheita das culturas de soja e milho em quatro estados de compactação e em três profundidades.....	80@~
Tabela 23 - Porosidade total (dm ³ dm-3) pós-colheita das culturas de soja e milho em quatro estados de compactação e em três profundidades.....	81@~
Tabela 24 - Valores médios da densidade do solo (Mg m-3), em função dos quatro estados de compactação, nas diferentes fases experimentais.....	83@~
Tabela 25 - Valores médios de macroporos (dm ³ dm-3), em função dos quatro estados de compactação, nas diferentes fases experimentais	84@~
Tabela 26 - Valores médios de microporosidade (dm ³ dm-3), em função dos quatro estados de compactação e nas diferentes fases experimentais.....	85@~

Tabela 27 - Valores médios de porosidade total ($\text{dm}^3 \text{ dm}^{-3}$), em função dos quatro estados de compactação e nas diferentes fases experimentais..... 87@~

Tabela 28 - Resistência do solo à penetração em quatro estados de compactação na fase pós-colheita da cultura do milho..... 88@~

Tabela 29 - Resistência do solo à penetração em quatro estados de compactação na fase pós-colheita da cultura da soja..... 90@~

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Croqui da área experimental e disposição dos tratamentos.....	29@~
Figura 2 - Curva de compactação do solo em um Latossolo Vermelho distroférico.....	30@~
Figura 3 -Relação entre a macroporosidade e a densidade do solo na camada superficial (0,0-0,1 m), em um Latossolo Vermelho-Escuro.....	47@~
Figura 4- Relação entre a densidade do solo e o número de passadas do rolo compactador.....	48@~
Figura 5 - Relação entre a macroporosidade e o número de passadas do rolo compactador.....	49@~
Figura 6 - Regressão linear da infiltração média acumulada (mm) versus tempo (min) nos tratamentos T0, T1, T3 e T5.....	51@~
Figura 7 - Valores médios de plantas ha-1 nas três coletas e nos quatro estados de compactação.....	54@~
Figura 8 - Regressão polinomial do número de plantas emergidas nos quatro estados de compactação do solo.....	55@~
Figura 9 - Resistência do solo à penetração em Latossolo Vermelho-Escuro sob quatro estados de compactação.....	65@~
Figura 10 - Resistência do solo à penetração em quatro estados de compactação após colheita do milho.....	89@~
Figura 11 - Resistência do solo à penetração em quatro estados de compactação, fase pós colheita da soja.....	91@~

RESUMO

Essa pesquisa foi estabelecida com o intuito de avaliar o efeito dos estados de compactação dos atributos físicos do solo como: densidade, macroporosidade, microporosidade, porosidade total e, também, a resistência à penetração do solo, velocidade de infiltração, desenvolvimento das plantas e rendimento de grãos das culturas de trigo, soja e milho em um Latossolo Vermelho-escuro distroférico. O experimento foi realizado no Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola na região de Cascavel - PR e foi dividido em duas fases. Na 1ª fase foram implantados, nas unidades experimentais (10 X 50 m), 4 tratamentos com estados de compactação que consistiram em: uma passada com rolo compactador – T1; três passadas com rolo compactador – T3; cinco passadas com rolo compactador T5; e a unidade experimental sem compactação adicional - T0. Avaliou-se a densidade do solo, o volume de macroporos, microporos, porosidade total, velocidade de infiltração de água e o desenvolvimento e produtividade da cultura do trigo. A 2ª fase iniciou-se logo após a colheita do trigo, com a coleta de amostras de solo para análise dos atributos físicos do solo, avaliando-se também a resistência à penetração do solo, antes da semeadura e após a colheita da soja e milho, o desenvolvimento da planta e, por fim, a produtividade da soja e milho. As amostras de solo indeformadas foram coletadas nas profundidades de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m; para análise da densidade do solo e porosidade do solo em 5 pontos aleatórios de cada tratamento. A velocidade de infiltração de água foi avaliada por meio dos anéis concêntricos; a resistência à penetração do solo foi mensurada por meio do penetrômetro eletrônico; a avaliação das populações inicial e final de plantas de trigo, soja e milho foi realizada por meio de uma régua graduada; o rendimento de grãos foi amostrado em 5 pontos aleatórios em cada tratamento, com uma área útil de 4,08, 6,15 e 14,25 m², para trigo, soja e milho, respectivamente. Os estados de compactação empregados na 1ª fase experimental modificaram os valores de densidade do solo e de macroporosidade, sendo mais evidente na profundidade de 0,0-0,1 m. A velocidade de infiltração de água no solo diminuiu significativamente com o aumento dos estados de compactação. O rendimento de grãos do trigo não foi afetado pelos estados de compactação. Os valores mais elevados de resistência à penetração do solo ocorreram nos tratamentos T3 e T5 na camada de 0,07-0,12 m. O mecanismo sulcador tipo facão da semeadora-adubadora reduziu o efeito dos estados de compactação do solo até a profundidade de 10 cm, diminuindo a densidade do solo e aumentando os macroporos.

Palavras-chave: compactação do solo, atributos físicos e produtividade.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the effects of compactation level on soil physical attributes: bulk density, macroporosity, microporosity and total porosity. Also evaluated the soil penetration resistance, infiltration rate, growth plants and grain yield of the cultures of wheat, soybean and corn, in Oxisol. The experiment was realized in Experimental Center of Agricultural Engineer, located in Cascavel (PR), Brazil. The experiment was conducted in two phases. In 1st phase was installed in the experimental units (10 X 50 m) treatments four with compactation levels that were: T1= one wheel, T3= three wheels, T5= five wheels e T0 = without additional compactation with compact roll. Evaluated the physical attributes, infiltration rate, growth plants and grain yield wheat. The 2nd phase have initiated after harvest of wheat culture with posterior samples collection of soil to evaluate soil physical attributes, soil penetration resistance before planter and after of the harvest of soybean and corn, growth plant and grain yield of soybean and corn. Soil samples were collected in the depth 0,01; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m for analyses of soil bulk density and soil porosity, with five samples randomized in each treatment. The infiltration rate was evaluated by infiltrometer ring. The soil penetration resistance was evaluated electronic by penetrometer. The initial population and end population were evaluated by middle graduated rule. The grain yield collected 5 samples randomized of each treatment, with useful area of 4.08, 6.15 e 14.25 m², wheat, soybean and corn, respectively. With results observed that the compactation levels installed in 1st phase changed values bulk density and macroporosity, been evidence in depth 0,0-0,1 m. The soil infiltration rate reduced significantly with the increase of compactation levels. The grain yield wheat no were reduced. The grain yield of wheat no was reduced with levels compactation. The values more increase of soil penetration resistance occurred in treatments T3 and T5 in the layer 0,07-0,12 m. Also effects of the shaft furrowing mechanism of the seeddrills in reduced bulk density and macroporosity increase in depth 0,0-0,1 m.

Keywords: soil compactation, soil attributes and yield.

INTRODUÇÃO

A agricultura voltada à subsistência passou a ser produzida em larga escala, com o para suprir às necessidades da população e também para a comercialização internacional. Nesse contexto, surge o sistema agrícola conservacionista, que considera a redução das operações agrícolas no preparo do solo e que tende a eliminar quase que totalmente o revolvimento do solo, mantendo a palhada, aumentando o teor de matéria orgânica, com conseqüente aumento da retenção da umidade e elasticidade do solo. Todavia, quando esse manejo é realizado em condições inadequadas, com operações agrícolas fora da faixa de friabilidade e, ainda, com uso excessivo de máquinas e/ou implementos mais pesados, pode ocasionar mudanças na estrutura do solo e causar sérios problemas de compactação, o que leva à perda da sustentabilidade e à redução do rendimento agrícola.

O solo é constituído de pequenas partículas, de diferentes tamanhos, que tendem a se arranjar e formar os agregados primários e secundários. No sistema plantio direto a compactação do solo ocorre superficialmente e quando o manejo do solo não é realizado de modo adequado modifica os seus atributos físicos. Os principais atributos modificados são a macroporosidade e a densidade do solo. No entanto, para o desenvolvimento das culturas é necessário que exista um volume ideal de poros, principalmente de macroporos, que são responsáveis pela aeração do solo e pela passagem da água. Quando o volume de macroporos é reduzido, dificulta a infiltração e a distribuição da água, a difusividade de gases e a temperatura ideal.

A resistência do solo à penetração é diretamente alterada quando há um incremento na densidade do solo e uma redução do volume de macroporos, influenciando a penetração do sistema radicular pelo perfil do solo. Além disso, essa propriedade está diretamente relacionada com a textura do solo e inversamente com a umidade do solo.

As camadas superficialmente compactadas podem ser fatores limitantes ao desenvolvimento radicular, pois comprometem a capacidade do

solo de absorver água. Dessa forma pode influenciar o desenvolvimento vegetativo das plantas, com conseqüente redução da área foliar, emergência de plantas, desenvolvimento e rendimento de grãos.

Estabelecer as relações entre a produção de grãos, atributos físico-mecânicos do solo, infiltração de água no solo e o comportamento solo-planta, pois os fatores como disponibilidade de nutrientes, água e oxigênio, qualidade estrutural do solo, resistência do solo à penetração e ainda as condições climáticas, como temperatura, umidade e precipitação estão intimamente relacionadas para manter um ambiente favorável ao desenvolvimento dessas culturas.

Sabe-se que qualquer cultura necessita de disponibilidade de água, nutrientes e temperatura ideal para que haja um crescimento normal, entretanto, quando a cultura sofre estresse hídrico-nutricional em épocas distintas, isso afeta todos os aspectos ligados ao seu crescimento, com conseqüência direta na área foliar, taxa de fotossíntese e outras reações biológicas. Quando o estresse hídrico ocorre por um período longo, pode influenciar a estatura e população final das plantas.

Considerando a realidade acima, esta pesquisa foi elaborada com o objetivo de avaliar o efeito da compactação adicional sobre os atributos físico-mecânicos e a taxa de infiltração de água no solo e verificar o desenvolvimento vegetativo e o conseqüente rendimento de grãos das culturas de trigo, soja e milho.

REVISÃO DE LITERATURA

1 PLANTIO DIRETO

A adoção do sistema plantio direto no Brasil evidenciou-se a partir da década de 70, proporcionando uma inovação na conservação do solo, que tinha por base práticas mecânicas de controle da erosão, como cultivo em nível e terraceamento (ELTZ, 1997; SILVA; REINERT; REICHERT, 2000a). Com aumento no consumo de alimentos e o decorrente aumento da produção, os solos sofreram esgotamento e empobrecimento por serem explorados de maneira inadequada, surgindo então o sistema plantio direto que promove a recuperação das áreas degradadas do solo mantém a lavoura economicamente integrada no sistema agrícola de produção (OCEPAR, 1989; FURLANI; ROQUE e SILVA, 2005).

Na década de 80, a difusão do uso do plantio direto e do cultivo mínimo com emprego do escarificador intensificou-se no estado do Paraná. Na década de 90, o sistema plantio direto aumentou significativamente, principalmente nos solos de alta aptidão agrícola, como é o caso do Latossolos (IPARDES, 1990).

Atualmente, segundo dados da Federação Brasileira do Plantio Direto, o sistema plantio direto ocupa 22 milhões de hectares, dos 42,5 milhões de hectares destinados à produção de grãos no Brasil. No estado do Paraná a área cultivada com o sistema plantio direto em 2003/2004 foi de 135,7 mil hectares, isso ocorreu devido à qualidade na conservação do solo, tanto no aspecto físico como biológico e, principalmente, a um aumento de rendimento, obtido pelo gerenciamento adequado do manejo solo, pela rotação de culturas (MASCHIO, 2005).

O plantio direto constitui o manejo de solo com maior potencial, pois atende ao objetivo da conservação do solo. Esse sistema está diretamente associado à manutenção da palhada, pela ausência do revolvimento do solo e conseqüente deposição e manutenção de resíduos vegetais a cada safra (SANTOS; REIS; DERPSCH, 1993; TORMENA; ROLOFF, 1996; GOEDERT; SCHERMACK; FREITAS, 2002). Desse modo o solo consegue reter mais umidade favorecendo a germinação, desenvolvimento e maturação das culturas. Segundo PEIXOTO (1997), esse sistema é o que mais se aproxima do ecossistema natural, pois conserva a micro e a macrofauna, por não revolver o solo e preconiza a manutenção de matéria orgânica, nutrientes e minerais na superfície, induzindo a uma maior fertilidade do solo.

Comparando-se os sistemas plantio direto e preparo convencional, foi observado aumento do rendimento de grãos de milho sob plantio direto, em experimentos de longa duração conduzidos por HILL (1990) e HERNANI e SALTON (1997), enquanto outros autores encontraram rendimentos inferiores dessa cultura, quando conduzida sob esse sistema (SOANE; BALL, 1998). Em 20 anos de estudo, ISMAIL, BLEVINS e FRYE (1994) encontraram maior rendimento de grãos de milho sob preparo convencional nos primeiros 12 anos de cultivo, o que se inverteu nos anos seguintes e foi atribuído por esses autores à elevação de matéria orgânica no solo sob o sistema plantio direto.

KLUTHCOUSKI et al. (2000) verificaram que o rendimento de grãos de soja foi estável ao longo do período analisado, sendo esta uma das culturas mais utilizadas no sistema plantio direto. YUSUF, SIEMENS e BULLOCK (1999) relatam que a soja pode, inicialmente, apresentar crescimento reduzido, com plantas menos vigorosas, quando comparadas ao sistema convencional, no entanto, com o passar dos anos, com a adição permanente de matéria orgânica o rendimento se iguala e pode até ser maior, entretanto, isso depende do sistema de gerenciamento adotado pelo agricultor.

Esse sistema também sofre influência da compactação ocasionada pela falta de revolvimento do solo por longo tempo e pela ocorrência cíclica de tráfego de máquinas ou implementos agrícolas que podem causar a compactação da camada superficial (SIDIRAS; HENKLAIN; DERPSCH, 1982; TORMENA; ROLOFF; SÁ, 1998), alterando diretamente os atributos físicos do solo. Segundo ALVARENGA et al. (1996), há aumento da densidade do solo e da microporosidade e diminuição da macroporosidade. Apesar disso, alguns

trabalhos destacam um balanço positivo entre a porosidade de aeração e o armazenamento de água no solo sob esse sistema (STONE; SILVEIRA, 1999).

A produção das culturas e o desenvolvimento do sistema radicular podem ser afetados pela compactação, que é dependente direta do sistema de manejo que é aplicado ao solo. De acordo com PELLEGRINI et al. (2000), os efeitos sobre a densidade de solo foram significativamente diferentes entre os sistemas de preparo convencional, cultivo mínimo e plantio direto até 10 cm de profundidade, no entanto há redução da densidade nos sistemas convencional e mínimo. COSTA et al. (2003) estudaram em Latossolo Bruno os atributos físicos do solo em diferentes sistemas de manejo e verificaram que o sistema plantio direto apresentou redução da densidade do solo de 1,08 para 0,99 Mg m⁻³ na subsuperfície.

O gerenciamento inadequado, como a ausência de rotação de cultura, adição de matéria orgânica e semeadura em condições de umidade inadequada, pode provocar a compactação, reduzir a agregação, alterar a densidade, reduzir a porosidade total na camada de 08 a 15 cm e, conseqüentemente, restringir o crescimento e o desenvolvimento das plantas (FONTES; HERNANI; SALTON; 1998; BERTOL et al., 2001).

2 COMPACTAÇÃO DO SOLO

A compactação do solo é um processo em que há redução da porosidade total e permeabilidade, aumento da resistência à penetração e densidade do solo, ocasionadas, principalmente, por pressões externas que provocam a aproximação das partículas, geralmente, reduzindo o volume de macroporos (SOANE; VAN OUWERKERK, 1994).

O manejo inadequado de máquinas agrícolas, com a realização de operações mecanizadas no campo sem o conhecimento da capacidade de suporte do solo naquela dada umidade, tem levado à modificação da estrutura física da camada superficial do solo, aumentando a densidade do solo, pelos

efeitos externos do contato rodado-solo, ocasionando formação de sulcos, aderência do solo às rodas e provocando efeitos internos como o rearranjo das partículas do solo e a conseqüente compactação que provoca redução do espaço poroso, aumento da densidade e da resistência do solo à penetração (MARQUEZ, JEVENOS; LINARES, 1991, KAISER et al., 1998, SILVA; REINERT; REICHERT, 2000b).

A tendência do desenvolvimento agrícola das últimas décadas trouxe máquinas e implementos de grande tamanho e potência, o que tem aumentado os problemas com relação ao uso adequado de pneus e pressão de insuflagem (SERVADIO et al., 2001; PAGLIAI et. al., 2003). O rodado dos veículos que trafegam sobre uma área cultivada tornou-se um dos principais agentes de compactação dos solos agrícolas. O tipo de rodado, área de contato, suas dimensões, velocidade de deslocamento, número de vezes que trafega sobre o mesmo local e carga suportada pelo solo, por exemplo, são fatores que provocam maior ou menor compactação (MAZIEIRO et. al., 1996).

A aplicação de cargas dinâmicas por rodados ou implementos agrícolas produz tensões na interface solo/pneu /implemento, compactando o solo em diferentes camadas (HORN; LEBERT, 1994; HORN; WAY; ROSTEK, 2003) e, caso essas tensões excedam à resistência interna do solo, ocorrerão mudanças nos atributos físicos.

NOVAK et al. (1992) estudaram, em um Latossolo Vermelho, o efeito do tráfego de um trator e da área de contato solo/pneu na compactação do solo e verificaram que o tráfego e a área de contato não elevaram a compactação a níveis prejudiciais à porosidade de aeração, em nenhum dos dois estados de umidade estudada. Entretanto, com o aumento da umidade do solo ocorreu maior compactação.

.2.1 Relação Solo e Compactação

O solo é um corpo poroso, não rígido, tridimensional, composto de três frações texturais principais: areia, silte e argila, que possuem forma, tamanho e estrutura mineralógica complexas, unidas por agentes cimentantes (CAMARGO; ALLEONI, 1997). Além disso, o solo é composto de água e ar

que, em conjunto, fornecem um sistema biológico sincronizado para a obtenção de uma produção agrícola de qualidade (NELSON, 1993).

A compactação dos solos agrícolas resulta da passagem de tráfego veicular que causa o rearranjo das partículas do solo e influencia vários dos seus atributos. A distribuição de forma e tamanho de poros é alterada, há um decréscimo na porosidade, principalmente, pelo aumento da densidade do solo, acarretando mudanças no movimento de calor, no conteúdo água, nas trocas gasosas e na absorção de nutrientes do solo. A restrição ao crescimento radicular tem sido observada em solos compactados, o que é atribuído a mudanças nos atributos físicos do solo, principalmente, à resistência à penetração do solo.

SILVA, REINERT e REICHERT (2000a) e (2000b) relatam que os fatores preponderantes do solo que determinam seu comportamento, quando submetidos à compactação, são a granulometria, o teor de matéria orgânica, a umidade do solo e a compactação inicial.

Os solos argilosos possuem grande fertilidade e, conseqüentemente, boa aptidão agrícola, apresentando alta plasticidade e pegajosidade, quando estão em capacidade de campo ou com alto teor de umidade, tornando-se suscetível à compactação e adesão aos implementos agrícolas, quando manejados com umidade acima da faixa de friabilidade (MANTOVANI, 1987; SECCO et al., 2004). Por isso, é necessário gerenciar o preparo do solo adequadamente para conservar as suas propriedades e, assim, melhorar a produtividade das culturas.

A compactação excessiva do solo é um fator relevante no processo produtivo agrícola, que pode apresentar prejuízos acentuados com a modernização dos implementos agrícolas, principalmente pela compactação superficial causada pela pressão de insuflagem dos pneus e a subsuperficial ocasionada pela pressão, devido ao peso dos eixos (GABRIEL FILHO, 1992; HANKASSON; VOORHEES, 1998).

As conseqüências da compactação se manifestam no solo e na planta. No solo, podem ocorrer efeitos benéficos, atribuídos à melhoria do contato solo-semente e ao aumento da disponibilidade de água em anos secos; e efeitos maléficos como zonas endurecidas, empoçamento de água, erosão hídrica que leva à poluição e assoreamento dos mananciais de água (RAGHAVAN; MICKYES, 1983; HANKASSON; VOORHEES, 1998). Segundo

Smucker; Erickson (1989) citado por LARSON (1996) a compactação pode limitar a adsorção e/ou absorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água, trocas gasosas e desenvolvimento do sistema radicular, resultando em decréscimo da produção, aumento da erosão e da potência necessária para o preparo do solo (; SOANE, 1990). Na planta, ocorre redução da penetração das raízes, por excessiva resistência do solo à penetração, deficiência em absorver oxigênio, menor desenvolvimento vegetativo aéreo e redução significativa do rendimento (HANKASSON; VOORHEES, 1998).

.2.2 A Compactação e Desenvolvimento das Plantas

A compactação, ao limitar o crescimento radicular das plantas, compromete sua capacidade em absorver nutrientes e água e a fixação da planta ao solo, causando debilitação e acamamento, sobretudo quando a camada de compactação é superficial, pois dessa maneira o sistema radicular não consegue penetrar pelo perfil do solo (ROSOLEN; ALMEIDA; SACRAMENTO, 1994; FERNANDEZ et al., 1995; GUIMARÃES; MOREIRA, 2001; GUIMARÃES; STONE; MOREIRA; 2002). Em tais condições, as reservas hídricas ao alcance do limitado sistema radicular são rapidamente consumidas, o que pode levar a uma deficiência hídrica na planta. Segundo WEAICH, BRISTOW e CASS (1992) e BEEMSTER et al. (1996), a compactação afeta o desenvolvimento aéreo das plantas, reduzindo a área foliar e o rendimento.

Segundo SHIERLAW e ALSTON (1984) e QUEIROZ-VOLTAN, NOGUEIRA e MIRANDA (2000), a compactação altera o comprimento, o diâmetro, a distribuição e a função do sistema radicular em resposta ao ambiente, modificando o volume de solo explorado pelas raízes, sendo essa fração ocupada de solo de extrema importância para a nutrição das culturas. Os nutrientes atingem a superfície das raízes por meio do movimento constante da água, satisfazendo às exigências das plantas. Entretanto, a alteração no sistema radicular não é necessariamente causa de alterações no crescimento ou rendimento da cultura, pois, muitas vezes, o sistema radicular é

reduzido, mas mantém satisfatoriamente o suprimento de água e nutrientes para a planta (TAYLOR; BRAR, 1991).

Estudos demonstram que uma pequena compactação é benéfica para aumentar a área de contato entre o solo e a raiz, além de proporcionar melhor retenção de água e melhores condições de absorção de nutrientes por unidade de raiz (KOOISTRA et al., 1992; BEUTLER; CENTURION, 2004a, 2004b). A estrutura ideal para o ótimo crescimento das plantas, segundo KOPI e DOUGLAS (1991) está relacionada com a uma grande área de contato entre o solo e a raiz e ao suficiente espaço poroso para a movimentação de água e gases, além da baixa resistência à penetração das raízes no solo.

De acordo com PABIN et al. (1998), a redução de 40 % no comprimento do sistema radicular é crítica para a produtividade das plantas em solos arenosos, entretanto, em um Latossolo Roxo, CINTRA e MIELNICZUK (1983) verificaram que houve redução de 50 % no comprimento das raízes com resistência à penetração de 1,10 MPa.

BORGES et al. (1988) e CAMARGO e ALLEONI (1997) relatam que o sistema radicular procura pontos de menor resistência para se desenvolver e quando não os encontram sofrem modificações em seu comprimento e diâmetro, originando a expansão de raízes laterais que proliferam e formam uma rede de raízes densas e com menor volume de solo explorado que, no campo, dificilmente sobrevivem em condições de seca.

GUIMARÃES, STONE e MOREIRA (2002) estudaram em vasos os efeitos da compactação e constataram que, na camada superficial do solo compactado, a densidade radicular e a massa de matéria seca diminuíram e a espessura das raízes do feijoeiro aumentou com o incremento da compactação. BEULTER e CENTURION (2004b) verificaram que o aumento da compactação causou aumento da densidade radicular e da matéria seca das raízes na camada de 0,0-0,05 m. Entretanto nas camadas 0,05-0,1; 0,1-0,15 m a densidade radicular diminuiu.

Outro importante fator que deve ser considerado é a presença no solo dos microorganismos e macroorganismos que, dependendo da qualidade estrutural e orgânica do solo, estarão presentes em maior ou menor concentração. Os microorganismos são responsáveis por vários processos bioquímicos que reciclam importantes elementos como o enxofre, o nitrogênio e o carbono, além de converterem plantas mortas e matéria animal em

substâncias inorgânicas simples que nutrem as plantas. A presença de raízes e sua extensão também podem afetar o número e os tipos de microrganismos presentes (efeito rizosfera). O número de microrganismos na raiz e à sua volta é muito maior do que no solo livre de raiz. Os produtos do metabolismo microbiano, que são liberados na rizosfera, estimulam o crescimento das plantas, ocorrendo assim uma troca de nutrientes entre o sistema radicular das plantas e os microrganismos (TORDIN, 2004; SIQUEIRA; MOREIRA, 2005).

A qualidade física do solo para o crescimento das plantas é determinada não só pela disponibilidade de água, aeração e temperatura, mas também pela resistência que a matriz do solo oferece à penetração das raízes (LETEY, 1985). Num solo degradado fisicamente, além da redução da quantidade de água disponível, a taxa de difusão de oxigênio e a resistência do solo à penetração podem limitar o crescimento das plantas na faixa de potenciais que determinam a disponibilidade de água no solo.

Qualquer alteração significativa que ocorra na estrutura do solo, seja pela compactação, seja por outro processo, provocará mudanças nas relações solo - ar - água, na resistência à penetração e na temperatura do solo, em consequência, há diminuição da resposta da planta ao crescimento radicular e aéreo (PEDROTTI; DIAS JÚNIOR, 1996).

3 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

.3.1 Densidade do Solo

A densidade do solo é uma relação entre a massa de sólidos e o volume e pode ser usada como uma medida direta do estado de compactação de um solo (SECCO, 2003). A compactação do solo refere-se à compressão do

solo não saturado, durante a qual ocorre um aumento da densidade, em consequência da redução dos poros responsáveis pela aeração (DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996).

As causas das alterações na densidade do solo podem ser naturais, difíceis de serem definidas e avaliadas, agindo lentamente no solo como, por exemplo, a eluviação de argilas ou artificialmente por forças mecânicas originadas da pressão causada pelas rodas das máquinas agrícolas e pela própria ação de implementos sobre o solo. O tráfego excessivo, realizado indiscriminadamente sob diferentes condições de umidade do solo, é o principal responsável pela compactação (SECCO et al., 2004).

Preparos conservacionistas de solo, tal como a semeadura direta e a ausência quase completa de preparo por longo tempo reduzem o volume de macroporos e elevam a densidade do solo (BERTOL et al., 2001) e a estabilidade dos agregados na superfície (CARPENEDO; MIELNICZUK, 1990; COSTA et al., 2003).

A densidade do solo é afetada por cultivos que alteram a estrutura e, por consequência, o arranjo e volume dos poros. Essas alterações influenciam nas propriedades físico-hídricas, tais como: porosidade de aeração, retenção de água no solo, disponibilidade de água para as plantas e resistência do solo à penetração (TORMENA; ROLOFF; SÁ, 1998).

De acordo com LOWERY e SCHULER (1994), ALAKUKU e ELOMEN (1995) e BALL et al. (1997), a densidade do solo é significativamente elevada após o tráfego de máquinas agrícolas, com redução da macroporosidade e conseqüente diminuição da condutividade hidráulica. A disponibilidade de água e nutrientes é comprometida pela alteração da estrutura do solo e, como consequência, gera um declínio da produtividade (WIERMANN et al., 2000).

Em um solo compactado, ocorre diminuição na porosidade livre de água, com conseqüente decréscimo em sua permeabilidade, tanto da água como das trocas gasosas. A baixa aeração induz à ramificação das raízes adventícias superficiais, tornando-as menos eficientes na absorção de água, nutrientes e trocas gasosas, conforme afirmam CAMARGO e ALLEONI (1997).

Segundo estudos de BERTOL et al. (2004), em um Cambissolo Húmico, na camada de 0-10 cm, a densidade do solo foi maior no plantio direto que no preparo convencional e campo nativo, enquanto que nas camadas subsuperficiais, essa variável apresenta valores maiores no preparo

convencional. Nessa camada, o sistema plantio direto reduz o volume de macroporos em relação ao sistema convencional e ao campo nativo, refletindo na redução do volume total de poros e no aumento do volume de microporos.

STONE, GUIMARÃES e MOREIRA (2002), estudando em um Latossolo Vermelho o efeito da compactação sobre as propriedades físico-hídricas, verificaram um aumento de densidade do solo e da resistência à penetração e uma redução linear da porosidade total e macroporosidade com o aumento da densidade.

SHIERLAW e ALSTON (1984) verificaram que o valor de densidade do solo de $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$ influenciou negativamente o crescimento radicular em solo de textura média confinado em vasos. ALVARENGA et al. (1996) determinaram em Latossolo Vermelho-Escuro muito argiloso a densidade crítica do solo ao desenvolvimento das raízes de diversas leguminosas e obtiveram os seguintes resultados: densidade de $1,25 \text{ Mg m}^{-3}$ para a *Crotalaria juncea*, feijão de porco, feijão-bravo-do-Ceará e densidade de $1,35 \text{ Mg m}^{-3}$ para o guandu. CAMARGO e ALLEONI (1997) consideram o valor de $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$ como crítico para solos de textura franco-argilosa a argilosos. GUIMARÃES e MOREIRA (2001) verificaram, em pesquisas com arroz de terras altas sob plantio direto, que a densidade do solo de $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ afetou o crescimento subterrâneo e aéreo. REINERT, REICHERT e SILVA. (2001) relacionaram sua pesquisa com os dados obtidos de densidade do solo de outros pesquisadores, propondo os seguintes valores críticos para a densidade do solo: horizonte de textura argilosa com mais de 550 g Kg^{-1} de argila, densidade do solo de $1,45 \text{ g Mg m}^{-3}$, quando o horizonte possui textura média, com fração de argila de 200 e 550 g Kg^{-1} , a densidade do solo é de $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$ e quando o horizonte é de textura arenosa com fração de argila inferior a 200 g Kg^{-1} , a densidade do solo é de $1,65 \text{ Mg m}^{-3}$.

GUIMARÃES, STONE e MOREIRA (2002) relataram que o valor de $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ também afetou o desenvolvimento radicular e a parte aérea do feijão. SECCO (2003) verificou que o estado de compactação mais intenso, em dois Latossolos, apresentou valores médios de densidade do solo de 1,62 e $1,54 \text{ Mg m}^{-3}$ e, em cultura de trigo semeado em solo franco argiloso, compactado a uma densidade de $1,51 \text{ Mg m}^{-3}$, verificou reduções na produtividade de grãos de 9-20% e na matéria seca de 12 a 23% .

A compactação do solo constitui um tema de crescente importância, face ao aumento da mecanização nas atividades agrícolas. Pesquisadores vêm demonstrando claramente o efeito da compactação nas propriedades físicas do solo. No entanto, ainda não há resultados claros que indiquem que determinada densidade do solo será prejudicial ao crescimento e desenvolvimento da planta. Por isso, existe a necessidade de pesquisar como a densidade pode influenciar o desenvolvimento da cultura, ou seja, analisando o sistema radicular e aéreo, como população inicial, população final e estatura das culturas.

.3.2 Porosidade do Solo

A porosidade é a fração volumétrica do solo ocupada por ar e/ou água, representando o local onde circulam a solução (água e nutrientes) e o ar, é, portanto, o espaço em que ocorrem os processos dinâmicos do ar e solução do solo (HILLEL, 1970). Para um bom desenvolvimento radicular e aéreo da planta é necessária uma porosidade mínima de 0,06 e 0,20 m³ m⁻³, dependendo do tipo de solo. No entanto, para o desenvolvimento das culturas é necessário um volume ideal de poros, principalmente de macroporos, que são responsáveis pela aeração do solo e pela passagem da água, pois quando o volume de macroporos é reduzido, dificultando a infiltração e distribuição da água, difusividade de gases e a temperatura do solo (PRIMAVESI, 1990; BEUTLER et al., 2002; BEUTLER et al., 2004).

Além disso, SILVA, REINERT e REICHERT (2000b) relatam que a porosidade está relacionada ao manejo do solo, tais como: mecanização, tipo de cultura plantada, tipo de solo, biologia e macroestrutura do solo.

A compactação do solo acarreta a redução do espaço poroso, principalmente o volume livre de água-macroporos, afetando as suas propriedades físico-hídricas (DIAS JÚNIOR; PIERCE 1996). STONE, GUIMARÃES e MOREIRA (2002) observaram que, em estudo em vasos com Latossolo Vermelho, houve transformação de macroporos em microporos decorrente da compactação.

A distribuição do diâmetro dos poros e sua continuidade condicionam o desenvolvimento radicular por estar diretamente relacionada ao volume de ar e de água e, indiretamente, à resistência à penetração das raízes, determinando a capacidade de transporte de oxigênio (LIPIEC; HATANO, 2003). HORN e LEBERT (1994) observaram que o tráfego de quatro passadas de uma carreta graneleira provocou decréscimo de até 50% da porosidade e permeabilidade na profundidade de 0,20-0,40 m.

Essa observação é semelhante à de ALVARENGA et al. (1996) que, ao compactar manualmente um Latossolo Vermelho-Amarelo para obtenção da densidade de $1,40 \text{ kg dm}^{-3}$, obteve uma redução da macroporosidade de $0,31 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Com relação à microporosidade, BORGES et al. (1988) relataram que, com o aumento da microporosidade, a água passa a ser retida sob maior tensão nos microporos, isso pode dificultar a capacidade das plantas em extraí-la do solo.

O uso e o manejo do solo alteram a sua densidade e, conseqüentemente, a porosidade total e a de aeração. A porosidade de aeração é a razão entre o volume de ar e o volume do solo, sendo, portanto, afetada pela umidade. O ar ocupa o espaço poroso do solo não ocupado pela água. Para um solo seco, todo o espaço vazio (porosidade total) é ocupado por ar. A exigência das plantas para a aeração do solo, isto é, porosidade livre de água necessária para o seu pleno desenvolvimento, varia entre as espécies e os tipos de solos. Os efeitos da deficiência de difusão de oxigênio no solo sobre as plantas são estudados e descritos por SOJKA (1992). CAMARGO e ALLEONI (1997) também mostraram que as trocas gasosas do solo com a atmosfera são importantes para o bom desenvolvimento radicular e aéreo. Essa difusão depende diretamente da porosidade livre de água. A porosidade de aeração é muito importante para a ramificação uniforme das raízes, pois se ocorre baixa aeração, há uma proliferação das raízes adventícias e, essa concentração de raízes, leva a planta a retirar água apenas superficialmente, podendo causar deficiência hídrica em anos de seca.

ERICKSON (1982) realizou uma revisão sobre o assunto e concluiu que, para a maioria das culturas, o valor mínimo do espaço poroso livre de água deve estar próximo a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. CINTRA, MIELNICZUK e SCOPEL (1983) verificaram que, quando a macroporosidade é reduzida a valores de $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e a densidade do solo a valores acima de $1,44 \text{ Mg m}^{-3}$, o

crescimento radicular fica prejudicado. Entretanto, STONE, GUIMARÃES e MOREIRA (2002), estudando um Latossolo Vermelho perférico, relatam que a porosidade total e a macroporosidade diminuiriam linearmente com o aumento da densidade do solo. KERTZMANN (1996) relata que ao diminuir o volume de macroporos, parte da água fica retida nos microporos a uma alta tensão, ficando indisponível para as plantas.

SECCO et al. (2004), estudando um Latossolo Vermelho-Escuro, mostraram que houve relação direta entre a densidade e a microporosidade do solo e que nas camadas com maiores valores de densidade do solo ocorreram maiores valores de microporos. Com relação aos macroporos, ocorre uma relação inversa, atingindo valores inferiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ quando a densidade do solo for igual ou superior a $1,36 \text{ Mg m}^{-3}$.

.3.3 Resistência do Solo à Penetração

A compactação do solo pode ser caracterizada por meio da resistência do solo à penetração que está diretamente relacionada ao crescimento radicular das culturas (LETEY, 1991; PEDROTTI et al., 2001; BEUTLER et al., 2002). A resistência do solo à penetração é uma propriedade físico-mecânica utilizada para estabelecer pontos de maior resistência à penetração no perfil do solo, esta propriedade está diretamente relacionada com o crescimento do sistema radicular. Entretanto, ela varia com a umidade e a densidade do solo. Além disso, a resistência também está associada à característica estrutural dos agregados, sendo que a porosidade estrutural do solo é a melhor variável para explicar que a resistência depende da estrutura e da umidade do solo (GONZALEZ, 1991). Esses parâmetros, juntamente com a forma de manejo, podem indicar a qualidade do solo e podem, também, interferir no desenvolvimento radicular e na disponibilidade de nutrientes para as plantas.

A compactação do solo diminui o número de poros grandes e, dessa maneira, para que as raízes consigam penetrar têm que exercer uma força para deslocar as partículas do solo. O aumento do estado de compactação do solo resulta em um aumento da resistência à penetração das raízes. O limite crítico de resistência depende da espécie de planta utilizada, umidade

gravimétrica e textura do solo, porquanto, o sistema radicular das culturas apresenta diferentes graus de tolerância à compactação (GIMENEZ et al., 1997).

Segundo ROSOLEN et al. (1999), solos com conteúdo de argila acima de 40% têm maior resistência do solo à penetração, enquanto que em solos arenosos o incremento da resistência em função da compactação é menos acentuado. Para se ter uma padronização da resistência do solo a penetração os dados deveriam ser coletados na capacidade de campo do solo, pois o mensuramento desta propriedade depende diretamente do conteúdo de água.

Segundo ARSHAD, LOWERY e GROSSMAN (1996), a resistência do solo à penetração apresenta melhores correlações com a densidade do solo e crescimento radicular quando determinada na umidade retida próxima à capacidade de campo. A tolerância das plantas à compactação está diretamente relacionada ao teor de água no solo. Em solos com maior teor de água, o crescimento da cevada foi maior na densidade do solo intermediária e, em menor teor de água, o crescimento foi superior no menor nível de compactação (RIBEIRO, 1999).

Os níveis críticos de resistência do solo para o crescimento das plantas variam de 1 a 4 Mpa e estão relacionados com o tipo de solo, teores de água e com a espécie cultivada (CANARACHE, 1990; MEROTTO JÚNIOR; MUNDSTOCK, 1999).

Muitos pesquisadores, contudo, utilizam o valor de 2 MPa como o limite crítico, no entanto, o valor limitante ao desenvolvimento do sistema radicular das culturas ainda é muito discutido, pois depende da densidade do solo, textura, tipo do sistema radicular, umidade, entre outros fatores que direta ou indiretamente podem influenciar a resistência do solo. Pesquisa realizada por Ortoloni et al. (1982), citados por PRADO et al. (2001), mostraram, em Latossolo Vermelho-escuro, que à medida que a resistência do solo à penetração aumentou de 0,45 para 1,49 MPa, o rendimento da soja diminuiu. ROSOLEN et al. (1999), em estudo com Latossolo Roxo, mostraram que, quando a resistência do solo à penetração atinge valores de 1,3 MPa, reduz, pela metade, o crescimento das raízes seminais adventícias e o comprimento do milho.

GENRO JÚNIOR, REINERT e REICHERT. (2004), trabalhando em Latossolo Vermelho distroférico, avaliaram a resistência do solo argiloso à

penetração com distintos sistemas de cultura em plantio direto e constataram que o maior estado de compactação foi verificado na camada em torno de 0,1 m de profundidade e o menor na camada até 0,07 m. E os valores considerados restritivos ao crescimento das plantas, acima de 2,0 MPa, foram atingidos na camada de 0,03-0,23 m de profundidade, com umidade gravimétrica entre 0,14 a 0,28 Kg Kg⁻¹.

Entretanto, TAVARES FILHO et al. (2001), estudando um Latossolo Roxo argiloso, verificaram que os valores de resistência do solo à penetração no plantio direto foram mais afetados pela distribuição estrutural do que pela umidade do solo. Os autores mostraram também que valores de resistência apresentados na literatura como restritivos ao desenvolvimento radicular (1-3,5 MPa), não restringiram o desenvolvimento radicular do milho.

Em condições de campo, SECCO et al. (2000), estudando um Latossolo Vermelho, verificaram redução de 8,3% na produção de trigo, quando a resistência do solo à penetração atingiu valores entre 2,0-2,4 MPa. Estudando um Latossolo Vermelho distroférico e um Latossolo Vermelho distrófico, SECCO (2003) encontrou valores de resistência à penetração de 3,26 e 2,65 MPa que interferiram no rendimento da cultura de milho e trigo, entretanto, para a cultura da soja não ocorreu diferença no rendimento.

MEROTTO JÚNIOR e MUNDSTOCK (1999) relataram que a resistência do solo está diretamente relacionada com a densidade e tipo textural do solo e inversamente relacionada com a umidade. Em seus estudos obtiveram uma equação linear de correlação de $R^2= 0,97$, em solo Podzólico Vermelho Escuro. ROSOLEN et al. (1999) também encontraram essa correlação ($R^2= 0,98$) para solo de diferentes texturas (Latosolo Vermelho álico e Latossolo Roxo álico) e compactados artificialmente. Relatam que solos com conteúdo de argila maior alcançam maiores valores de resistência à penetração, dependendo do conteúdo de água no solo.

4 INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

A infiltração é um processo pelo qual a água penetra no solo por meio da superfície. No sistema plantio direto a taxa de infiltração pode ser afetada pela palhada deixada na superfície do solo e pela manutenção dos canais contínuos formado pelas minhocas e pela senescência das raízes das culturas (SIDIRAS; ROTH; FARIAS, 1984; EHLERS, 1985).

No campo, uma importante variável que deve ser controlada é a velocidade de infiltração. Nos solos argilosos a velocidade de infiltração é menor e, quanto maior o tempo de exposição à água, menor será a infiltração até atingir um valor constante. A infiltração determina o balanço de água na zona das raízes, por isso, o conhecimento do processo e de suas relações com os atributos do solo é de fundamental importância para o manejo adequado do solo e da água (BERNARDO, 1995; REICHARDT; TIMM, 2004).

As operações agrícolas, quando realizadas sem o controle da umidade do solo, provocam aumento da área compactada (PEDROTTI; DIAS JÚNIOR, 1996), o que pode reduzir a infiltração de água no solo e, conseqüentemente, a disponibilidade de água para as plantas, comprometendo a produtividade.

A utilização do infiltrômetro popularizou se na determinação das características hidrodinâmicas do solo relacionadas à infiltração. Para medição da infiltração se utiliza, principalmente, o infiltrômetro simples ou de duplo anel. O infiltrômetro de duplo anel tem a vantagem de minimizar as infiltrações laterais, mantendo o fluxo na direção vertical. A desvantagem é necessitar de um volume maior de água para fazer a medição. Estudos realizados em áreas agrícolas indicaram que os solos, mesmo com aparência homogênea, apresentam variabilidade nas propriedades hidro-físicas (SHARMA; LUXMOORE; 1979).

A infiltração de água no solo é afetada diretamente pela quantidade, continuidade e distribuição dos diâmetros dos poros em áreas de plantio direto. Isso se deve ao arranjo dos agregados do solo em microporos e macroporos e pela ação da macrofauna, que está em constante movimento construindo galerias no solo (EDWARDS, 1982). Abrão et al., citados por MORAES e

BENEZ (1996), relataram que, em áreas de plantio convencional, a infiltração inicial é mais rápida, mas no sistema plantio direto a infiltração é contínua, devido, principalmente, a continuidades dos poros. SOUZA e ALVES (2003) verificaram em estudo com diferentes tipos de manejo que a compactação e a descontinuidade dos poros são responsáveis pela redução significativa da permeabilidade de água no solo.

A infiltração em Latossolos é, geralmente, elevada em condições normais, porém, a compactação do solo limita a infiltração de água, diminuindo a velocidade de infiltração e ocasionando acúmulo de água e erosão na superfície do solo (FERREIRA et al., 2000). Por esse motivo, MOURA FILHO e BUOL (1972) estudaram os efeitos de 15 anos de sistema plantio direto em Latossolo Roxo e observaram que a taxa de infiltração diminuiu de 82 para 12 cm h⁻¹ com o cultivo intensivo, ao longo dos anos.

ALBUQUERQUE et al. (1995) concluíram que a rede de macroporos, criada pelo sistema plantio direto e pela rotação adequada de culturas, favoreceram a infiltração de água, mesmo com índices muito altos de densidade do solo.

5 INFLUÊNCIA DA COMPACTAÇÃO NO RENDIMENTO DE GRÃOS

O tráfego de máquinas pesadas no sistema plantio direto tem provocado compactação superficial no solo (SILVA; REINERT; REICHERT, 2000c), reduzindo o rendimento das diferentes culturas (BEUTLER; CENTURION, 2003). Além disso, verifica-se dificuldade de avaliação da compactação do solo, originada pelo tráfego excessivo, em condições de umidade alta. RALISCH e TAVARES FILHO (2002) afirmam que a compactação provoca significativas reduções na produtividade e acréscimo nos custos de produção das culturas anuais.

LETEY (1991) discute a dificuldade de se estabelecerem as relações entre o rendimento de grãos das culturas e os atributos físicos do solo, mais

especificamente de sua estrutura. Salieta que fatores como suprimento de nutrientes, água, oxigênio, temperatura e resistência à penetração podem prejudicar a emergência de plântulas e o crescimento radicular, afetando diretamente o desenvolvimento da planta.

PAULETTI et al. (2003), estudando o rendimento da cultura do milho e soja em uma sucessão cultural de oito anos, sob diferentes sistemas de manejo de solo e de culturas, verificaram que o rendimento de grãos de milho não foi afetado pelos sistemas de manejo de solo e de culturas, ao longo dos anos. Em 1998, o rendimento de grãos de soja do tratamento plantio direto foi inferior aos tratamentos plantio convencional e escarificação, fato atribuído a problemas fitossanitários da cultivar BR 16. No ano 2000, essa cultivar foi substituída pela BRS 133, obtendo-se maior produção no tratamento plantio direto.

Pesquisa realizada por Chancellor (1971), citado por SECCO (2003), relata que o tráfego pesado não influenciou o rendimento de trigo, sorgo e milho. Entretanto, SECCO (2003) verificou que o estado de compactação mais intenso apresentou valores médios de densidade do solo de 1,62 e 1,54 Mg m⁻³ e de resistência do solo de 2,65 e 3,26 MPa, proporcionando decréscimos no rendimento da cultura do trigo de 18,35 e 34,05 %, respectivamente, em Latossolo Vermelho distrófico e Latossolo Vermelho distroférico. Na cultura do milho, somente no Latossolo Vermelho distroférico os níveis de compactação existentes promoveram decréscimo na produção de grãos de 24,3 %, em relação ao menor estado de compactação. Concluiu também que esses níveis de compactação do solo não promoveram decréscimo de rendimento na cultura da soja.

BEUTLER e CENTURION (2004b) avaliaram o rendimento da soja em Latossolo Vermelho textura média na safra 2002/2003 e encontraram que, quando ocorreu decréscimo de 18 % na densidade radicular e 0,85 MPa na resistência do solo na camada de 0,05-0,15 m, ocorreu também a redução da produção de grãos de soja. Esse valor é inferior ao preconizado como crítico ao crescimento radicular, cerca de 2,0 MPa. GUIMARÃES e MOREIRA (2001) verificaram em campo redução na produção de matéria seca da parte aérea de arroz a partir da densidade de 1,40 Mg m⁻³ em Latossolo Vermelho-Escuro de textura média. Em solos compactados ocorreram menor crescimento radicular

e menor produtividade das culturas, em razão do menor volume de solo explorado, menor penetração, ramificação e espessamento pelas raízes.

BEUTLER et al. (2004) estudaram, em Latossolo Vermelho de textura média, o intervalo hídrico ótimo e a sua relação com o rendimento do arroz de sequeiro. Verificaram que a partir da densidade de $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$, o intervalo hídrico ótimo diminuiu e, a partir de densidade $1,62 \text{ Mg m}^{-3}$ e resistência à penetração de $1,85 \text{ MPa}$, ocorreu redução da produtividade.

SECCO et al. (2004), estudando o rendimento da soja em um Latossolo Vermelho distroférico, verificaram menores valores de densidade do solo, porosidade e resistência do solo à penetração na profundidade de 0,0-0,10 m, encontrando também uma relação direta entre a densidade, o volume de microporos e a resistência do solo; e uma relação indireta entre densidade e volume de macroporos com o aumento da compactação do solo. O rendimento de grãos dos cultivares de soja não sofreu decréscimo com o aumento da compactação e o tratamento de escarificação também não influenciou o rendimento de grãos.

ADAMS e WULFSOHN (1997), estudando um solo franco siltoso e franco-argiloso, encontraram reduções de 13% na produtividade do trigo e 7,5 % no milho, quando a densidade do solo passou de $1,09$ para $1,19 \text{ Mg m}^{-3}$. ALVES et al. (2003) relatam que os estandes inicial e final do feijão, em Latossolo distroférico típico, reduziram linearmente com o incremento da compactação. Quanto ao rendimento, registraram uma queda linear em razão do aumento da densidade do solo, observando que, quando esse atributo do solo aumenta de $1,08$ para $1,50 \text{ Mg m}^{-3}$, o rendimento de grãos cai de 851 para 327 Kg ha^{-1} , cerca de 62%. BEUTLER; CENTURION e ROQUE (2004), em estudo do rendimento da soja e arroz em Latossolos, verificaram que o aumento dos valores da resistência do solo à penetração, densidade e microporosidade do solo resultou em decréscimo da produção de grãos de soja e arroz de sequeiro e que os atributos físicos tiveram maiores relações com a produção de grãos no menor conteúdo de água no solo em Latossolo Vermelho de textura média.

6 MANEJO DO SOLO COM QUALIDADE

Algumas vezes, a adoção do plantio direto ocorre depois que o solo já está com alto índice de degradação, tanto estruturalmente quanto no teor de matéria orgânica, pois esse sistema proporciona uma melhoria na qualidade dos atributos químicos e biológicos do solo. Com a adição de matéria orgânica e sua incorporação ao solo, por decomposição pelos microorganismos, ocorre um aumento na elasticidade e na resistência do solo à compactação, favorecendo a formação de um ambiente de qualidade para que ocorram as atividades biológicas.

Para uma maior eficiência e qualidade do sistema plantio direto é importante que haja uma rotação adequada de culturas, empregando aquelas que apresentem alta relação carbono/nitrogênio, pois, desse modo, dificulta-se a ação de microorganismos na sua decomposição e a matéria orgânica permanece por mais tempo no solo, favorecendo a retenção de umidade e o conseqüente crescimento das culturas. Segundo SANTOS et al. (1998), a rotação de culturas permite produzir e estabilizar o rendimento de grãos pela diversificação de espécies. Isso ocorre em virtude da completa decomposição microbiana de resíduos vegetais e da mineralização dos nutrientes essenciais para a planta.

A descompactação do solo pode ser mecânica ou pela utilização de plantas com sistema radicular agressivo. Entre elas estão: tremoço, alfafa, soja perene, nabo forrageiro, sirato, feijão guandu, crotalárias e outras. Esse tipo de plantas deixa canais que propiciam condições para o desenvolvimento de raízes da cultura subsequente (WANG; KESKETH; WOOLLEY, 1986). Os canais são chamados de bioporos que são poros mais estáveis que aqueles formados pela preparação do solo. Isso ocorre, principalmente, pela pressão lateral exercida pela raiz e pela ação de microorganismos que atuam na decomposição da mucilagem produzida pela raiz. A presença de bioporos no solo facilita o crescimento radicular pela criação de pontos de menor resistência à penetração radicular (STIRZAKER; PASSIOURA; WILMS, 1996). Segundo esses autores, o sistema plantio direto facilita a formação dos

bioporos, pela conservação do ambiente natural, adição de matéria orgânica e proliferação de microorganismos. Além disso, o contínuo aporte de matéria orgânica por secreções radiculares, nas renovações do sistema radicular e da parte aérea, e os resíduos de colheitas estimulam a atividade biológica do solo. Como resultado, os produtos dessa interação, em diferentes etapas da decomposição, funcionam como agentes ligantes de formação e estabilização dos agregados (KLUTHCOUSKI et al. 2000).

Pesquisas de SILVA e ROSOLEN (2002) verificaram que o cultivo rotacionado de espécies de aveia preta, guandu, milho, mucuna preta, sorgo e tremoço azul, em Latossolo Vermelho de textura franco-arenosa, em camadas de 3,5 cm, compactadas até as densidades de 1,2, 1,36, 1,60 Mg m⁻³, favoreceram o crescimento radicular da soja abaixo das camadas compactadas. ABREU (2000) comparou a eficiência da descompactação do solo com a utilização de sistema biológico, utilizando a espécie crotalária e o sistema mecânico por meio de escarificação, em um Argissolo Vermelho amarelo distrófico com 10 anos sob sistema plantio direto, e constataram que o sistema biológico foi mais eficiente, pois apresentou valores mais elevados de condutividade hidráulica saturada, infiltração de água no solo por chuva natural e retenção de água no solo.

A vantagem da subsolagem natural feita pelas plantas recuperadoras da estrutura é o revolvimento homogêneo das camadas compactadas, diminuindo o custo da operação e gerando um acúmulo matéria orgânica em regiões mais profundas, ação dos microorganismos que melhora a qualidade estrutural do solo e a difusão dos gases (STIRZAKER; PASSIOURA; WILMS, 1996; CAMARGO; ALLEONI, 1997).

Na recuperação de um solo degradado, a adição de matéria orgânica é fundamental, pois melhora as condições físicas internas e, dessa forma, mantém-se um ambiente adequado, com grande retenção de umidade, que propicia condições para o crescimento das raízes, além de ocorrer atividades macro e microbiológicas na decomposição dos resíduos vegetais (ALVES, 1992). Dessa forma a micro, meso e macrofauna exercem influência na agregação, por meio de ingestão, decomposição e excreção de materiais de solo, constituídos por materiais orgânicos e inorgânicos (ASSAD, 1997). Segundo CAMPOS et al. (1995), a reestruturação do solo depende do sistema de manejo que será usado em seu preparo. A adoção de sistemas que

mantenham a proteção do solo por meio de contínuo aporte de resíduos orgânicos é fundamental para a manutenção de uma boa estrutura, pois o contínuo adição de matéria orgânica fornece energia para a atividade microbiana que atua como agente de estabilização dos agregados.

MATERIAL E MÉTODOS

1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido no Núcleo Experimental do Curso de Engenharia Agrícola da UNIOESTE (NEEA), no período de abril de 2004 a março de 2005. O Núcleo Experimental localiza-se na BR 467, km 45, entre as cidades de Toledo e Cascavel. Geograficamente, está situado nas coordenadas: 24°48' de latitude sul e 53°26' de longitude oeste, altitude média de 760 m e declividade menor que 0,03 m.m⁻¹ na área estudada. Segundo a EMBRAPA (1999), o solo da região é classificado como Latossolo Vermelho-Escuro distroférico típico, substrato basalto e relevo suavemente ondulado.

A área destinada à implantação do projeto é cultivada há oito anos com o sistema plantio direto, principalmente com a cultura de aveia ou trigo no inverno e milho ou soja no verão.

2 IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi realizado em quatro faixas de 10 X 50 metros. Antes da implantação dos tratamentos com os níveis de compactação, foi realizada uma caracterização física da área experimental pela análise dos seguintes atributos físicos do solo: densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma),

microporosidade (Mi) e porosidade total (Pt). Depois dessa coleta, o experimento foi dividido em duas fases experimentais.

A primeira fase experimental teve início com o estabelecimento aleatório dos tratamentos nas quatro faixas pré-estabelecidas, submetidas a três estados de compactação de solo e ao tratamento sem compactação adicional, implantado por meio de um rolo compactador. Depois da implantação dos tratamentos que constaram de uma, três e cinco passadas com o rolo compactador e mais o tratamento sem compactação adicional, foram coletados dados para quantificar os atributos físicos do solo e avaliar a taxa de infiltração de água no solo. A semeadura do trigo foi realizada logo após a caracterização física do solo e após o estabelecimento dos tratamentos com estados de compactação. Foram avaliados os seguintes parâmetros: emergência, população inicial, população final, altura das plantas, rendimento de grãos e peso hectolítrico da cultura do trigo.

A segunda fase experimental iniciou-se com a coleta de dados pós-colheita do trigo para a análise dos atributos físicos e resistência à penetração do solo. Após essas avaliações, na metade de cada unidade experimental, com seu tratamento pré-estabelecido, foram semeados soja e milho e avaliado, posteriormente, o desenvolvimento vegetativo e o rendimento de grãos. Após a colheita da soja e do milho foram novamente avaliados os atributos físicos do solo para a verificação do impacto do cultivo dessas culturas sobre os atributos físicos do solo, sendo também mensurada a resistência do solo à penetração.

Em cada cultura (trigo, soja e milho) foi realizado o controle de invasoras, pragas e doenças, segundo recomendações de cada cultura, buscando-se, assim, evitar a influência desses fatores no rendimento final de grãos.

.2.1 Rolo Compactador

Para estabelecer os estados de compactação no solo foi utilizado um rolo compactador da Marca Caterpillar, modelo CP 5330, tipo superfície lisa

com dispositivo vibratório. As especificações técnicas do rolo, conforme os dados dos fabricantes, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Especificações técnicas do rolo compactador

DADOS	VALOR
Massa	16560 kg
Potência do motor	97 hw
Comprimento	5510 mm
Largura	2290 mm
Altura	3070 mm
Diâmetro do rolo	1549 mm
Frequência de vibração	31 Hz
Pressão média aplicada	120 KPa

FONTE: www.brasil.cat.com/cda

3 DADOS CLIMÁTICOS

A região possui clima subtropical, com estações bem definidas. Os dados de precipitação média mensal, temperatura máxima, temperatura mínima e disponibilidade de água no solo foram obtidos por meio do Sistema Meteorológico do Paraná - SIMEPAR. Esses dados são apresentados nas Tabelas 2 e 3 e permitem verificar que, durante o período experimental, a maior precipitação ocorreu no mês de outubro de 2004 e a menor ocorreu no mês de dezembro de 2004. Com relação à temperatura mínima, observa-se o menor valor no mês de junho de 2004 e o maior no mês de janeiro de 2005.

Tabela 2 - Precipitação média mensal, temperatura mínima, temperatura máxima e disponibilidade de água no solo na 1ª e 2ª fases experimentais

MESES	1ª FASE EXPERIMENTAL			
	PRECIPITAÇÃO (mm)	DAS (mm)	TEMP (min)	TEMP (máx)
Janeiro	39,2	71,0	18,0	30,7

Fevereiro	98,4	62,2	17,5	30,5
Março	80,0	73,3	19,2	32,0
Abril	181,6	90,9	17,6	28,0
Maio	238,6	97,4	14,7	22,0
Junho	111,0	92,1	11,2	18,0
Julho	131,1	93,0	7,0	21,5
Agosto	22,2	60,0	11,5	24,5
Setembro	55,7	60,8	15,0	27,4
2ª FASE EXPERIMENTAL				
Outubro	401,3	93,8	14,8	27,4
Novembro	160,8	87,6	16,3	28,0
Dezembro	30,8	45,6	18,0	29,5
Janeiro	87,4	46,5	19,6	29,5
Fevereiro	35,5	32,5	19,1	31,6
Março	95,5	62,0	19,3	31,4
Abril	135,0	82,7	16,2	28,3

FONTE: SIMEPAR, 2005.

NOTA: DAS - Disponibilidade de água; TEMP (min) - Temperatura mínima; TEMP (máx) - Temperatura máxima.

4 PRIMEIRA FASE EXPERIMENTAL

4.1 Tratamentos

Por meio do rolo compactador foram estabelecidos os seguintes estados de compactação: uma passada com rolo compactador – T1, três passadas com rolo compactador – T3, cinco passadas com rolo compactador T5 e a unidade experimental sem compactação adicional - T0 (Figura 1).

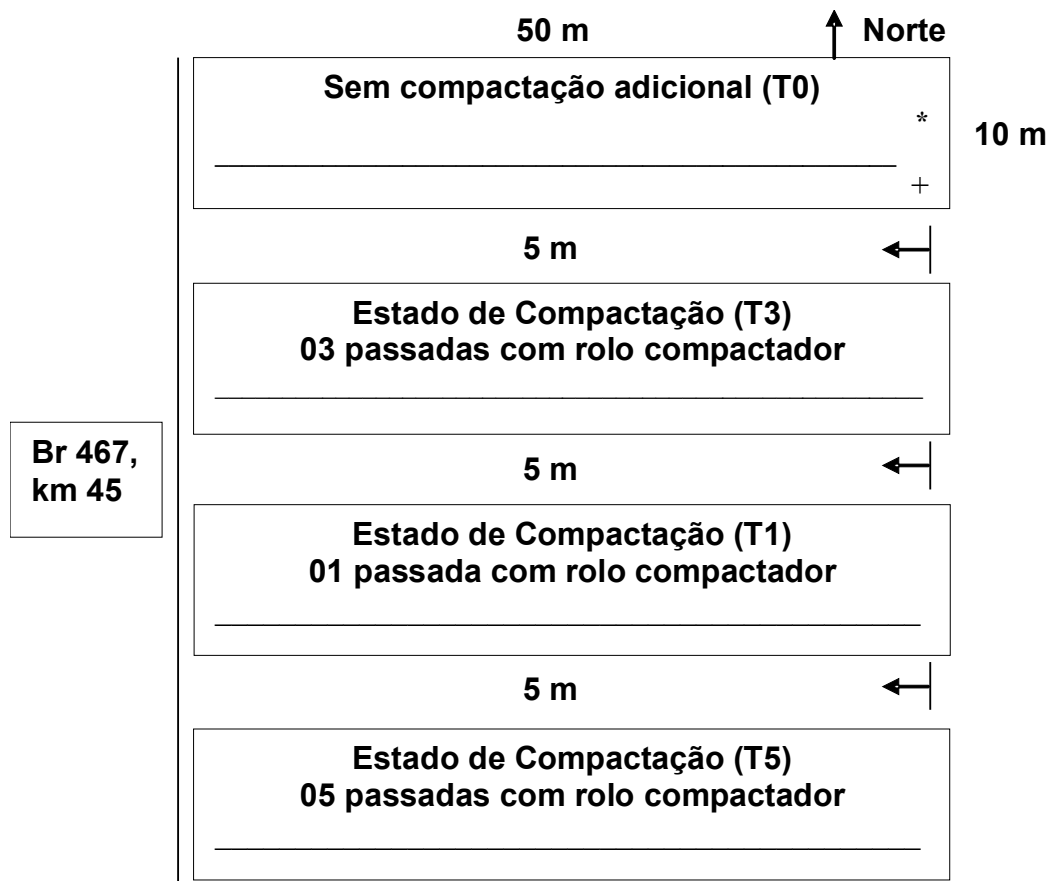


Figura 1 - Croqui da área experimental e disposição dos tratamentos.

NOTA: Implantados no verão: * soja; + milho.

A umidade gravimétrica no momento da passagem do rolo compactador foi: Tratamento T0 = 37%, Tratamento T1 = 37%. Tratamento T3 = 36%, Tratamento T5= 38%.

.4.2 Ensaio de Proctor

Em laboratório, os testes de compactação foram realizados pelo ensaio de Proctor, conforme preconizado pela NRB 7182 (ABNT, 1996). Para a obtenção da curva de compactação do solo, foram compactados 5 corpos de prova, em umidades crescentes. A compactação dos corpos foi realizada em três camadas, as quais receberam 25 golpes com soquete de 2,5 Kg, que se deixa cair livremente de uma altura prefixada (30,5 cm). O molde é um cilindro

de, aproximadamente, 1000 cm³. Para a determinação da umidade gravimétrica do solo foram coletadas 3 pequenas porções de solo para cada corpo de prova.

A partir dos pontos experimentais obtidos no ensaio de umidade (%) e da densidade do solo (Mg m⁻³), obtém-se, por meio do *Software Microsoft Excel*, um gráfico com a curva de compactação máxima daquele solo.

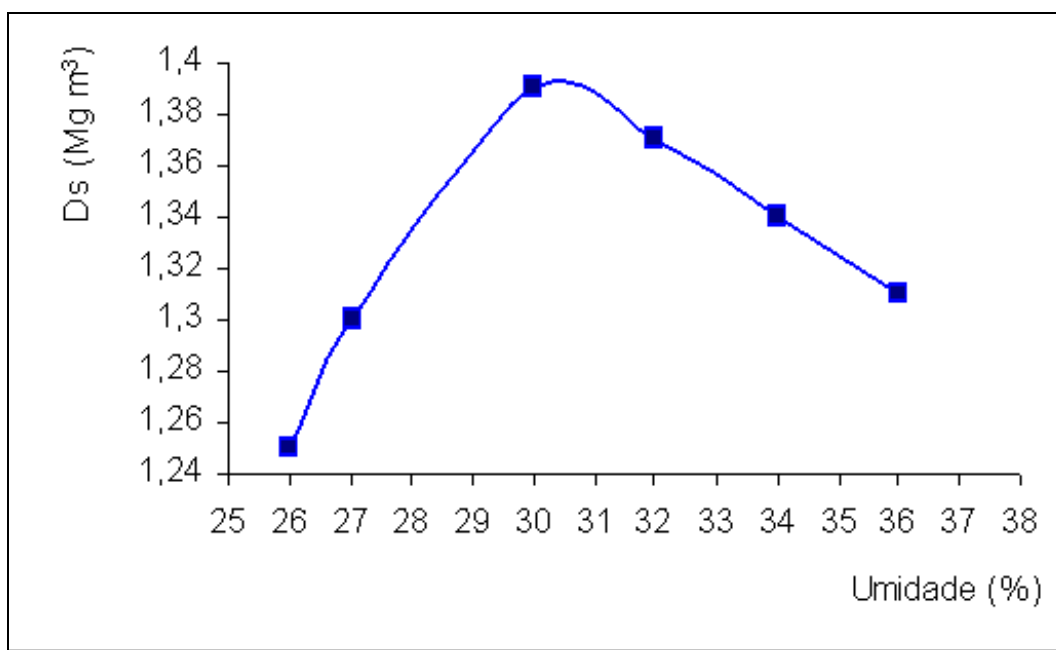


Figura 2 - Curva de compactação do solo em um Latossolo Vermelho distroférico.

.4.3 Determinação da Densidade e do Espaço Poroso do Solo

Em cada tratamento foram coletadas amostras de solo indeformadas, em cinco pontos aleatórios entre as profundidades de: 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m, com duas repetições em cada profundidade, totalizando 30 amostras por tratamento.

Antes do início da primeira fase experimental, foram coletas amostras de solo para a caracterização dos atributos físicos. Logo após essa coleta, o experimento teve início com a implantação dos tratamentos com os níveis de

compactação. Realizou-se a segunda coleta de amostras de solo, com um total de 120 amostras de solo para caracterização dos tratamentos e conseqüente comparação e análise com os dados obtidos da primeira coleta. Na segunda fase experimental, iniciada pós-colheita do trigo, também foram coletadas amostras de solo e, por fim, ocorreu à última coleta dados pós-colheita da soja e milho para posterior análise dos atributos físicos do solo. As amostras foram transferidas ao laboratório da Engenharia Agrícola da UNIOESTE, onde foram avaliados os atributos físicos do solo seguindo a metodologia da EMBRAPA (1997).

A densidade do solo foi avaliada pela coleta de amostras de solo indeformadas pelo método do anel volumétrico na profundidade desejada. O espaço poroso do solo (porosidade total, macroporosidade e microporosidade) foi determinado em cada fase e profundidade para avaliar o impacto dos estados de compactação. A microporosidade foi determinada como sendo o conteúdo volumétrico de água equilibrada na mesa de tensão a 60 cm de coluna d'água. A porosidade total foi calculada pela equação $P_t = 1 - D_s/D_p$, em que: P_t = porosidade total em $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$, D_s = densidade do solo em Mg m^{-3} , D_p = densidade de partículas Mg m^{-3} ; a macroporosidade foi calculada por diferença da porosidade total e da microporosidade.

.4.4 Caracterização Físico-química da Área Experimental

Para determinar a granulometria, densidade de partículas e a análise dos parâmetros químicos foi coletada amostra deformada de solo. Para a densidade de partículas (D_p) foi utilizado o método do balão volumétrico com álcool; na análise granulométrica, utilizou-se o método do densímetro de Boyocus (AG) e na umidade gravimétrica (U_g) o método da estufa a 105°C (EMBRAPA, 1999).

Os resultados das análises físicas do solo são apresentados na Tabela 3, na qual se verifica que o solo da área experimental segundo essa classificação é considerado muito argiloso, pois o conteúdo de argila é de 60%.

Tabela 3 - Caracterização física do solo na área experimental

SOLO	GRANULOMETRIA (%)			
	Dp (Mg m ⁻³)	Areia	Silte	Argila
LVE	2,769	8	32	60

NOTA: Dp= densidade de partículas; LVE= Latossolo Vermelho- Escuro.

A análise química foi realizada antes da implantação do experimento, com o intuito de realizar as correções no solo de calcário, macro e micronutrientes de maneira correta. Na Tabela 4 são apresentados os parâmetros químicos da área experimental. Segundo essa análise química, a fertilização foi baseada na análise de solo realizada antes da implantação experimental.

Tabela 4 - Parâmetros químicos na área experimental

PARÂMETROS	RESULTADOS
pH (H ₂ O)	4,9
C (g dm ⁻³)	22,48
P (mg dm ⁻³)	6,85
Al* (%)	1,52
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,13
H + Al (cmol _c dm ⁻³)	5,77
K (cmol _c dm ⁻³)	0,45
Ca (cmol _c dm ⁻³)	4,33
Mg (cmol _c dm ⁻³)	2,94
S* (%)	7,73
T* (%)	13,44
V* (%)	57,41

NOTA: S = Soma de bases; T= Capacidade de troca de cátions; V= Saturação por bases; Al = Saturação por alumínio.

.4.5 Caracterização dos Atributos Físicos do Solo Antes da Implantação do Experimento.

A caracterização inicial da área experimental foi realizada para que fossem estabelecidas e determinadas as condições estruturais do solo nos quatros unidades experimentais nas quais foram implantados os tratamentos com compactação adicional (Tabela 5).

Tabela 5 - Caracterização dos atributos físicos em cada unidade experimental, antes da aplicação dos tratamentos, nas profundidades de 00-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m

TRATAMENTOS	PROFUNDIDADE - 00-0,1 m			
	Densidade do solo (Mg m ⁻³)	Macroporos (dm ³ dm ⁻³)	Microporos (dm ³ dm ⁻³)	Porosidade total (dm ³ dm ⁻³)
T0	1,22	0,11	0,44	0,55
T1	1,20	0,10	0,47	0,56
T3	1,25	0,10	0,44	0,54
T5	1,21	0,11	0,49	0,56
Média	1,22	0,10	0,46	0,55
PROFUNDIDADE -0,1-0,2 m				
T0	1,23	0,11	0,45	0,55
T1	1,18	0,10	0,47	0,57
T3	1,24	0,10	0,45	0,55
T5	1,22	0,09	0,47	0,55
Média	1,22	0,10	0,46	0,55
PROFUNDIDADE - 0,2-0,3 m				
T0	1,19	0,11	0,47	0,57
T1	1,18	0,10	0,48	0,58
T3	1,18	0,12	0,46	0,57
T5	1,19	0,10	0,48	0,58
Média	1,18	0,11	0,47	0,57

.4.6 Velocidade de Infiltração de Água no Solo

A infiltração de água no solo foi determinada pelo método dos anéis concêntricos, obtendo-se a velocidade de infiltração de água e a infiltração básica para cada estado de compactação. A velocidade de infiltração de água no solo foi determinada segundo metodologia de BERNARDO (1995), pelo do infiltrômetro de anel duplo. As leituras foram realizadas nos tempos de 1, 3, 5, 10, 15, 20 e 25 minutos e, assim, sucessivamente, de 5 em 5 minutos até atingir 3 leituras consecutivas com valores semelhantes de infiltração de água. Após a coleta e análise dos dados, foi realizado o ajuste dos pontos práticos que descreve o processo de infiltração pela equação empírica que mais se adapta aos dados experimentais. O modelo linear foi o que melhor se

ajustou. A velocidade de infiltração de água de solo foi mensurada somente após o estabelecimento dos tratamentos com compactação adicional.

.4.7 Semeadura do Trigo

A semeadura do trigo foi realizada após a coleta de amostras de solo e da determinação da taxa de infiltração de água no solo, com uma multi-semeadora-adubadora, marca Vence-Tudo, modelo SMT 6414, configurada para semear em fluxo contínuo com 14 linhas espaçadas em 0,17 m entre si, com profundidade de semeadura de 3 a 4 cm e mecanismo sulcador duplo disco defasado.

Utilizou-se a cultivar COODETEC 102 (CD 102), com taxa de germinação de 91% e pureza de 99,7%. Foram semeados 150 kg ha⁻¹ de sementes de trigo e, para a adubação, foi utilizada a fórmula 5-20-20 na dose de 150 kg ha⁻¹. As demais práticas de manejo seguiram as recomendações próprias para a cultura.

.4.8 Emergência, População Inicial, População Final e Estatura Final do Trigo

O número de plantas emergidas foi avaliado 15 dias após semeadura. Foram mensurados 10 pontos aleatórios em cada unidade experimental, utilizando uma régua de madeira de um metro. A régua foi colocada, em cada ponto, na linha de semeadura, e foi contado o número de plântulas emersas ao longo de um metro.

Durante três semanas foi avaliado o número de plantas por metro para verificar se houve atraso na emergência ou morte das plântulas. Considerou-se, portanto, como população inicial o número de plantas por metro, obtido após as três semanas de observação, isto é, aproximadamente 45 dias após a emergência.

A população final de plantas foi avaliada na época de colheita do trigo, utilizando-se a régua de um metro e seguindo a mesma metodologia utilizada nas avaliações anteriores. A estatura final de 10 plantas de trigo por metro foi mensurada com uma régua em cinco pontos aleatórios, no momento da colheita do trigo.

.4.9 Colheita e Rendimento de Grãos de Trigo

Para a colheita do trigo foram delimitadas, com uma trena, 8 linhas centrais em cada tratamento com 3 m, formando uma área útil de 4,08 m² e ainda 5 repetições em cada tratamento. Depois de colhido manualmente, o trigo foi armazenado em sacos de papel, para posterior trilhagem e também para a retirada de impurezas. Essas amostras foram pesadas em balança eletrônica e determinado o peso hectolítrico (Kg hl⁻¹) de cada uma. Os resultados do rendimento de grãos foram expressos em Mg ha⁻¹, com umidade corrigida para 13 %, quando necessário, pelo fator de correção da umidade, de acordo com a equação 1.

$$F_c = \frac{U_i - U_f * 100}{U_f} \quad (1)$$

Em que:

F_c = fator de correção;

U_i = umidade inicial;

U_f = umidade final.

5 SEGUNDA FASE EXPERIMENTAL

.5.1 Coleta de Dados para a Determinação dos Atributos Físicos do Solo

Nesta fase, também foi realizada coleta de amostras de solo para a análise dos atributos físicos do solo nas profundidades já mencionadas, com o intuito de conhecer o impacto do cultivo do trigo sobre os atributos físicos do solo.

.5.2 Determinação da Resistência do Solo à Penetração (R_p)

A resistência do solo à penetração foi determinada na profundidade de 00-0,40 m, com o uso do penetrômetro eletrônico desenvolvido por TIEPPO (2004). O índice de cone foi obtido conforme norma da ASAE S313.3 (1999), utilizando cone de diâmetro de 12,83 mm e ângulo de 30°. Foram realizadas 10 repetições por tratamento. Para a determinação da umidade gravimétrica foram coletadas amostras de solo deformadas nas mesmas profundidades. A resistência do solo à penetração foi determinada na pós-colheita do trigo, milho e soja.

.5.3 Semeadura da Soja e Milho

A semeadura das culturas de soja e milho foi realizada após a colheita do trigo e conseqüente coleta de dados para a análise física do solo. Foi utilizada a mesma multi-semeadora-adubadora utilizada na cultura do trigo, configurada para semear soja e milho. Para a cultura da soja a semeadora foi configurada com cinco linhas, com espaçamento entre linhas de 0,45 m e

profundidade de semeadura de 10 cm. Para a cultura do milho, foi adotada a configuração de três linhas na semeadora, com espaçamento entre linhas de 0,9 m e profundidade de semeadura de 10 cm. O mecanismo dosador de adubo foi o tipo facão e para a deposição das sementes duplo disco defasado.

A cultivar de soja utilizada foi a COODETEC 216 (CD 216). Foram semeadas 20 sementes por metro. Para a adubação foi utilizada a fórmula 0-20-20 na dose de 500 kg ha⁻¹. Para o milho foi utilizado a cultivar COODETEC 206 (CD 206) precoce, sendo semeadas 6 sementes por metro com 300 kg ha⁻¹ da formulação 5 -20-20.

.5.4 Números de Plantas Emergidas, População Inicial, População Final e Estatura Final da Cultura de Soja e Milho

O número de plantas de soja e milho emersas foi avaliado 18 dias após semeadura, sendo mensurados dez pontos aleatórios em cada parcela pelo mesmo método adotado na cultura do trigo; considerando como a população inicial o número de plantas por metro obtido 18 dias após semeadura.

A população final de plantas foi avaliada na época de colheita do milho e da soja, utilizando a régua graduada e seguindo a mesma metodologia utilizada nas avaliações anteriores. Além disso, foi mensurada a estatura final de 10 plantas de soja e de milho em cada tratamento em cinco pontos aleatórios.

.5.5 Colheita e Rendimento de Grãos de Soja

Para a colheita da soja foram delimitadas 5 linhas de 3 m na parte central de cada unidade experimental, tendo, dessa forma, uma área útil de 6,15 m² e 5 repetições por tratamento. A soja foi colhida manualmente e armazenada em sacos, depois foram trilhadas mecanicamente, retiradas as impurezas e pesadas em balança eletrônica com duas casas decimais. A umidade dos grãos foi mensurada pelo método da estufa a 105 °C. Os

resultados de produção de grãos foram expressos em Mg ha^{-1} , com umidade corrigida para 13 %, quando necessário, pelo fator de correção de umidade.

.5.6 Colheita e Rendimento de Grãos de Milho

Para a colheita do milho foram delimitadas 3 linhas de 5 m na parte central de cada unidade experimental, obtendo-se dessa maneira uma área útil de $14,25 \text{ m}^2$. O milho foi colhido, trilhado, pesado em balança eletrônica e determinada a porcentagem de impureza em cada amostra. A umidade dos grãos de milho foi mensurada por meio de um determinador de umidade universal Vicar, modelo U.D.V. Os resultados da produção de grãos foram expressos em Mg ha^{-1} , com umidade corrigida para 13 %, quando necessário, pelo fator de correção de umidade.

6 ANÁLISE DOS DADOS

Após a verificação da homogeneidade das amostras foi realizado o teste de comparação de médias.

Para a primeira fase experimental foi utilizado o teste *t-Student* para a análise dos valores médios de densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, porosidade total, taxa de infiltração de água no solo e para os parâmetros analisados no desenvolvimento vegetativo. Para a segunda fase experimental, a análise dos dados antes da semeadura da soja e milho e da resistência do solo à penetração também foi realizada pelo teste *t-Student* para comparação das médias. Para os dados obtidos pós-colheita da soja e milho foi realizada análise da variância e as médias de tratamentos comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância para a densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, porosidade total, resistência do solo à

penetração. Para o desenvolvimento vegetativo, utilizou-se o teste *t-Student* para comparação de médias.

A regressão dos dados de infiltração acumulada de água no solo em função do tempo acumulado; a densidade do solo em função da macroporosidade; a macroporosidade em função do número de passadas do rolo compactador; a densidade do solo em função do número de passadas do rolo compactador e a população inicial de plantas em função do número de passadas do rolo compactador foram realizadas com o *Software Microsoft Excel*. Foi aplicado o ajuste do modelo matemático que mais se adaptou aos resultados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1 PRIMEIRA FASE EXPERIMENTAL

.1.1 Atributos Físicos do Solo

Os valores médios de densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total são apresentados na Tabela 6.

Os valores de densidade de solo do tratamento T0 foram inferiores aos demais tratamentos e diferiram significativamente dos tratamentos T1, T3 e T5, em todas as profundidades avaliadas, evidenciando mudanças na estrutura do solo, provocadas pela pressão aplicada pelo rolo compactador, que influenciou, desse modo, no aumento da Ds. Observou-se ainda que os maiores valores médios de Ds foram encontrados na profundidade de 0,0-0,1 m para o tratamento T3 e na profundidade 0,1-0,2 m para o tratamento T5. No entanto, BEUTLER e CENTURION (2004a), em estudo com Latossolo Vermelho distrófico, relataram resultados nos quais verificaram que a camada 0,07-0,1 m possuía maior valor de densidade do solo em todos os tratamentos com número de passadas do trator.

Nos tratamentos T3 e T5 nas profundidades de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m observaram-se valores estatisticamente semelhantes. E, apesar de não haver diferença estatística, na profundidade de 0,0-0,1 m a Ds aumentou cerca de 11,38% e 9,75%, na profundidade de 0,1-0,2 m aumentou cerca de 8,9% e 13% e na profundidade de 0,2-0,3 m aumentou cerca de 6,73% e 6,73%, quando relacionados ao tratamento T0. Esse atributo é alterado pela

redução da macroporosidade, indicando que em áreas na quais ocorrem maior tráfego ou operações agrícolas com condições inadequadas de umidade do solo, há maior suscetibilidade para ocorrência de alterações na estrutura do solo. Nesse caso, isso pode ser explicado pela umidade do solo, pois, no momento da passagem do rolo compactador, o T3 estava com umidade gravimétrica de 36 % (Tabela 7).

Tabela 6 - Valores médios da densidade do solo (Mg m^{-3}), macroporosidade ($\text{dm}^3 \text{ dm}^{-3}$), microporosidade ($\text{dm}^3 \text{ dm}^{-3}$) e porosidade total ($\text{dm}^3 \text{ dm}^{-3}$), em função dos níveis de compactação em três profundidades

TRATAMENTOS	PROFUNDIDADE (m)			Média
	0,0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	
DENSIDADE DO SOLO				
T0	1,23 b*	1,23 c	1,19 b	1,21
T1	1,31 a	1,27 b	1,26 a	1,28
T3	1,37 a	1,34 a	1,27 a	1,32
T5	1,35 a	1,39 a	1,27 a	1,34
CV(%)	5,34	6,18	4,72	
MACROPOROSIDADE				
T0	0,11 a*	0,10 a	0,11 a	0,11
T1	0,04 b	0,04 b	0,08 b	0,05
T3	0,03 b	0,02 c	0,05 c	0,03
T5	0,03 b	0,02 c	0,03 c	0,02
CV(%)	45,42	41,1	42,91	
MICROPOROSIDADE				
T0	0,45 b*	0,45 b	0,47 b	0,46
T1	0,49 a	0,49 a	0,46 b	0,48
T3	0,47 ab	0,48 a	0,48 ab	0,49
T5	0,47 ab	0,48 a	0,51 a	0,49
CV(%)	4,34	5,43	7,53	
POROSIDADE TOTAL				
T0	0,55 a	0,55 a	0,57 a	0,56
T1	0,53 b	0,53 b	0,54 b	0,53
T3	0,50 c	0,50 c	0,53 b	0,51
T5	0,51 c	0,50 c	0,54 b	0,52
CV(%)	3,84	3,87	4,07	

NOTA: Médias de tratamentos seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste *t-Student* ($P>0,05$).

Essa umidade foi a que mais se aproximou do ponto máximo de compactação do solo. Nota-se ainda, que para esse Latossolo, de textura argilosa, foi obtido ponto máximo de compactação $1,39 \text{ Mg m}^{-3}$, com umidade

ótima próxima a 30% (Figura 2). DIAS JÚNIOR e MIRANDA (2000) observaram que independentemente da classe do solo, à medida que a umidade gravimétrica aumenta a densidade do solo aumenta também, até atingir um ponto máximo, em seguida a curva começa a declinar, seguindo a reta de saturação. Isso ocorre devido à baixa compressibilidade da água que atua como lubrificante entre os agregados no ramo úmido da curva. No ponto máximo, ou seja, no vértice da parábola é obtido o valor máximo de compactação e da umidade ótima.

Pode-se inferir ainda que a energia de compactação despendida no Ensaio de Proctor normal foi de cerca de $5,95 \text{ Kg cm}^{-2}$, ou seja, cerca de 600 KPa. Entretanto, no campo, com a passagem do rolo compactador, em média, a pressão aplicada nos tratamentos com compactação adicional no solo foi de 120 KPa, implicando que a energia aplicada no solo em laboratório, neste ensaio, foi maior do que a aplicada no campo. O que pode ter ocorrido em campo é uma propagação lateral das pressões, o que em laboratório não ocorre, pois o solo fica confinado no cilindro de 1000 cm^3 . Essas pressões laterais são muito elevadas no ensaio, forçando a deformação verticalmente. Além disso, observa-se que os valores de D_s encontrados em campo para os tratamentos T3 e T5 são semelhantes ao encontrado no ensaio de Proctor. Isso ocorreu devido à metodologia de coleta aplicada, pois o método do cilindro pode superestimar os valores de D_s .

DIAS JÚNIOR e MIRANDA (2000) relataram que o Latossolo Vermelho-Escuro distrófico, textura argilosa obteve grau máximo de compactação na densidade de $1,44 \text{ Mg m}^{-3}$, com umidade ótima de 26% e composição granulométrica de 570 g kg^{-1} de argila, 180 g kg^{-1} de silte e 250 g kg^{-1} de areia. WEIRICH NETO, ROSA e GOMES (2002), em ensaio de Proctor em Latossolo, observaram que os valores de conteúdo de água em que ocorreu máxima densidade aparente variaram de 0,273 a 0,286 g g^{-1} , enquanto que os valores de densidade aparente foram de 1,276 a $1,355 \text{ kg dm}^{-3}$.

Nota-se também que para a D_s na profundidade 0,1-0,2 m, o tratamento T1 possui menor valor e diferiu dos tratamentos T3 e T5. Isso ocorreu devido ao menor número de passadas do rolo compactador e pela pressão aplicada ao solo, o que ocorre, principalmente, na camada superficial do solo. Na profundidade de 0,2-0,3 m os tratamentos T1, T3 e T5 não diferem entre si (Tabela 6).

A D_s está diretamente relacionada ao volume de macroporos, pois quando o solo sofre pressão externa tende a se deformar. Até certa pressão aplicada sobre o solo ele tem a capacidade de retornar à forma original (elasticidade). Essa elasticidade depende da quantidade de matéria orgânica presente e também do tipo da textura do solo. Quando a deformação ocorre, afeta principalmente os poros responsáveis pela aeração do solo, que são os poros grandes, isso leva a um aumento da D_s .

Em pesquisa realizada em campo, em Latossolo sob sistema plantio direto, MILANI (2005) encontrou valores de densidade do solo entre 1,01 e 1,31 Mg m^{-3} na profundidade de 0,0-0,1 m; na profundidade de 0,1-0,2 m os valores variaram de 1,04 e 1,35 Mg m^{-3} . Portanto, os valores de D_s não ultrapassaram a 1,45 Mg m^{-3} que, segundo REINERT, REICHERT e SILVA (2001) e SECCO (2003) não são indicativos da presença de camada compactada.

Com relação à macroporosidade, observa-se que o tratamento T0 obteve um volume superior de macro, diferindo dos tratamentos T1, T3 e T5, em todas as profundidades analisadas. Considerando somente os tratamentos com os níveis de compactação, verifica-se que na profundidade de 0,0-0,1 m os tratamentos não diferem entre si. Entretanto, na profundidade de 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m o T1 possui maior volume de macroporos do que T3 e T5 (Tabela 6).

Verifica-se ainda que, na profundidade de 0,0-0,1 m, o volume de macroporos foi reduzido cerca de 64,64%, 72,72% e 72,72%, nos respectivos tratamentos T1, T3 e T5. Para a profundidade de 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m, observa-se comportamento semelhante, pois o volume de macroporos reduzido foi maior ou igual a 50 %.

Possivelmente, essa diferença no volume da macroporosidade se deva aos diferentes valores de D_s encontrados nos tratamentos com compactação adicional. Nota-se que nos tratamentos que obtiveram os menores volumes de M_a , ocorreram os maiores valores de D_s , implicando que quando ocorre um excesso de carga ou operações agrícolas com umidade inadequada, pode ocorrer uma maior probabilidade de alteração da estrutura do solo que, aliada a fatores ambientais, como: clima, temperatura, umidade e precipitação, podem afetar o desenvolvimento e, conseqüentemente, o rendimento de grãos das culturas. Esses dados concordam parcialmente com resultados de SECCO et al. (2004) que, em Latossolo Vermelho distroférico, verificaram que, na camada de 0,0-0,5 e 0,5-0,1 m, ocorreram os maiores valores de

Ds ($>1,45 \text{ Mg m}^{-3}$) e os menores volumes de macroporos ($< 0,05 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$) nos tratamentos com maiores estados de compactação (três e cinco passadas). Quando os valores de macroporos for menor que 10% e Ds igual ou superior a $1,36 \text{ Mg m}^{-3}$, há indícios de que podem ocorrer limitações no crescimento radicular que, em conseqüência, podem afetar o rendimento de grãos da cultura. BEUTLER e CENTURION (2004a) verificaram que na profundidade de 0,07-0,1 m ocorreram os menores valores de macroporos.

Observa-se também que os menores valores de macroporos encontram-se na profundidade de 0,0 a 0,2 m, devido à passagem dos implementos e máquinas agrícolas. Esses resultados concordam, em parte, com ALVES e SUZUKI (2004) que observaram valores menores de macroporosidade na camada de 0,10 a 0,20 m. E, ainda, corroboram parcialmente os resultados de HORN e LEBERT (1994), mostrando que o tráfego de quatro passadas de uma carreta graneleira provocou decréscimo de até 50% da porosidade e permeabilidade na profundidade de 0,20-0,40 m.

Observa-se que o volume de microporos do tratamento T0 foi inferior e diferiu significativamente do tratamento T1, sendo que o maior volume de microporos foi encontrado em T1 na profundidade de 0,0-0,1 m. Na profundidade de 0,1-0,2 m, T0 diferiu dos tratamentos T1, T3 e T5 que foram reduzidos em cerca de 8,16, 6,25 e 6,25 %, respectivamente. No entanto, na profundidade de 0,2-0,3 m o tratamento T5 difere de T0 e T1, sendo que o maior valor de microporos é do tratamento T5. E, ainda, o tratamento T5 possui volume de microporos 8,51% maior que o tratamento T0 (Tabela 6). STONE et al. (2002) e BEUTLER e CENTURION (2004a) também verificaram que a microporosidade não foi afetada significativamente pelo aumento da densidade do solo, apesar da tendência de aumento com esse incremento.

Na Tabela 6 são apresentados os valores médios da porosidade total e verifica-se que o tratamento T0 mostrou maior valor de porosidade, diferindo estatisticamente dos demais tratamentos em todas as profundidades. Isso pode ser explicado pelo maior volume de macroporos nesse tratamento e também por não ter efeito da compactação adicional. No entanto, na profundidade de 0,0-0,1 e 0,1-0,2 m, observa-se que a porosidade total do T1 é superior e difere do tratamento T5. Enquanto que, na profundidade de 0,2-0,3 m, os tratamentos T1, T3 e T5 possuem valores estatisticamente semelhantes.

De uma maneira geral, observa-se que a estrutura do solo foi modificada negativamente com o incremento dos estados de compactação, embora na grande maioria dos atributos analisados, ocorreram somente diferenças estatísticas entre a testemunha (T0) e os tratamentos com compactação induzida (T1, T3 e T5). Com base nesses dados pode-se inferir que o aumento das cargas cíclicas aplicadas no solo gera um decréscimo do volume de macroporos e o conseqüente aumento da Ds. Esses resultados concordam com STONE, GUIMARÃES e MOREIRA (2002). Nota-se também que o tratamento T3 e T5 são semelhantes em relação ao volume de macroporos e valores médios de Ds, demonstrando que, nesses tratamentos, a pressão aplicada se equiparou, ou ainda, que a umidade do solo tenha influenciado no momento do estabelecimento dos tratamentos, pois no tratamento T3 ocorreu porcentagem de umidade mais próxima do ponto máximo de compactação do solo, ou seja, após três passadas com o rolo compactador o solo atingiu sua compactação máxima, sendo assim as duas passadas a mais do tratamento T5 não contribuíram de forma significativa para o aumento do estado de compactação.

A Tabela 7 apresenta os dados de umidade no momento da passagem do rolo compactador. O tratamento que tem maior conteúdo de água no momento da aplicação dos estados de compactação são o T5 e T1, entretanto não diferiram estatisticamente.

Tabela 7 - Umidade gravimétrica do solo no momento da compactação do solo nas unidades experimentais

TRATAMENTOS	UMIDADE (%)
T0	38 a
T1	37 ab
T3	36 b
T5	37 ab
CV (%)	3,45%

NOTA: Médias de tratamentos seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste *t-Student* ($P > 0,05$).

Ao analisar os dados de grau máximo de compactação, em relação à umidade do solo, no momento da implantação dos tratamentos, nota-se que em T3 pode ter ocorrido maior compactação do solo, pois esse foi o tratamento que obteve porcentagem de umidade mais próxima ao estado máximo de compactação, em torno de 30%. Isso pode explicar os valores estatisticamente semelhantes de Ds e macroporos entre os tratamentos T3 e T5 nos atributos físicos analisados (Figura 2).

O conteúdo de água no solo é um fator que deve ser considerado sempre, pois é na água disponibilizada no solo que ocorrem as reações químicas, proliferação de macro e microorganismos, processos de germinação, emergência e desenvolvimento das plantas. Outro fator que pode aumentar a retenção de água no solo é a adição de matéria orgânica, geralmente adicionada no solo ao final de cada safra, diminuindo os valores de Ds. Esse efeito pode ser maximizado se o agricultor implantar rotação de culturas, pois o tipo de cultura implantada pode contribuir, com seu sistema radicular, para a descompactação do solo. Segundo CAMARGO e ALLEONI (1997), o conteúdo de água do solo é considerado um dos fatores mais importantes para a qualidade do manejo agrícola e influencia nos atributos físicos do solo e em alguns processos químicos, bioquímicos e biológicos do solo.

2 RELAÇÃO ENTRE PRESSÃO APLICADA PELO ROLO COMPACTADOR, DENSIDADE DO SOLO E MACROPOROSIDADE

Verifica-se que os valores médios de macroporos dos tratamentos com compactação adicional foram inferiores a 10%. Na Figura 3 observa-se que a função linear explica 75% dos resultados médios de macroporos, em relação ao ao fator densidade do solo na camada superficial e o restante, 25% dos valores de macroporos, é resultado de fatores aleatórios não amostrados. Verifica-se também que, quando os valores de Ds foram superiores a $1,21 \text{ Mg m}^{-3}$, os valores de macroporos são inferiores a 10%, condição que pode limitar

o crescimento e desenvolvimento das culturas. Esses resultados concordam com estudos de SECCO et al. (2004), que demonstram uma relação inversa entre a D_s e os macroporos, pois quando a D_s do solo atingiu valores acima de $1,36 \text{ Mg m}^{-3}$, os macroporos foram inferiores a 10%.

Esses resultados são corroborados, parcialmente, pelos resultados de CORSINI e FERRAUDO (1999) que verificaram em Latossolo Roxo, de textura argilosa, uma equação de $D_s = 1,703 - 2,846S$, $R^2 = 0,97$, para a camada superficial. Isso pode ter ocorrido devido ao sistema plantio direto ter revolvimento do solo somente na linha de semeadura e, com o passar do tempo, ocorrer acúmulo das pressões nas camadas superficiais.

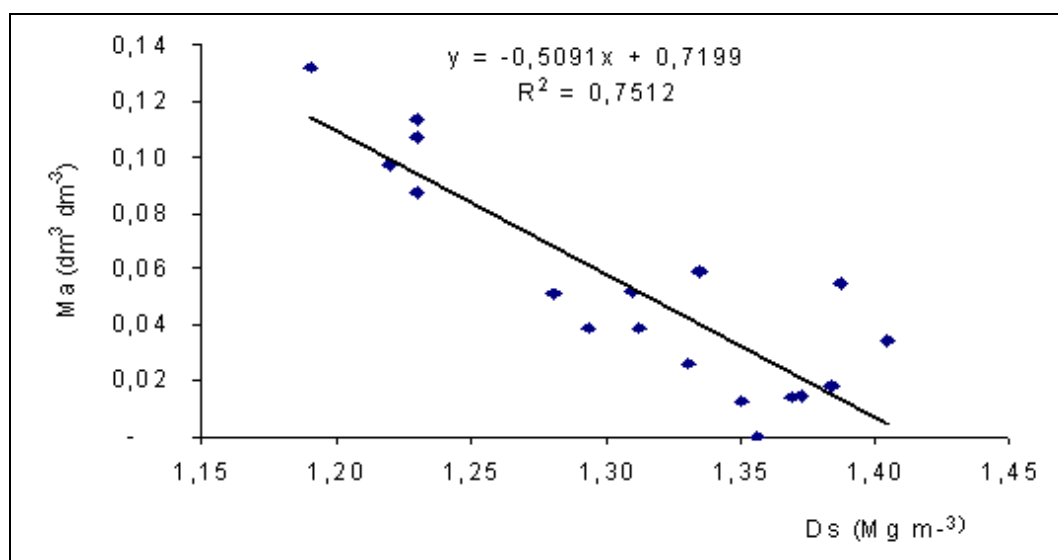


Figura 3 -Relação entre a macroporosidade e a densidade do solo na camada superficial (0,0-0,1 m), em um Latossolo Vermelho-Escuro.

Na Figura 4, observa-se que os valores de D_s aumentam gradualmente com o número de passadas, sendo mais acentuada no início e com tendência a suavizar após a aplicação de um certo nível de carga. A equação polinomial explica 52% dos resultados e o restante (48%) são explicados por fatores aleatórios.

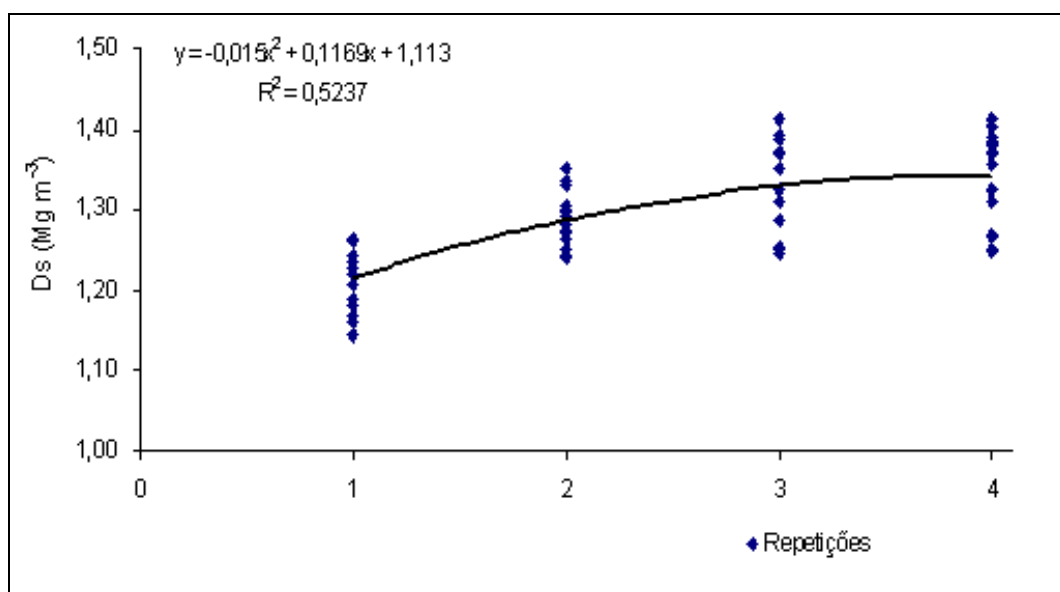


Figura 4- Relação entre a densidade do solo e o número de passadas do rolo compactador

NOTA: 1 = sem compactação; 2 = uma passada; 3 = três passadas; 4 = cinco passadas.

Entretanto, com relação a macroporosidade, a Figura 5 apresenta os resultados da regressão, onde o volume de macroporos diminui com o aumento do número de passadas do rolo. Observa-se que a equação polinomial, explica 73% deste fenômeno, sendo que o restante, 27% dos resultados, são explicados devido a fatores aleatórios não amostrados.

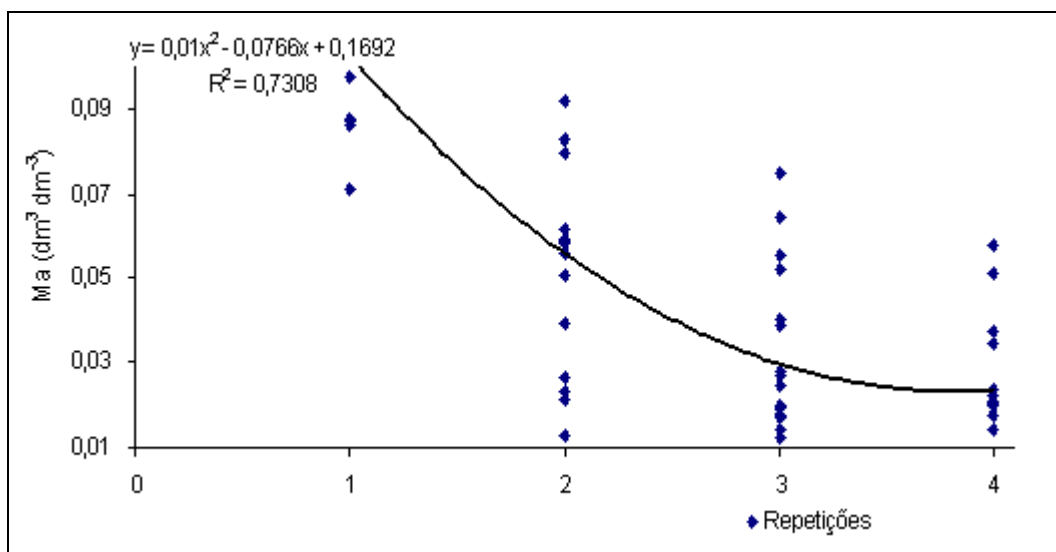


Figura 5 - Relação entre a macroporosidade e o número de passadas do rolo compactador.

NOTA: 1 = sem compactação; 2 = uma passada; 3 = três passadas; 4 = cinco passadas.

BORGES et al. (1999), estudando um Latossolo Vermelho-escuro álico, revelaram que a aplicação de níveis de compactação proporciona redução linear da macroporosidade, com equação de $Y = 0,95 - 0,47X$, com $R^2 = 0,99$ e SECCO et al. (2004) revelaram $R^2 = 0,81$.

3 INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

Com relação à velocidade de infiltração de água no solo, pode-se observar que o tratamento T5 diferiu dos tratamentos T3, T1 e T0, pois teve redução de 95,65% na velocidade de infiltração e os tratamentos T1 e T0 apresentaram velocidades de infiltração estatisticamente semelhantes. Observa-se ainda que a diferença entre o tratamento T0 e T1 é grande, o que pode ser explicado pelo alto valor do coeficiente de variação, o qual indicou alta

variabilidade dos dados (Tabela 8). Observa-se que essa redução do volume de macroporos atingiu diretamente a infiltração de água. SHARMA e LUXMOORE (1979) indicaram que solos de aparência homogênea também apresentam considerável variabilidade no espaço e nos atributos físicos.

A infiltração de água em Latossolos, em condições normais, é geralmente elevada. Entretanto, a infiltração pode ser reduzida quando ocorrem camadas compactadas, devido à redução da macroporosidade, responsável pela condutividade da água no solo.

Tabela 8 - Velocidade de infiltração de água no solo em estados de compactação do solo

TRATAMENTOS	VELOCIDADE DE INFILTRAÇÃO DE ÁGUA (mm h ⁻¹)
T0	279,20 a*
T1	377,00 a
T3	111,40 b
T5	12,12 c
CV (%)	83

NOTA: Médias de tratamentos seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste *t-Student* ($P > 0,05$).

O maior valor de taxa de infiltração foi encontrado no tratamento T1, seguido de T0, isso pode ter ocorrido devido ao maior volume de macroporos (Tabela 6), indicando que o maior volume de macroporos, facilita a infiltração de água no solo, pois os macroporos são responsáveis pela entrada e distribuição da água. Outro fator importante é a continuidade dos poros, pois no sistema plantio direto essa continuidade é preservada, contribuindo também para uma maior velocidade de infiltração (SOUZA; ALVES, 2003).

MOURA FILHO e BUOL (1972) compararam efeitos de 15 anos de cultivos anuais em Latossolo Roxo e observaram que as taxas de infiltração diminuíram de 820 para 120 mm h⁻¹. Essa diminuição de infiltração estava relacionada com a redução do volume de macroporos. MILANI (2005), em estudo em mesmo Latossolo, encontrou valores de velocidade de infiltração mínima de 48 mm h⁻¹ para o sistema plantio direto, considerada lenta e valor máximo de 396 mm h⁻¹, valor considerado muito alto. E mais da metade dos dados referentes às velocidades de infiltração indicam velocidades consideradas lentas ou moderadamente lentas.

No sistema plantio direto, a menor taxa de infiltração de água no solo deve se ao menor volume de macroporos e o conseqüente aumento do volume de microporos, interferindo diretamente na porosidade total do solo. Quando houve incremento da Ds com as passadas do rolo compactador, ocorreu uma diminuição significativa do volume de macroporos, dificultando a velocidade de infiltração de água no solo. Esses resultados concordam com estudos de BERTOL et al (2004).

A Figura 6 mostra os modelos de regressão que mais se ajustaram aos resultados da infiltração média acumulada em função do tempo, sendo que a função linear foi a que mais se adaptou. Observa-se que o tratamento T0 apresenta $R^2 = 0,996$, em que praticamente 100% dos resultados podem ser descritos pela função. O tratamento T1 apresenta $R^2 = 0,98$, sendo que 98% dos valores são explicados pela equação.

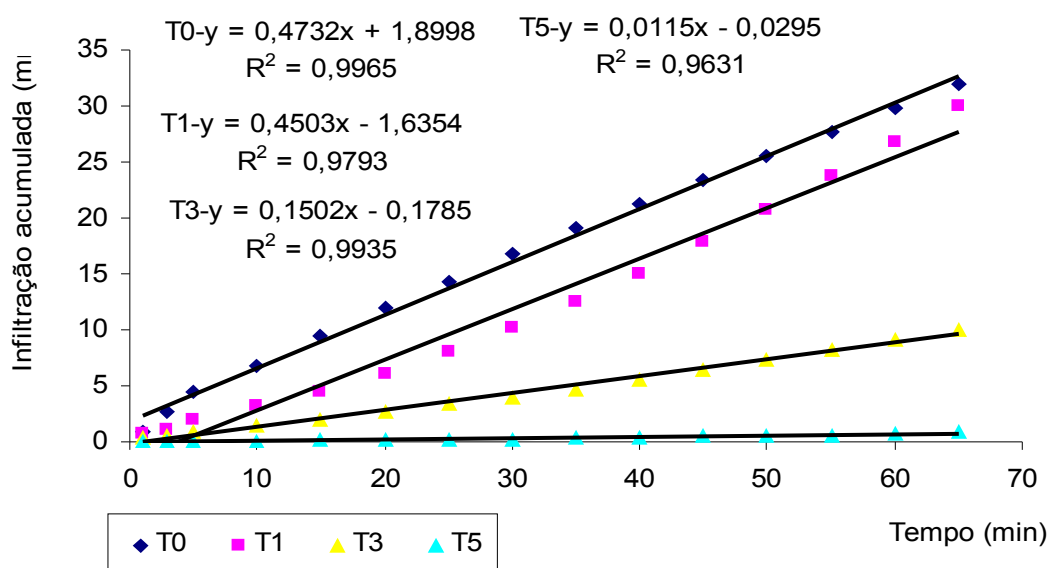


Figura 6 - Regressão linear da infiltração média acumulada (mm) *versus* tempo (min) nos tratamentos T0, T1, T3 e T5.

No tratamento T3, ocorre fenômeno semelhante ao tratamento T0, no qual 99% dos valores obtidos foram explicados pela função; o tratamento T5 também possui R^2 alto, em que 96% dos valores podem ser explicados pela função e os valores restantes devem-se a fatores aleatórios não amostrados. Isso ocorre porque a velocidade de infiltração é uma propriedade dependente de vários fatores, dentre os quais estão a macroporosidade, a presença de bioporos que são canais naturais construídos pela macrofauna do solo e que podem direta ou indiretamente estar influenciando a infiltração de água no solo. SOUZA e ALVES (2003) encontraram resultados semelhantes para os valores médios de infiltração acumulada em função do tempo.

4 DESENVOLVIMENTO VEGETATIVO DA CULTURA DO TRIGO

.4.1 Emergência e População Inicial de Plântulas de Trigo

Na Tabela 9 são apresentados os resultados da população inicial de plantas da cultura do trigo. Pode-se observar que houve decréscimo na população inicial de plantas nos tratamentos com compactação. O tratamento T0 diferiu significativamente dos tratamentos T1, T3 e T5, com redução populacional de cerca de 8,59%, 29,59% e 37,86%, respectivamente. Esse resultado pode ter ocorrido devido a alterações na estrutura do solo, como decréscimo do volume de macroporos e aumento da D_s . Essas mudanças podem ter influenciado diretamente o crescimento e o desenvolvimento da planta, principalmente se o volume de macroporos estiver abaixo de 10%. Foi constatado esse comportamento nos tratamentos T3 e T5 em todas as profundidades (Tabela 6). Quando a macroporosidade é alterada, pode dificultar a aeração do solo e da cultura.

Tabela 9 - População inicial de plantas (pl ha⁻¹) de trigo em quatro estados de compactação

TRATAMENTOS	PI ha ⁻¹
T0	3 941176 a*
T1	3 629411 b
T3	3 041176 c
T5	2 858823 c
CV (%)	17,22

NOTA: Médias de tratamentos seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste *t-Student* ($P>0,05$).

De acordo com a Figura 7, no tratamento T0 o número de plântulas emergidas por metro linear na 1ª coleta foi superior e diferiu estatisticamente do número de plantas dos tratamentos T3 e T5. Na 2ª coleta, observa-se comportamento semelhante ao da 1ª. No entanto, na 3ª coleta o tratamento T0 é superior e difere dos demais tratamentos, o que pode ter ocorrido devido a uma pequena mortalidade de plântulas no início do ciclo. Nota-se ainda que no tratamento T5 ocorreu um atraso na emergência das plantas na 1ª coleta, em relação às outras coletas, diferentemente dos outros tratamentos que a emergência decaiu e estabilizou no 28º dia após semeadura (DAS).

Observa-se que os tratamentos T3 e T5, em todas as amostragens, obtiveram menor emergência de plântulas, quando relacionados com os tratamentos T0 e T1. Essa diferença pode ter ocorrido devido a alterações dos atributos do solo de maneira diferenciada para cada tratamento com número de passadas diferenciadas. A compactação do solo altera o volume de macroporos e, conseqüentemente, aumenta a Ds, dificultando assim a emergência da plântula.

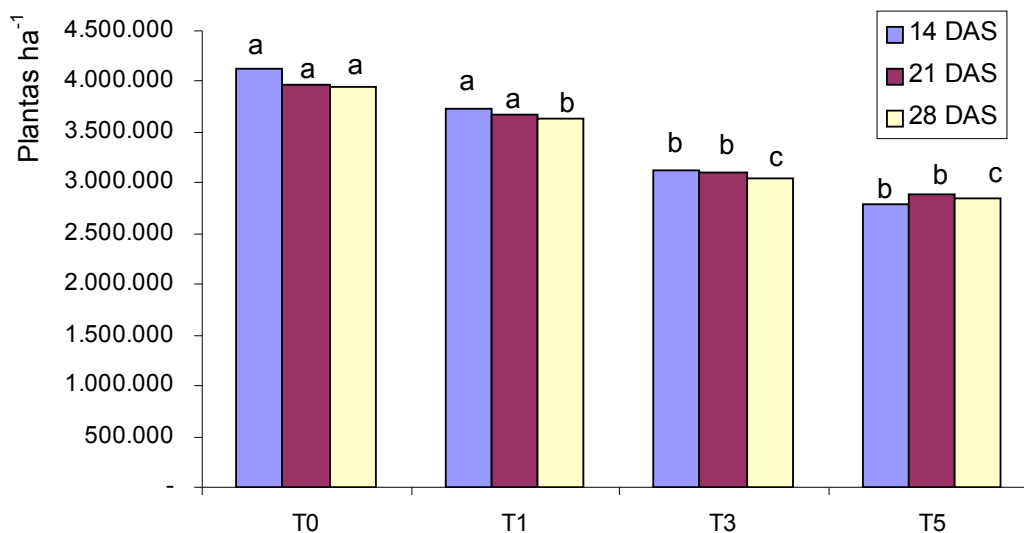


Figura 7 - Valores médios de plantas ha^{-1} nas três coletas e nos quatro estados de compactação.

ALVARENGA et al. (1996), estudando um Latossolo Vermelho-Amarelo, verificaram que na D_s de $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$, o volume de macroporos é reduzido de 0,31 para $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. STONE, GUIMARÃES e MOREIRA (2002), em Latossolo Vermelho perférrico, verificaram também um decréscimo dos macroporos abaixo de 10% e aumento da D_s no solo em estudo.

Na Figura 8, observa-se que o número de plantas emergidas por metro linear decresce linearmente com o aumento do número de passadas do rolo compactador.

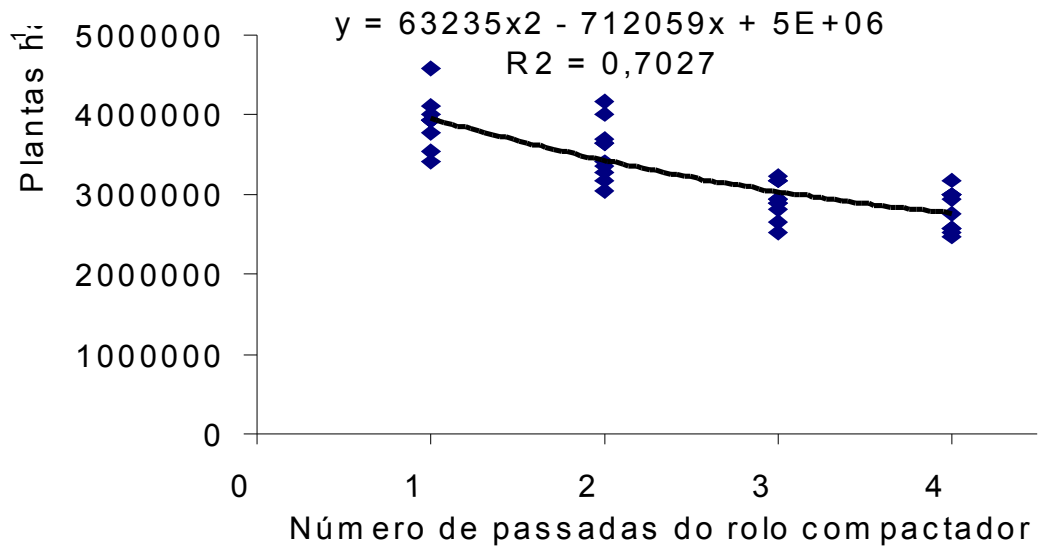


Figura 8 - Regressão polinomial do número de plantas emergidas nos quatro estados de compactação do solo.

NOTA: 1 = sem compactação; 2 = uma passada; 3 = três passadas; 4 = cinco passadas.

A equação da reta, $y = 1,075x^2 - 12,105x + 78,275$ e $R^2 = 0,7027$, explica 70% dos resultados e o restante (30%) pode ser explicado por fatores aleatórios não amostrados, como precipitação, temperatura, umidade e clima. ALVES et al. (2003) verificaram que, em Latossolo Vermelho distroférico, com o aumento do grau de compactação ocorre redução linear do número de plantas de feijoeiro. A equação que mais se adaptou a seus dados obteve coeficiente de correlação de 86% ($R^2 = 0,86$).

.4.2 População Final da Cultura do Trigo

De acordo com a Tabela 10, os tratamentos T0 e T1 obtiveram maior população final de plantas, pois diferiram estatisticamente dos tratamentos T3 e T5. Verifica-se ainda que os tratamentos T3 e T5 sofreram uma redução de 11,42% e 22,27%, respectivamente, na população final de plantas, em relação ao tratamento T0. Esses dados indicam que o processo de germinação e emergência pode ter sido afetado pelas mudanças que ocorreram na estrutura do solo ou, ainda, o crescimento pode ter sido afetada por fatores climáticos como: excesso de precipitação no período de germinação, o que pode ter ocasionado morte prematura da plântula, diminuindo a população de plantas principalmente no tratamento T5, devido à baixa infiltração de água no solo e conseqüentemente ocorre acúmulo de água na superfície do solo, fazendo com que as sementes apodreçam ou que as plântulas ainda não emersas morram por falta de aeração.

Tabela 10 - População final de plantas (pl ha⁻¹) de trigo em quatro estados de compactação do solo

TRATAMENTOS	Pl ha ⁻¹
T0	4 340000 a*
T1	4 705882 a
T3	3 895 294 b
T5	3 549411 b
CV (%)	17,56

NOTA: Médias de tratamentos seguidas de letras iguais na coluna, não diferem entre si pelo teste *t-Student* (P>0,05).

Esses dados estão corroborando os resultados de ALVES et al. (2003) que encontrou redução linear no estande inicial e final na cultura do feijoeiro com o incremento da Ds, indicando que o processo de germinação e emergência pode ter sido alterado pelas mudanças que ocorreram na estrutura do solo.

.4.3 Estatura Final da Cultura de Trigo

Os dados de estatura final da cultura do trigo estão apresentados na Tabela 11. Observa-se que a estatura final do trigo aumentou, entretanto, não foi crescente entre os tratamentos com número de passadas do rolo. Verifica-se que o T0 difere significativamente do T1 e T5, os quais aumentaram cerca de 9,68% e 8,04% e ainda esses tratamentos obtiveram valores de altura final maiores em relação à testemunha (T0). Entretanto, T1, T3 e T5, não diferem entre si, indicando que os estados de compactação que se encontrava o solo, afetaram de forma semelhante o crescimento da cultura de trigo.

O desenvolvimento das plantas pode ter sido afetado, principalmente, pelo período de estiagem que ocorreu nos meses de agosto e setembro na safra 2004, e nos locais onde foram estabelecidos tratamentos com compactação adicional (T1, T3 e T5) o desenvolvimento da plantas pode ter sido favorecido por essa estiagem, mascarando os resultados, pois nesses tratamentos há um aumento do volume de microporos, aumentando dessa forma a retenção de água no solo.

Tabela 11 -- Estatura final da cultura do trigo em quatro estados de compactação do solo

TRATAMENTOS	ESTATURA Final (cm)
T0	75,54 b*
T1	83,64 a
T3	77,24 ab
T5	82,14 a
CV (%)	6,23

NOTA: Médias de tratamentos seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste *t-Student* ($P>0,05$).

Como se pode ver no Apêndice A, o tratamento com maior nível de compactação (T5) possui o maior valor de estatura final do trigo em relação à testemunha (T0), entretanto, em contraste com esse resultado, nota-se que este mesmo tratamento possui menor número final de plantas por metro.

Observa-se ainda que T1 foi o tratamento que obteve melhor desenvolvimento das plantas entre todos os tratamentos, pois ele possui o maior número e estatura final de plantas. Esses resultados podem ser explicados pela melhoria no contato solo-semente que proporciona melhoria nas condições de germinação e emergência das plântulas de trigo.

Esses dados concordam com resultados de BEUTLER e CENTURION (2004b) que averiguaram que o maior valor de estatura de plantas de arroz, ocorreu nos valores de resistência do solo à penetração de 1,79 e 2,83 MPa em Latossolo Vermelho distroférico, indicando que esses valores de resistência à penetração não foram impeditivos para a planta, neste conteúdo de água (0,17 Kg Kg⁻¹). Esses autores relataram que no menor conteúdo de água (0,12 Kg Kg⁻¹) os valores de resistência à penetração interferiram na altura das plantas de arroz.

.4.4 Rendimento de Grãos da Cultura do Trigo

Na Tabela 12 são apresentados os dados de rendimento de grãos e o peso hectolítrico da cultura do trigo. Os resultados demonstram que o tratamento T0 possui o menor valor de rendimento de grãos, pois diferiu do tratamento T5. O tratamento T5 obteve resultados de rendimento 29% superiores ao tratamento sem compactação adicional e os tratamentos T1 e T3 cerca de 13% e 10%, em relação ao T0.

Tabela 12 - Rendimento de grãos (Mg ha⁻¹) e peso hectolítrico (Kg hl⁻¹) do trigo em quatro estados de compactação do solo

TRATAMENTO	PRODUTIVIDADE	PESO HECTOLÍTRICO
T0	1.641 b*	70,52 a
T1	1.862 ab	70,32 a
T3	1.808 ab	70,86 a
T5	2.122 a	70,01 a
CV (%)	7,83	2

NOTA: Médias de tratamentos seguidas de letra iguais na coluna, não diferem entre si significativamente pelo teste *t-Student* (P> 0,05).

Observa-se que o incremento da compactação não alterou negativamente o rendimento do trigo, apesar de terem ocorrido mudanças nos atributos físicos do solo, principalmente Ds e volume de macroporos. Assim, deduz-se que essas mudanças não foram suficientes para reduzir o rendimento de grãos com o aumento dos estados de compactação (Tabela 6).

A maior produção de grãos dos tratamentos T5, em relação ao T0 pode ser explicada pelos fatores: competição entre as plantas de trigo, disponibilidade de nutrientes, água e condições físicas do solo. Neste contexto, observa-se que pode ter ocorrido competição entre plantas por nutrientes e água em uma parcela com maior número de plantas, conseqüentemente, interferindo no desenvolvimento radicular e aéreo do trigo. Entretanto nas parcelas com menor número de plantas, há maior disponibilidade de água e nutrientes e apesar da estrutura do solo não ser favorável ao desenvolvimento da plantas, a elevada umidade contribui diretamente para esse resultado, pois quando a Ds aumenta, conseqüentemente, diminui o volume de macroporos e aumenta o volume de microporos, que é responsável pela retenção de água no solo.

O menor conteúdo de água no solo, possivelmente, causou deficiência de água e nutrientes para as plantas, resultando em menor crescimento da parte aérea das plantas. Nesse contexto, TARDIEU (1994) verificou que em solos compactados, ocorre rápida depleção de água nos poros ocupados pelas raízes, que aumenta a resistência lateral à penetração das raízes.

BEUTLER et al. (2004) relataram que a compactação do solo a partir do valor de Rp de 1,82 MPa e de Ds de 1,26 Mg m⁻³, reduziu a produtividade do arroz de sequeiro no Latossolo Vermelho de textura média. Esses resultados discordam dos resultados de SECCO (2003) que verificou, em estudo do rendimento do trigo na safra 1999/2000 e 2000/2001 de dois Latossolos, a ocorrência de decréscimo no rendimento de grãos quando a Ds foi maior que 1,40 Mg m⁻³. A estiagem nos períodos de agosto e setembro da safra de inverno/2004 também pode ter colaborado para esse resultado, pois nesse período estava ocorrendo o enchimento dos grãos, fase cultural que precisa de grande volume de chuvas. De acordo com a Tabela 2, a precipitação acumulada total registrada para o ciclo da cultura do trigo no período de cinco meses foi de 220,0 mm. Além disso, nesses meses ocorreu menor disponibilidade de água no solo. Entretanto, segundo MATZENAUER et al. (1998), a cultura do trigo necessita de, aproximadamente, 322 mm de precipitação pluvial para seu pleno desenvolvimento, isso deve ter interferido no desenvolvimento do trigo e ocasionado redução de rendimento de grãos.

Pode-se observar a análise do peso hectolítrico das sementes de trigo, a qual indica que a qualidade dos grãos não foi afetada pelas mudanças que

ocorreram nos atributos físicos do solo. O peso do hectolitro considera o peso dos grãos, quanto maior o peso melhor a qualidade. De acordo com NAKAGAWA et al. (2003), no sistema plantio direto, as sementes de trigo tiveram maior peso hectolítrico com relação ao preparo convencional, cerca de 78,9 Kg hl⁻¹.

De uma forma geral, os tratamentos com maior número de passadas do rolo compactador (T3 e T5) não tiveram alterado negativamente o rendimento dos grãos. Assim, para a cultura do trigo, pode-se inferir que o maior estado de compactação (T5) com valores de Ds menor ou igual a 1,35 Mg m⁻³, volume de Macro menor 10% e taxa de infiltração de 12,12 mm h⁻¹, em condições de campo, não comprometeu significativamente o rendimento de grãos da cultura do trigo, considerando-se que nos tratamentos T0 o rendimento de grãos foi inferior quando comparado com T5.

5 SEGUNDA FASE EXPERIMENTAL

.5.1 Atributos Físicos do Solo Pós-colheita do Trigo

Os valores médios de densidade do solo (Ds), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro) e porosidade total amostrados na segunda fase experimental são apresentados na Tabela 13.

Observa-se que nas profundidades de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m os valores médios de Ds entre os tratamentos não diferiram entre si. Nessa avaliação dos atributos, verifica-se que os menores valores de Ds foram encontrados na camada de 0,2-0,3 m e os maiores valores foram encontrados na camada de 0,0-0,2 m. Entretanto, apesar de não ocorrer diferença estatística, observa-se que principalmente nos tratamentos T3 e T5 os valores de Ds aumentam cerca de 1,57 e 2,34 %, em relação ao tratamento T0 na

profundidade de 0,0-0,1 m. Esses dados estão de acordo, parcialmente, com SECCO et al. (2004), que estudaram o comportamento da soja em um Latossolo e relataram que os maiores valores de densidade foram encontrados nos tratamentos com 3 e 5 passadas com rolo compactador na profundidade de 0,0-0,1m. Entretanto, esses valores não ultrapassam a $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$, sendo assim o solo não apresenta indícios de camadas compactadas (REINERT; REICHERT; SILVA, 2001).

Em relação ao volume de macroporos na profundidade de 0,0-0,1 e 0,1-0,2 m, há comportamento semelhante entre os tratamentos. Observa-se que o tratamento T0 diferiu do tratamento T1, pois o tratamento T1 é reduzido cerca de 37,5% e 30%, nas respectivas profundidades. Na profundidade de 0,2-0,3 o volume de macroporos não difere entre os tratamentos, apresentando volume de macroporos no limite, considerado como ideal ao crescimento radicular.

Um fator que influenciou o resultado foi o mecanismo sulcador da semeadora -adubadora, que revolve o solo na linha de semeadura, diminuindo o efeito da compactação. Com isso, o sistema radicular da soja e milho pode não ter sofrido restrições ao seu desenvolvimento na camada superficial, pois ocorreu crescimento radicular do trigo, formando canais, que junto com a ação simultânea dos microorganismos na sua decomposição, formaram poros mais estáveis (bioporos) no perfil do solo. Em consequência, há um aumento no volume de macroporos, que pode ter colaborado com a redução da D_s . Além disso, a adição contínua de matéria orgânica no solo pela adição da palha do trigo, pode ter contribuído também para diminuir a D_s (GENRO JÚNIOR, 2002, ABREU; REICHERT; REINERT, 2004).

Tabela 13 - Valores médios da densidade do solo (Mg m^{-3}), macroporosidade ($\text{dm}^3 \text{ dm}^{-3}$), microporosidade ($\text{dm}^3 \text{ dm}^{-3}$) e porosidade total ($\text{dm}^3 \text{ dm}^{-3}$), em função dos níveis de compactação, em três profundidades pós-colheita da cultura do trigo

TRATAMENTOS	PROFUNDIDADE (M)			
	0,0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	Média
DENSIDADE DO SOLO				
T0	1,25 a*	1,25 a	1,22 a	1,24
T1	1,26 a	1,25 a	1,18 a	1,23
T3	1,27 a	1,23 a	1,22 a	1,24
T5	1,28 a	1,23 a	1,20 a	1,24
CV(%)	3,67	4,11	5,63	
MACROPOROSIDADE				
T0	0,11 a*	0,13 a	0,10 a	0,11
T1	0,08 b	0,10 b	0,10 a	0,09
T3	0,09 ab	0,11 ab	0,09 a	0,09
T5	0,12 a	0,12 a	0,10 a	0,11
CV(%)	28,80	23,38	30,01	
MICROPOROSIDADE				
T0	0,43 b*	0,40 c	0,46 a	0,43
T1	0,46 a	0,46 a	0,46 a	0,46
T3	0,45 a	0,44 b	0,47 a	0,45
T5	0,44 ab	0,43 b	0,46 a	0,44
CV(%)	5,64	5,45	7,09	
POROSIDADE TOTAL				
T0	0,54 b*	0,53 b	0,56 a	0,54
T1	0,54 b	0,56 a	0,56 a	0,55
T3	0,54 b	0,55 a	0,57 a	0,55
T5	0,56 a	0,55 a	0,56 a	0,55
CV(%)	3,16	5,49	6,30	

NOTA: Médias de tratamentos seguidas de mesma letra na coluna, não diferem significativamente entre si pelo teste *t-Student* ($P>0,05$).

Nota-se que, na profundidade de 0,0-0,1, o volume de microporos do tratamento T0 diferiu dos tratamentos T1 e T3, e que o volume de microporos aumentou cerca de 6,52% e 4,44%, respectivamente. Na profundidade de 0,1-0,2 m, o tratamento T0 diferiu estatisticamente dos demais, com um aumento de microporos da ordem de 13,04%, 9,09% e 6,98% nos tratamentos T1, T3 e T5, visto que o maior valor de microporos foi encontrado no tratamento T1, para ambas as profundidades mencionadas acima. Na profundidade de 0,2-0,3 m os tratamentos não diferem entre si.

Com relação à porosidade total, observa-se que na profundidade de 0,0-0,1 m, o tratamento T0 diferiu somente do tratamento T5, sendo que houve um aumento na porosidade de 3,7%; entretanto, T0 não diferiu dos tratamentos T1 e T3. Na profundidade de 0,1-0,2, o tratamento T0 diferiu dos tratamentos T1, T3 e T5, visto que a porosidade total obteve um acréscimo de 5,36%, 3,57% e 3,57%, respectivamente, e na profundidade de 0,2-0,3 m os tratamentos não diferem entre si. SECCO et al. 2004, em estudos com estados de compactação verificaram que o volume de microporos e a porosidade total foram significativamente diferentes nos tratamentos com maior estado de compactação, quando relacionados com a testemunha na profundidade de 0,0-0,05 m.

Observa-se ainda que a densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total não diferiram entre os tratamentos com estados de compactação na profundidade de 0,2-0,3 m, indicando que esses atributos tiveram comportamentos semelhantes, pois a pressão do rolo compactador é superficial e o revolvimento do solo na linha de semeadura foi realizado até 10 cm.

Em geral, após a análise desses atributos, verificou-se que o solo não se configura como compactado, pois a D_s média não ultrapassou o valor de $1,24 \text{ Mg m}^{-3}$ e volume de macroporos com valor médio de 10%, evidenciando o efeito pronunciado do mecanismo sulcador da semeadura na redução da D_s do solo e aumento do volume de macroporos.

6 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO PÓS-COLHEITA DO TRIGO (RP)

De acordo com a Tabela 14, observa-se que o valor médio de R_p do tratamento T0 diferiu do tratamento T5 em todas as profundidades analisadas, sendo que no tratamento T0 é verificado o menor valor de R_p , possivelmente pelo não tráfego do rolo compactador e também pelo efeito do mecanismo

sulcador na linha de semeadura. Nota-se ainda que somente na profundidade de 0,1-0,2 m todos os tratamentos diferem entre si. Pode-se verificar que nessa camada, em geral, encontram-se os maiores valores de R_p , principalmente nos tratamentos T3 e T5, nos quais são observados valores de 2,02 e 2,50 MPa, respectivamente.

Tabela 14 - Resistência do solo à penetração (MPa) em quatro estados de compactação, na fase pós-colheita da cultura do trigo

TRATAMENTOS	PROFUNDIDADES (m)			Média
	0,0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,4	
T0	1,27 c	1,42 d	1,04 c	1,24
T1	1,37 bc	1,80 c	1,78 a	1,65
T3	1,61 b	2,02 b	1,73 a	1,78
T5	2,04 a	2,50 a	1,55 b	2,03
CV (%)	48,05	29,48	34,02	

NOTA: Médias de tratamentos seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste *t-Student* ($P>0,05$).

IMHOFF, SILVA e TORMENA (2002) e STONE, GUIMARÃES e MOREIRA (2002) relataram que a R_p é uma propriedade do solo adotada como indicativo da compactação do solo, por apresentar forte relação com o crescimento radicular das plantas e por ser muito eficiente na identificação de estados de compactação, quando comparada à D_s . Além disso, a R_p é influenciada pela textura, conteúdo de água e pela condição estrutural inicial do solo.

Na Figura 9, observa-se que os maiores valores R_p foram encontrados entre a profundidade de 0,05-0,2 m, nos tratamentos T3 e T5, e o ápice da R_p (2,50-3,00 MPa) ocorre entre as profundidades de 0,07-0,12 m. Portanto, houve aumento da R_p de acordo com o número de passadas do rolo compactador na camada de 0 a 20 cm de profundidade. O maior estado de compactação observado nos tratamentos se deve ao efeito acumulativo de pressões de máquinas ou implementos que o solo recebe em uma safra ou de uma safra para outra e ainda tem a acomodação natural das partículas mais finas pelo perfil do solo, que podem diretamente influenciar o aumento dos valores da R_p . Segundo autores como GENRO JÚNIOR (2002), SILVA (2003) e SECCO (2004), o confinamento dos valores mais altos de R_p em camadas

ao redor de 0,07 a 0,17 m de profundidade parece ser uma característica de solos sob sistema plantio direto, tanto de solos argilosos e arenosos.

No tratamento sem compactação adicional (T0), a R_p não ultrapassou a 1,50 MPa, entre as profundidades de 0,07-0,15 m. Já os valores do tratamento T1 não tiveram grande variação, ou seja, a partir da profundidade de 0,1-0,35 m a R_p foi uniforme (1,70 MPa).

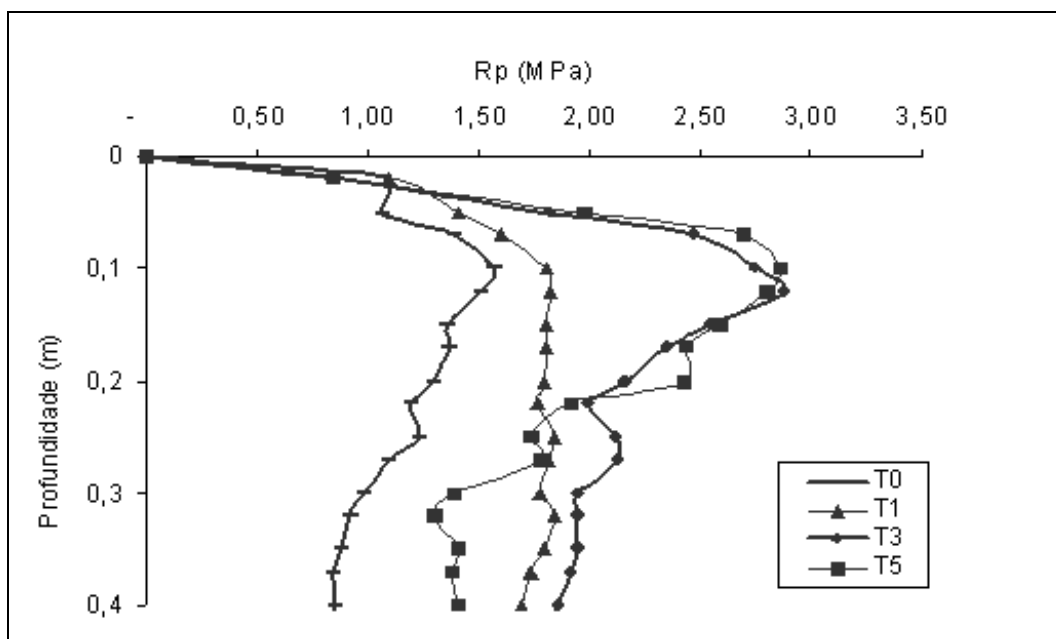


Figura 9 - Resistência do solo à penetração em Latossolo Vermelho-Escuro sob quatro estados de compactação.

NOTA : T0 ($U_g = 0,20 \text{ Kg Kg}^{-1}$); T1 ($U_g = 0,19 \text{ Kg Kg}^{-1}$); T3 ($U_g = 0,18 \text{ Kg Kg}^{-1}$); T5 ($U_g = 0,21 \text{ Kg Kg}^{-1}$).

Os valores médios de 1,50 e 1,70 MPa não são considerados pela literatura como limitantes ao crescimento radicular, entretanto, para valores acima de 2 MPa, podem ocorrer limitações ao sistema radicular das culturas. A R_p é dependente do conteúdo de água do solo, percebe-se então que, no momento da amostragem, o solo estava com baixa umidade e, por isso, demonstrou pontos de maior R_p .

CAMARGO e ALLEONI (1997) e ROSOLEN et al. (1999) verificaram a R_p em solos franco-argilosos a argilosos e consideram que, quando o valor é menor que 1,1 MPa não há limitação ao crescimento radicular, entretanto quando os valores de R_p estão entre 1,1 e 2,5 MPa, são considerados baixos e

acima destes valores podem afetar o crescimento das raízes. Os níveis críticos de R_p variam com o tipo de solo, umidade e com a espécie cultivada.

Convém analisar que a D_s dos tratamentos nas três profundidades, não foram elevadas, conforme Tabela 13, entretanto os valores de R_p , principalmente nos tratamentos T3 e T5, da profundidade de 0,1-0,2 m obtiveram valores considerados pela literatura como restritivos ao crescimento radicular.

Observa-se ainda que, depois de uma safra, os tratamentos com número de passadas do rolo compactador podem acarretar algum efeito acumulativo sobre a R_p , até a profundidade de 0,2 m. Observou-se também que ocorreu durante o período experimental, tráfego de máquinas e ou implementos na área, como por exemplo: semeadura, colheita, coleta dos dados, os quais podem ter influenciado os valores de R_p até essa profundidade. TAVARES FILHO et al. (2001), constataram que a redução de revolvimento afeta negativamente os valores de algumas variáveis que expressam a qualidade física do solo, pois as maiores diferenças estão concentradas nas camadas superficiais do solo, refletindo dessa maneira suas ações e interações na interface solo-planta-atmosfera.

PRADO et al. (2001) observaram em Latossolo Vermelho, classe textural argilosa (55% argila, 9% silte e 36% areia), que o aumento da compressão de 10 para 15 kgf levou a uma maior R_p , atingindo valores de 4,2 a 4,9 MPa para a cultura do milho, mesmo assim não afetou o desenvolvimento inicial do milho. Com relação à soja, BEUTLER e CENTURION (2003) revelaram que o valor crítico de R_p para a cultura da soja foi superior a 2,5 MPa para Latossolos com água retida na tensão de água de 0,01 MPa.

7 DESENVOLVIMENTO VEGETATIVO DAS CULTURAS DE SOJA E MILHO

.7.1 População Inicial de Plantas

Os resultados de população inicial de soja e milho são apresentados na Tabela 15. Observa-se que, para a cultura da soja, os tratamentos não diferem entre si quanto à população inicial de plantas, indicando que para soja não houve qualquer impedimento para a germinação e emergência. Entretanto, para a cultura do milho, o tratamento T0 diferiu do tratamento T5. Verifica-se que nos tratamentos T3 e T5 são encontrados os menores valores de população inicial de plantas e no tratamento T0 o maior valor. Nota-se também que, apesar dos tratamentos com compactação adicional da cultura do milho não serem estatisticamente diferentes, eles obtiveram uma redução de 12,92%, 25,08% e 16,64% nos tratamentos T1, T3 e T5, respectivamente. Para a soja, houve um aumento de 3,29 e 2,03 % na população inicial para os tratamentos T1 e T3.

Sabe-se que os atributos físicos do solo, principalmente a Ds e macroporosidade, não foram considerados limitantes ao desenvolvimento das culturas. Nesse contexto, pressupõe-se que esses atributos não interferiram no crescimento inicial da cultura de soja.

Tabela 15 - População inicial de plantas (pl ha⁻¹) de soja e milho nos quatros estados de compactação

TRATAMENTOS	SOJA	MILHO
T0	365.333 a	86.444 a
T1	377.777 a	76.555 ab
T3	372.888 a	69.111 b
T5	362.888 a	74.111 b
CV (%)	16,36	19,56

NOTA: Médias de tratamentos seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste *t-Student* (P>0,05).

Um fato que pode ter influenciado esses resultados foi à ocorrência de grande índice de pluviosidade nos meses de outubro e novembro de 2004, o que pode ter facilitado a emergência das plântulas (Tabela 2). SECCO et al. (2004) encontraram resultados semelhantes para população inicial da cultura da soja. Há muitas controvérsias com relação aos valores de Ds que começa a afetar o crescimento radicular, visto que o comportamento da planta depende de vários fatores, entre eles: a qualidade física do solo, a Rp, as condições climáticas, o tipo de sistema radicular, entre outros, e que irão interferir no desenvolvimento e conseqüente rendimento de grãos da cultura.

Os poucos trabalhos que existem sobre o efeito da compressão do solo sobre a semeadura são contraditórios, entretanto revelam efeitos positivos e negativos sobre a emergência e crescimento e, principalmente, no vigor inicial das plântulas. Em solos argilosos, quando as sementes são semeadas em uma profundidade maior, podem causar prejuízos na emergência, devido ao maior gasto de energia (PRADO et al., 2001).

.7.2 População Final das Plantas de Soja e Milho

Os dados de população final das plantas de soja e milho são apresentados na Tabela 16. A análise dos tratamentos mostra que, na cultura de soja, o tratamento T5 diferiu estatisticamente dos tratamentos T0, T1 e T3, apresentando valores população final superior aos demais tratamentos (20,87%, 9,8% e 10%). Em relação à cultura do milho, o tratamento T0 demonstrou valor de população final superior e estatisticamente diferente dos tratamentos T1 e T3, com valores que sofreram redução de 24% e 29%, respectivamente.

Tabela 16 - População final plantas (pl ha⁻¹) de soja e milho nos quatro estados de compactação do solo

TRATAMENTOS	SOJA	MILHO
T0	305.555 b	86.111 a
T1	336.222 b	69.444 b

T3	333.333 b	66.667 b
T5	369.333 a	73.666 ab
CV (%)	18,45	21,56

NOTA: Médias de tratamentos seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste *t-Student* ($P>0,05$).

Conforme se pode visualizar no Apêndice B, na cultura da soja, os tratamentos obtiveram comportamento semelhante para a população inicial. Entretanto, na análise da população final de plantas, verifica-se que o tratamento T5 possui a maior população final e, ainda, comportamento constante de população inicial e final de plantas, enquanto que nos demais tratamentos o número final de plântulas é reduzido significativamente. Isso pode ser explicado pela maior disponibilidade de água e nutrientes, que favoreceu o desenvolvimento, tanto em épocas chuvosas como em época de estiagem prolongada. Do período da germinação até o estabelecimento da plantas, pode ocorrer atraso da emergência e até a mortalidade das mesmas, devido a diversos fatores, entre eles estão: doenças, altas temperaturas (murchamento permanente) e pluviosidade.

Para a cultura do milho, observa-se comportamento diferenciado ao da cultura da soja, pois nessa cultura o tratamento T0 possui número constante de população inicial e final. Entretanto, quando se observa à população final, os tratamentos T1, T3 e T5 possuem comportamento semelhante, ou seja, nestes tratamentos são encontrados valores inferiores de população final em relação ao tratamento T0. Nota-se ainda que no tratamento T3 e T5 é observado o menor valor de população inicial e final da cultura do milho. De acordo com a Tabela 3, a precipitação média até o final do ciclo do milho e da soja foi considerada ideal, cerca de 715,8 mm.

Segundo HOEFT (2003), as culturas de soja e milho necessitam de 500 a 600 mm de água pela combinação da precipitação e da água armazenada no solo. Entretanto, nota-se que no final do ciclo ocorre um nível de precipitação adequado, porém a distribuição não foi uniforme, pois somente no mês de outubro ocorreu precipitação média de 401,3 mm, o que pode ter influenciado a germinação ou a emergência das duas culturas. Por outro lado, nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, ocorreu precipitação média de 30,8, 87,5 e 35,5 mm, respectivamente, ocorreram períodos de estiagem, o que

pode ter afetado a floração e o enchimento de grãos e, conseqüentemente, o rendimento de grãos.

Segundo VANZELA e ANDRADE (2005), na germinação tanto o déficit como o excesso de água (umidade entre 50 a 85 %) podem prejudicar à boa uniformidade na emergência das plântulas. Na floração e enchimento de grãos a cultura da soja atinge o máximo de exigência hídrica, portanto o estresse hídrico nesse período pode ocasionar problemas fenológicos, como queda prematura das folhas e redução na produtividade. Durante todo o ciclo da cultura da soja é necessária uma precipitação na faixa de 450 a 800 mm de água para se obter o máximo rendimento de grãos. O comportamento das plantas, segundo ALVES (1992), quer seja do ecossistema natural ou do ecossistema agrícola depende de uma série de fatores como: temperatura, precipitação e do próprio solo.

Em relação ao ciclo do milho, CARLESSO e SANTOS (2005) destacaram que o milho é relativamente tolerante ao déficit hídrico durante a fase vegetativa, porém demonstra grande sensibilidade, com decréscimo no rendimento de grãos, se o estresse hídrico ocorrer na fase de florescimento e enchimento dos grãos. Ocorre ainda redução do porte, expansão das folhas, redução no aproveitamento de nutrientes e diminuição da fotossíntese.

Com uma umidade ideal do solo, a germinação e a emergência das plantas podem ser facilitadas, mesmo ocorrendo valores de R_p e D_s considerados restritivos para o desenvolvimento da planta. Gill e Bolt (1965), citados por PRADO et al. (2001), explicam que o milho apresenta considerável potencial de crescimento radicular em razão da grande pressão axial da raiz, que varia de 0,85 a 2,49 MPa. Assim, os resultados desses autores evidenciam que uma compressão de pequena intensidade do solo, ao redor da semente, não implica prejuízos no desenvolvimento radicular.

.7.3 Estatura Final de Plantas de Soja e Milho

A Tabela 17 apresenta os dados relativos à estatura final da soja e do milho. Para a cultura da soja, nota-se que o tratamento T0 diferiu dos

tratamentos T1, T3 e T5. Para a cultura do milho, o tratamento T5 diferiu dos demais tratamentos. Em ambas as culturas, o maior valor de estatura foi encontrado no tratamento T5.

De acordo com Marschener (1986), citado por SILVA e ROSOLEM (2001), dependendo do tipo de solo trabalhado, conteúdo de água e Ds de até $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$, o impedimento radicular não está relacionado à inibição da absorção dos nutrientes e água, portanto, tanto a cultura de soja como a de milho possuíam condições físicas apropriadas para que suas raízes tivessem bom desenvolvimento e conseqüentemente crescimento aéreo e bom rendimento de grãos.

Tabela 17 - Estatura final de plantas de soja e milho em quatro estados de compactação do solo

TRATAMENTOS	SOJA	MILHO
T0	0,77 c*	1,78 b
T1	0,81 b	1,81 b
T3	0,81 b	1,79 b
T5	0,93 a	1,99 a
CV (%)	7,22	9,91

NOTA: Médias de tratamentos seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste *t-Student* ($P > 0,05$).

BEUTLER e CENTURION (2004b) afirmaram que a estatura da soja foi superior no maior teor de água ($0,17 \text{ Kg Kg}^{-1}$) em Latossolo Vermelho-Escuro, textura média e a Rp de $3,76 \text{ MPa}$ não interferiu na estatura média da soja. PEDROTTI et al. (2001) afirmaram que ao encontrar uma zona de impedimento, a raiz imediatamente pode emitir sinais hormonais à parte aérea que interrompe seu crescimento, iniciando a proliferação das raízes laterais que se mantêm confinadas em um pequeno volume de solo. Entretanto, se o conteúdo de água for adequado às plantas, elas conseguem ter um bom desenvolvimento, mesmo quando o solo apresenta pontos de maior Rp. As raízes sempre crescem em busca de água, o que coincide com pontos de menor Rp.

.7.4 Rendimento de Grãos das Culturas de Soja e Milho

Os resultados do rendimento de grãos são apresentados na Tabela 18. Verifica-se que o rendimento de grãos da cultura de soja foi maior no tratamento T5, pois este tratamento possui rendimento de grãos 29,41% maior quando relacionado ao tratamento T0; nos tratamentos T1 e T3 há um aumento de 6,89% e 4,42% em relação ao T0. Nota-se, ainda, que o tratamento T5 diferiu significativamente dos tratamentos T0, T1 e T3. Na cultura do milho há um comportamento diferenciado frente às adversidades do ambiente e à qualidade física do solo. A diferença de rendimento de grãos é menor quando comparada com a cultura de soja, observa-se que o tratamento T5 apresenta rendimento 6,74% maior em relação ao tratamento T0 e o tratamento T1 e T3 sofreram redução de 5,06% e 13,7%, respectivamente.

Tabela 18 - Rendimento de grãos das culturas de soja e milho (Mg ha^{-1}) na safra 2004/2005 em quatro estados de compactação do solo

TRATAMENTOS	SOJA	MILHO
T0	1,08 b	8,3 a
T1	1,16 b	7,9 ab
T3	1,13 b	7,3 b
T5	1,53 a	8,9 a
CV (%)	20,32	13,3

NOTA: Médias de tratamentos seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste *t-Student* ($P > 0,05$).

De uma forma geral, a compactação adicional empregada nos tratamentos não afetou o rendimento de grãos da cultura soja, o que pode ser comprovado pelos tratamentos com compactação adicional, que obtiveram resultado de D_s menor ou igual a $1,25 \text{ Mg m}^{-3}$, volume de macroporos 11% e resistência do solo na ordem de 2,86 MPa em condições de campo, não comprometeram significativamente o rendimento, pois o T5 obteve maior rendimento de grãos de soja. Esses dados corroboram parcialmente os resultados de SECCO et al. (2004), que relatam que o tratamento com cinco níveis de compactação não interferiu negativamente no resultado de rendimento de grãos de soja. QUEIROZ-VOLTAN, NOGUEIRA e MIRANDA

(2000), estudando Latossolo roxo, verificaram que o rendimento da soja em casa de vegetação não foi alterado pela D_s de até $1,50 \text{ Mg m}^{-3}$.

O efeito da compactação na produção vegetal tem sido relatado por vários autores, mas ainda há divergências. Alguns têm observado que uma leve compactação pode provocar aumento de crescimento na parte aérea, pois promove maior contato solo-semente, aumentando a emergência e germinação. Quando a planta possui um sistema radicular pivotante, como é o caso da soja, o crescimento das raízes em solo com camadas com maior R_p fica mais difícil, pois as raízes possuem diâmetro maior do que os poros do solo, entretanto, quando a umidade do solo está alta, elas conseguem crescer. O mesmo não ocorre com a raiz fasciculada que, geralmente, é mais fina e consegue penetrar pelos pontos de menor R_p (BORGES et al., 1999).

Observa-se que a R_p antes da semeadura de soja e milho não ultrapassou a $3,0 \text{ MPa}$ para o tratamento com maior estado de compactação (T5), indicando que raízes do milho podem ter conseguido suprir as necessidades de água e nutrientes. ROSOLEN et al. (1999) observaram em um Latossolo que a R_p da ordem de $1,3 \text{ MPa}$ afetou o crescimento das raízes principais do milho e que em $6,0 \text{ MPa}$ o crescimento das raízes adventícias foi inibido. Percebe-se, então, que, ocorrendo ou não o impedimento para a raiz central do milho, as raízes adventícias conseguem desempenhar seu papel. Além disso, o volume de macroporos estava em média com 10%, considerado pela literatura um volume limite ideal para desempenhar seu papel na condutividade hidráulica e trocas gasosas para o desenvolvimento adequado das plantas.

Para a cultura da soja, BEUTLER e CENTURION (2003) relataram que em Latossolo Vermelho distroférico os valores de R_p que interferiram na produção de grãos foi da ordem de $1,66\text{-}2,22 \text{ MPa}$ para conteúdo de água na tensão de $0,05\text{-}0,01 \text{ MPa}$. Apesar de ocorrerem valores de R_p semelhantes nos tratamentos desses experimentos, nota-se que o rendimento da soja não foi alterado por esse fator, pois no tratamento T5 obteve maior rendimento de grãos, quando comparado com a testemunha (T0).

Outro fator que deve ser considerado é o efeito do mecanismo sulcador tipo facão da semeadora-adubadora que, possivelmente, anulou o efeito dos estados de compactação, principalmente na profundidade de $0,0\text{-}0,1 \text{ m}$.

8 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO PÓS-COLHEITA DAS CULTURAS DE SOJA E MILHO

.8.1 Densidade do Solo (Ds)

Para análise dos atributos físicos como Ds, macro, micro e Pt da segunda fase experimental, pós-colheita da soja e milho, foi utilizado o esquema “*Split Block*”, utilizando-se os seguintes fatores: Fator A, estados de compactação e Fator B, variedades; foi analisado também se ocorreu interação significativa entre o fator A e o Fator B.

A Tabela 19 apresenta os valores médios da Ds, analisados pós-colheita da cultura de soja e milho. Verifica-se pela análise de variância que não houve interação significativa entre os fatores em estudo, implicando que a Ds e as culturas são fatores que agem independentemente. Isto implica que os estados de compactação adicional aplicados pelo rolo compactador foram eliminados pelo mecanismo sulcador tipo facão da semeadora-adubadora, reduzindo assim a Ds e a macro.

Observa-se que na profundidade de 0,0-0,1 m ocorre diferença significativa entre T0 e os tratamentos T3 e T5, sendo ainda encontrado nestes tratamentos com compactação adicional os maiores valores de Ds. Nas profundidades de 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m os tratamentos não diferem entre si, portanto os maiores valores também ocorrem nos tratamentos T3 e T5.

Tabela 19 - Densidade do solo (Mg m^{-3}) fase pós-colheita das culturas de soja e milho em quatro estados de compactação e em três profundidades

FATORES	PROFUNDIDADE (m)		
	0,0-0,1 m	0,1-0,2 m	0,2-0,3 m
Soja (B)	1.22 B*	1.18 B	1.15 B
Milho	1.25 A	1.22 A	1.20 A
DMS	0,0306	0,0353	0,02704
CV (%)	5.58	4.56	6.23
T0 (A)	1,21 a*	1.18 a	1.16 a
T1	1.21 a	1.20 a	1.17 a
T3	1.27 b	1.21 a	1.18 a
T5	1.27 b	1.22 a	1.20 a
DMS	0,0585	0,0673	0,0516
CV (%)	3.69	4.38	3.42
F (A*B)	1,026 ns	0,482 ns	0,957 ns
CV (%)	1.12	5.21	4.73

NOTAS: 1) Médias de tratamentos seguidas de mesma letra maiúscula ou minúscula na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($P > 0,05$);
 2) (A) (B) fatores em estudo;
 3) * teste F significativo a 5% de significância;
 4) ns teste F não significativo a 5% de significância.

Com relação às culturas, observa-se que os valores médios de Ds diferiram em todas as profundidades estudadas, implicando que cada cultura tem comportamento diferente de germinação, emergência e estabelecimento em condições ambientais semelhantes. Além disso, os fatores climáticos possuem papel preponderante no comportamento das culturas.

Observa-se ainda que os valores de Ds tanto o fator cultura como do fator tratamento com estados de compactação não são considerados pela literatura como limitantes ao crescimento e desenvolvimento radicular, pois não atingem valores acima de $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ (CINTRA; MIELNICZUK; SCOPEL, 1983; SECCO et al., 2004).

Entretanto, GUIMARÃES, STONE e MOREIRA (2002) encontraram para a cultura do feijão valores de Ds de $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ que começaram a afetar o

desenvolvimento radicular e a parte aérea do feijão. BORGES et al. (1999), estudando um Latossolo Vermelho-escuro em laboratório, verificaram que, no valor médio de Ds de $1,32 \text{ Mg m}^{-3}$, o volume de microporos foi de $0,17 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ e de macroporos foi cerca de $0,33 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ e com o aumento da Ds para 1,64, o volume de microporos aumenta para $0,22 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ e o de macroporos diminui para $0,17 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$.

.8.2 Volume de Macroporos

Na Tabela 20 são apresentados os resultados da macroporosidade na cultura de soja e milho. Verifica-se que houve interação significativa entre os fatores em estudo para profundidade de 0,0-0,1 m. Observa-se ainda que, para a cultura da soja, o tratamento T0 diferiu do tratamento T5, visto que o maior volume de macroporos foi obtido no tratamento T0.

No entanto, para a cultura do milho os tratamentos não diferiram entre si. Isso pode ser explicado, primeiramente, pelo efeito do mecanismo sulcador da semeadora-adubadora, ocorrendo uma descompactação de até 10 cm na linha de semeadura, que pode ter proporcionado uma melhoria na estrutura do solo, como redução da Ds e aumento da macro, principalmente nos tratamentos com maior número de passadas com o rolo compactador. ALVES e SUZUKI (2004), em estudo com a cultura de soja e milho em sucessão de culturas, observaram que, na profundidade de 0,0 a 0,10 m, a soja proporcionou maior valor de macroporosidade, seguida do milho.

Nesse contexto, a cultura de soja apresentou uma melhor resposta às condições do solo, pois, em geral, apresenta um volume maior de macroporos. Quando se analisam as relações entre as culturas de soja e de milho, verifica-se que os tratamentos T0 e T3 diferiram estatisticamente quanto ao volume de macroporos e os tratamentos T1 e T5 não mostraram essa diferença. Esse comportamento da soja deve-se à morfologia de seu sistema radicular, por ter um sistema radicular principal com raiz pivotante e raízes secundárias que possuem papel importante na absorção de nutrientes. Verifica-se ainda que a macroporosidade do milho não ultrapassou 8%, isso

pode ser indício de que as raízes do milho não se desenvolveram de modo semelhante em todos os tratamentos.

Tabela 20 - Macroporosidade ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$) fase pós-colheita das culturas de soja e milho em quatro estados de compactação na profundidade de 0,0-0,1 m

TRATAMENTOS	SOJA	MILHO
	Profundidade (0,0-0,1 m)	
T0	0,11 aA	0,08 aB
T1	0,09 abA	0,08 aA
T3	0,10 abA	0,06 aB
T5	0,07 bA	0,08 aA
DMS (A)	0,03294	
DMS (B)	0,02416	
CV 1 (%)	17,80	
CV 2 (%)	21,72	
F (a*B)	5,404 *	
CV 3 (%)	20,56	

NOTAS: 1) Médias de tratamentos com letras distintas, minúsculas na coluna e maiúscula na linha, diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$) na profundidade de 0,0-0,1 m.
 2) (A) (B) fatores em estudo;
 3) F (A*B) teste F para a interação;
 4) * teste F significativo a 5% de significância;
 5) ns teste F não significativo a 5% de significância.

De acordo com a análise de variância, não ocorreu interação significativa do volume de macroporos nas profundidades de 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m. Observa-se na Tabela 21 que, na profundidade de 0,1-0,2 m, os volumes de macroporos dos tratamentos com estados de compactação são estatisticamente semelhantes. Na profundidade de 0,2-0,3 m, verifica-se que somente o tratamento T0 difere do tratamento T5 e que o maior valor de macroporos foi verificado no tratamento T0.

Com relação às culturas, o volume de macroporos nas profundidades mencionadas diferiu entre si, entretanto a cultura da soja mostrou volume de macroporos superior ao do milho.

Os valores de macroporosidade de 0,10 a 0,16 m m⁻³ são considerados ideais por KIEHL (1979), para que haja um bom desenvolvimento das plantas. Abaixo desse volume, pode limitar o crescimento vertical das raízes. ANDREOLLA (2005), em estudo dos mecanismos sulcadores e os atributos físicos de um Latossolo Vermelho eutrófico, verificou que a macroporosidade antes da colheita da soja era em média de 0,06 e, após a colheita, a média obtida foi de 0,17 m m⁻³ na profundidade de 0,0-0,1 m.

Tabela 21 - Macroporosidade (dm³ dm⁻³) na fase pós-colheita das culturas de soja e milho em quatro estados de compactação, nas profundidades de 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m.

TRATAMENTOS	PROFUNDIDADES (m)	
	0,1-0,2 m	0,2-0,3 m
Soja (B)	0,11 A	0,10 A
Milho	0,09 B	0,08 B
DMS	0,0177	0,01289
CV (%)	25,25	19,86
T0 (A)	0,10 a	0,11 a
T1	0,09 a	0,09 ab
T3	0,10 a	0,09 ab
T5	0,08 a	0,07 b
DMS	0,0242	0,02377
CV (%)	19,85	20,87
F (A*B)	0,417 ns	0,566 ns
CV (%)	18,48	23,77

NOTAS 1) 1) Médias de tratamentos seguidas de mesma letra maiúscula ou minúscula na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey (P> 0,05);
 2) (A) (B) fatores em estudo;
 3) * teste F significativo a 5% de significância;
 4) ns teste F não significativo a 5% de significância.

Nota-se ainda que a cultura da soja obteve melhor resposta às condições impostas pelo clima e pelo solo, devido ao maior valor de

macroporos e redução da D_s . No entanto, para o milho, o comportamento frente às adversidades do ambiente foi diferenciado, pois o volume de macroporos foi menor em relação à soja. Segundo LANDERS (1995), a soja é, dentre as principais culturas que existem no Brasil, é uma das que melhor se adapta ao sistema plantio direto.

.8.3 Volume de Microporos

Pela análise de variância observou-se que não ocorreu interação significativa entre o fator tratamento e o fator variedade e que não houve diferença significativa no teste de médias entre os valores de microporos nas três profundidades estudadas, indicando que não ocorreu variação significativa entre os tratamentos (Tabela 22).

Ao analisar as duas culturas, nota-se que os valores médios de microporos diferiram entre si nas profundidades de 0,0-0,1 e 0,1-0,2 m. Verifica-se ainda que o volume de microporos é maior na cultura do milho, quando relacionado com a cultura da soja, isso se deve ao menor volume de macroporos encontrados na cultura do milho. STONE, GUIMARÃES e MOREIRA (2002), estudando um Latossolo Vermelho perférrico em casa de vegetação, verificaram que na D_s de $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$, o volume de microporos foi cerca de $0,33 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$, enquanto que na D_s de $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$, o volume pouco aumentou, passando para $0,34 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$, entretanto o volume de macroporos passou de $0,22$ para $0,13 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$.

Tabela 22 - Microporosidade ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$) na fase pós-colheita das culturas de soja e milho em quatro estados de compactação e em três profundidades

TRATAMENTOS	MICROPOROS		
	0,0-0,1 m	0,1-0,2 m	0,2-0,3 m
Soja (A)	0.49 B	0.47 B	0.51 A
Milho	0.53 A	0.55 A	0.52 A
DMS	0,038136	0,045232	0,033544
CV (%)	11.03	8.53	6.42
T0 (B)	0.50 a	0.51 a	0.50 a
T1	0.53 a	0.51a	0.52 a
T3	0.51 a	0.52 a	0.51 a
T5	0.51 a	0.53 a	0.54 a
DMS	0,072810	0,086357	0,064043
CV 1 (%)	11.09	13.04	9.67
F (A*B)	0,404 ns	0,187 ns	3,10 ns
CV 3 (%)	6.14	8.17	10.99

NOTAS: 1) * Médias de tratamentos seguidas de mesma letra maiúscula ou minúscula na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($P > 0,05$);
 2) (A) (B) fatores em estudo;
 3) * teste F significativo a 5% de significância;
 4) ns teste F não significativo a 5% de significância.

.8.4 Porosidade Total

Na Tabela 23 são apresentados os dados de porosidade total. Na análise de variância observa-se que não houve interação significativa e o teste de médias não apresenta diferenças entre os tratamentos nas três profundidades.

Com relação às culturas, os volumes totais de poros diferem entre si nas três profundidades. Percebe-se que a porosidade é maior para a cultura da soja, implicando que esta cultura obteve melhor resposta às condições impostas, pois, supostamente, suas raízes conseguiram desenvolver-se, obtendo assim água e nutrientes. Com isso ocorreu aumento do volume de macroporos e conseqüentemente aumento da porosidade total. Enquanto que

o milho pode ter sofrido influência das adversidades climáticas, que em consequência prejudicaram seu desenvolvimento. STONE, GUIMARÃES e MOREIRA (2002) observaram valores de porosidade total de $0,55 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ na Ds de $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ e de $0,47 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ na Ds de $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$.

Tabela 23 - Porosidade total ($\text{dm}^3 \text{ dm}^{-3}$) pós-colheita das culturas de soja e milho em quatro estados de compactação e em três profundidades

TRATAMENTOS	POROSIDADE TOTAL		
	0,0-0,1 m	0,1-0,2 m	0,2-0,3 m
Soja (B)	0.61 B*	0.66 B	0.62 B
Milho	0.55 A	0.56 A	0.57 A
DMS	0,03217	0,06963	0,03151
CV (%)	5.81	5.26	7.33
T0 (A)	0.59 a*	0.61 a	0.60 a
T1	0.57a	0.61 a	0.60 a
T3	0.60 a	0.60 a	0.60 a
T5	0.56 a	0,61 a	0.58 a
DMS	0,0614	0,03647	0,060167
CV (%)	8.26	8.93	7.87
F (A*B)	1,254 ns	1,468 ns	1,421 ns
CV (%)	7.76	10.21	7.84

NOTAS: 1) Médias de tratamentos seguidas de mesma letra maiúscula ou minúscula na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($P > 0,05$);
 2) (A) (B) fatores em estudo;
 3) * teste F significativo a 5% de significância;
 4) ns teste F não significativo a 5% de significância.

9 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO NAS DIFERENTES FASES EXPERIMENTAIS

Nas Tabelas 24, 25, 26 e 27 são apresentados os resultados de Ds, macroporosidade, microporosidade e porosidade total nas duas fases

experimentais, englobando a análise dos atributos antes da implantação dos tratamentos com estados de compactação (AT), após implantação dos tratamentos (APT), após colheita do trigo (APCT) e após colheita da soja e milho (APCSM) nos quatro estados de compactação.

Na Tabela 24, observa-se que os valores de Ds do tratamento T0, antes da implantação do experimento (AT), não diferiram estatisticamente dos valores de Ds obtidos após a implantação dos tratamentos com compactação adicional (APT), em todas as profundidades estudadas. Entretanto os tratamentos T1, T3 e T5 da época AT diferiram significativamente do tratamento APT, nas três profundidades estudadas.

Com relação à evolução desse atributo físico do solo, verifica-se que os tratamentos T1 e T5 da época AT diferiram dos valores encontrados no APCT. Observa-se, ainda, que somente o tratamento T5 de AT diferiu do APCSM, enquanto que T1 e T5 são semelhantes entre AT e APCSM, na profundidade de 0,0-0,1 m. Pode-se inferir que a Ds dos tratamentos T1 e T3 da época APCSM foi restabelecida somente após duas safras, comparativamente ao estado inicial do solo (AT) e, ainda, para os valores de Ds do tratamento T5, após duas safras, não houve restabelecimento das condições iniciais do solo.

Na profundidade de 0,01-0,2 m, os tratamentos T1, T3 e T5 da época AT obtiveram resultados que diferiram dos valores de APT. Observa-se também que os valores de APT diferiram dos valores de Ds nos tratamentos T1, T3 e T5 do APCSM. Entretanto, somente o tratamento T1 do APCT diferiu do APCSM, visto os tratamentos T3 e T5 são semelhantes aos valores de Ds do APCSM. Enfim, a Ds aumenta significativamente de AT para APT e, no final de duas safras, verifica-se que todos os tratamentos com estado de compactação voltam à condição inicial de Ds (AT) do solo. Na profundidade de 0,2-0,3 m, os valores de Ds de AT diferiram do APT, entretanto são semelhantes aos valores de APCT e APCSM. Verifica-se que nessa profundidade, os valores de Ds foram restabelecidos após a colheita do trigo, pois nessa profundidade a influência da pressão do rolo compactador quase não existe, pois a pressão exercida pelo rolo é superficial.

Tabela 24 - Valores médios da densidade do solo (Mg m^{-3}), em função dos quatro estados de compactação, nas diferentes fases experimentais

TRATAMENTOS	DENSIDADE DO SOLO			
	AT	APT	APCT	APCSM
PROFUNDIDADE (0,0-0,1 m)				
T0	1,22 bA*	1,23 bA*	1,25 aA*	1,21 Aa*
T1	1,20 bC	1,31 aA	1,26 aB	1,21 aC
T3	1,25 aB	1,37 aA	1,27 aB	1,27 bB
T5	1,21 bC	1,35 aA	1,28 aB	1,27 bB
CV(%)	2,54	5,34	3,67	3,69
PROFUNDIDADE (0,1-0,2 m)				
T0	1,23 aA	1,23 cA	1,25 aA	1,18 aA
T1	1,18 bB	1,27 bA	1,25 aA	1,20 aB
T3	1,24 aB	1,34 aA	1,23 aB	1,21 aB
T5	1,22 aB	1,39 aA	1,23 aB	1,22 aB
CV(%)	3,25	6,18	4,11	4,38
PROFUNDIDADE (0,2-0,3 m)				
T0	1,19 aA	1,19 bA	1,22 aA	1,16 aA
T1	1,18 aB	1,26 aA	1,18 aB	1,17 aB
T3	1,18 aB	1,27 aA	1,22 aB	1,18 aB
T5	1,19 aB	1,27 aA	1,20 aB	1,20 aB
CV(%)	2,5	4,72	5,63	3,42

NOTA: Médias de tratamentos com letras distintas, minúsculas na coluna e maiúscula na linha, diferem entre si pelo teste *T-Student* ($P < 0,05$).

O restabelecimento da D_s às condições iniciais do solo (AT) na camada de 0,0-0,1 m deve-se, principalmente, ao mecanismo sulcador da semeadora. Outro fator que contribui para a redução da D_s é foi o crescimento das raízes pelo perfil do solo, pois dessa forma há formação de poros de maior estabilidade devido à ação dos microorganismos (bactéria e fungos) na decomposição das raízes já mortas (ALVES, 1992). Segundo WANG, KESKETH e WOOLLEY (1986) as culturas do tremoço, alfafa, soja perene, nabo forrageiro, crotalárias e outras possuem um sistema radicular agressivo e por isso têm importante papel na descompactação do solo.

Na Tabela 25 são apresentados os dados de macroporosidade do solo. Observa-se que o volume de macroporos do tratamento T0, antes da implantação do experimento (AT), não diferiu estatisticamente dos valores de macroporos, depois da implantação dos tratamentos com compactação adicional (APT), em todas as profundidades estudadas. Entretanto, os tratamentos T1, T3 e T5 da época AT diferiram significativamente do APT, nas

profundidades de 0,0-0,1 e 0,1-0,2 m. Na profundidade de 0,2-0,3 m, nota-se que o volume de macroporos do tratamento T1 é semelhante entre AT e APT, enquanto que os tratamentos T3 e T5 diferiram significativamente. Com a passagem do rolo compactador, ocorreu redução no volume de macroporos e então o solo foi deformado, reduzindo o volume inicial de macroporos. No tratamento T1, na profundidade de 0,2-0,3 m, isso não ocorreu devido ao número de passadas do rolo compactador ser menor e causar menos efeito no solo.

Tabela 25 - Valores médios de macroporos ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$), em função dos quatro estados de compactação, nas diferentes fases experimentais

TRATAMENTOS	MACROPOROSIDADE			
	AT	APT	APCT	APCSM
PROFUNDIDADE (0,0-0,1 m)				
T0	0,11 aA*	0,11 aA*	0,11 aA*	0,10 aA*
T1	0,10 aA	0,04 bB	0,08 bA	0,08 bA
T3	0,10 aA	0,03 bB	0,09 abA	0,08 bA
T5	0,11 aA	0,03 bB	0,12 aA	0,07 bC
CV(%)	15,32	45,42	28,80	17,8
PROFUNDIDADE (0,1-0,2 m)				
T0	0,11 aA	0,10 aA	0,13 aA	0,10 aA
T1	0,10 aA	0,04 bB	0,10 bA	0,09 aA
T3	0,10 aA	0,02 cB	0,11 abA	0,10 aA
T5	0,09 aA	0,02 cB	0,12 aA	0,09 aA
CV(%)	14,25	41,1	23,38	19,85
PROFUNDIDADE (0,2-0,3 m)				
T0	0,11 aA	0,11 aA	0,10 aA	0,10 aA
T1	0,10 aA	0,08 bA	0,10 aA	0,09 abA
T3	0,12 aA	0,05 cB	0,09 aA	0,09 abA
T5	0,10 aA	0,03 cB	0,10 aA	0,07 bC
CV(%)	12,45	42,91	30,01	20,87

NOTA: Médias de tratamentos com letras distintas, minúsculas na coluna e maiúscula na linha, diferem entre si pelo teste *T-Student* ($P < 0,05$).

Com relação à evolução desse atributo na profundidade de 0,0-0,1 m, depois de duas safras, verifica-se que os valores dos tratamentos T1, T3 e T5 da época AT não diferiram dos valores do APCT. No entanto, somente os tratamentos T1 e T3 da época AT são semelhantes aos valores de APCSM, enquanto que no tratamento T5 o volume de macroporos é menor e diferiu entre AT e APCSM. Na profundidade de 0,1-0,2 m observou-se que os valores de macroporos de AT são semelhantes aos valores de APCT e APCSM. Na

profundidade de 0,2-0,3 m o volume de macroporos de AT possui comportamento semelhante ao da profundidade de 0,0-0,1 m.

Desse modo, percebe-se que volume de macroporos após a implantação dos estados de compactação foi reduzido, no entanto, após a semeadura do trigo, soja e milho o volume de macroporos foi restabelecido, principalmente, nos tratamentos T1 e T3, em relação ao estado inicial do solo. O aumento do volume de macroporos na profundidade de 0,0-0,1 m ocorreu, principalmente, pelo efeito do mecanismo sulcador da semeadora que diminui a D_s e aumenta o volume de macroporos. Nas outras camadas, tem-se o efeito do sistema radicular no perfil do solo, modificando a estrutura do solo e aumenta o número de poros.

Segundo REEVES (1995), com o passar dos anos, o valor de D_s que antes era alta pode diminuir, devido, em parte, ao aumento da matéria orgânica na camada superficial do solo, favorecendo a melhoria da estrutura do solo pelo aumento da retenção de água no solo. Dessa maneira, ocorrem as atividades biológicas como decomposição e mineralização dos nutrientes liberados pelas plantas. Enfim, com o menor valor de D_s e maior conteúdo de água disponível as plantas podem não ter restrição ao crescimento radicular e vegetativo, aumentando o volume de solo explorado e aumentando conseqüentemente a porosidade.

Na Tabela 26 são apresentados os resultados de microporosidade. Observa-se que o volume de microporos do tratamento T0 antes da implantação do experimento (AT) não diferiu estatisticamente dos valores de microporos, após a implantação dos tratamentos com compactação adicional (APT), em todas as profundidades estudadas.

Em geral, observa-se que a microporosidade dos tratamentos T1, T3 e T5, na profundidade de 0,0-01 m, são semelhantes aos valores de APT. No entanto, AT diferiu estatisticamente dos resultados de APCT e APCSM. Verifica-se ainda que o APCSM possui os maiores valores de microporos para todos os tratamentos.

Tabela 26 - Valores médios de microporosidade ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$), em função dos quatro estados de compactação e nas diferentes fases experimentais

TRATAMENTOS	MICROPOROSIDADE			
	AT	APT	APCT	APCSM
PROFUNDIDADE (0,0-0,1 m)				
T0	0,44 bB	0,45 bB*	0,43 bB*	0,49 aA
T1	0,47 aB	0,49 aB	0,46 aC	0,53 aA
T3	0,44 aB	0,47 abB	0,45 aC	0,51 aA
T5	0,49 AB	0,47 abB	0,44 abC	0,52 aA
CV(%)	3,65	4,34	5,64	11,9
PROFUNDIDADE (0,1-0,2 m)				
T0	0,45 aB	0,45 bB	0,40 cC	0,51 aA
T1	0,47 aC	0,49 aB	0,46 aC	0,54 aA
T3	0,45 aC	0,48 aB	0,44 bC	0,51 aA
T5	0,47 aB	0,48 aB	0,43 bC	0,52 aA
CV(%)	2,36	5,43	5,45	13,04
PROFUNDIDADE (0,2-0,3 m)				
T0	0,47 aB	0,47 bAB	0,46 aB	0,51 aA
T1	0,48 bB	0,46 bB	0,46 aB	0,52 aA
T3	0,46 aB	0,48 abAB	0,47 aB	0,51 aA
T5	0,48 aB	0,51 aA	0,46 aB	0,54 aA
CV(%)	6,58	7,53	7,09	9,67

NOTA: Médias de tratamentos com letras distintas, minúsculas na coluna e maiúscula na linha, diferem entre si pelo teste *T-Student* ($P < 0,05$).

Na profundidade de 0,1-0,2 m o volume de microporos dos tratamentos T1 e T3 de AT são semelhantes ao encontrado no APCT, entretanto diferiram dos resultados de APT e APCS M e o resultado encontrado no tratamento T5 de AT, difere dos resultados de APCT e APCS M. Na época APCS M são encontrados os maiores valores de microporos. Na profundidade de 0,2-0,3 m, os tratamentos T1, T3 e T5 de AT não diferem dos valores de microporos do APCT, mas diferiram dos valores do APCS M. Verifica-se que, após o estabelecimento dos estados de compactação do solo, o volume de microporos da profundidade de 0,0-0,1 m não foi alterado significativamente.

Na Tabela 27 são apresentados os dados de porosidade total das duas fases experimentais. Observa-se que os valores de porosidade total do tratamento T0 da época AT são semelhantes ao APT em todas as profundidades. Nota-se também que a porosidade total dos tratamentos T1, T3 e T5 de AT diferiu dos valores de APT. Indicando que os estados de compactação do solo influenciaram diretamente o valor da porosidade, pois a porosidade diminuiu em todas as profundidades até o APCT. Isso decorreu, principalmente do aumento da D_s e da redução da macroporosidade nos tratamentos com estados de compactação.

Tabela 27 - Valores médios de porosidade total ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$), em função dos quatro estados de compactação e nas diferentes fases experimentais

TRATAMENTOS	POROSIDADE TOTAL			
	AT	APT	APCT	APCSM
PROFUNDIDADE (0,0-0,1 m)				
T0	0,55 aB	0,55 aB	0,54 bB*	0,60 aA
T1	0,56 bB	0,53 bC	0,54 bC	0,60 aA
T3	0,54 aB	0,50 cC	0,54 bB	0,60 aA
T5	0,56 aA	0,51 cB	0,56 aA	0,56 aA
CV(%)	3,68	3,84	3,16	8,26
PROFUNDIDADE (0,1-0,2 m)				
T0	0,55 aB	0,55 aB	0,53 bB	0,62 aA
T1	0,57 bA	0,53 bB	0,56 aB	0,61 aA
T3	0,55 aA	0,50 cB	0,55 aA	0,59 aA
T5	0,55 aB	0,50 cC	0,55 aB	0,61 aA
CV(%)	4,57	3,87	5,49	8,93
PROFUNDIDADE (0,2-0,3 m)				
T0	0,57 aB	0,57 aB	0,56 aB	0,61 aA
T1	0,58 aB	0,54 bC	0,56 aB	0,60 aA
T3	0,57 aA	0,53 bB	0,57 aA	0,58 aA
T5	0,58 aA	0,54 bB	0,56 aB	0,59 aA
CV(%)	4,38	4,07	6,30	7,87

NOTA: Médias de tratamentos com letras distintas, minúsculas na coluna e maiúscula na linha, diferem entre si pelo teste *T-Student* ($P < 0,05$).

Na porosidade total, verifica-se que, de um modo geral, o volume final de poros do APCS M aumentou e difere dos valores de APT em todas as profundidades estudadas. Observa-se também que os tratamentos T3 e T5 de AT nas profundidades de 0,0-0,1 e 0,1-0,2 m diferiram estatisticamente de APCT e de APCS M. Enquanto que, na profundidade de 0,2-0,3 m, os tratamentos T1 e T3 de AT diferiram de APT.

10 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO (RP) FASE PÓS-COLHEITA DAS CULTURAS DE SOJA E MILHO

De acordo com a Tabela 28, nota-se que em geral o tratamento T0 difere significativamente do tratamento T3. Verifica-se ainda que os tratamentos T1 e T3 são semelhantes em todas as profundidades analisadas e que o tratamento T5 é semelhante ao tratamento T1 somente na profundidade de 0,1-0,2 m. Os maiores valores de Rp, acima de 2,50 MPa, estão na camada de 0,1-0,2 m nos tratamentos T1 e T3. SOUZA e ALVES (2003) verificaram que na camada de 0,1-0,2 m a média da Rp foi de 2,86 MPa para o plantio direto.

Observa-se, na Figura 10, que os tratamentos T3 e T5 impuseram ao solo valores de Rp superiores a 2,0 MPa na camada de 0,05-0,20 m, com umidade média de 0,19 e 0,19 Kg Kg⁻¹ nessas camadas. Esses resultados são confirmados parcialmente por SECCO et al. (2004) que, em trabalho de campo semelhante e sob dois Latossolos, verificaram valores de resistência maiores que 2,0 MPa na camada de 0-0,05 m.

Tabela 28 - Resistência do solo à penetração em quatro estados de compactação na fase pós-colheita da cultura do milho

TRATAMENTOS	PROFUNDIDADES			
	0,0-0,1 m	0,1-0,2 m	0,2-0,4 m	Média
T0	1,92 b	1,97 b	2,03 b	1,97
T1	2,51 a	3,03 a	2,17 ab	2,57
T3	2,53 a	2,93 a	2,30 a	2,58
T5	2,02 b	2,28 c	2,09 b	2,13
CV (%)	36,68	27,49	51,02	

NOTA: Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste *t-Student* ($P>0,05$).

A partir de 0,35 m, os tratamentos com estados de compactação apresentam comportamento semelhante, demonstrando dessa forma o estado estrutural natural que o solo se encontra.

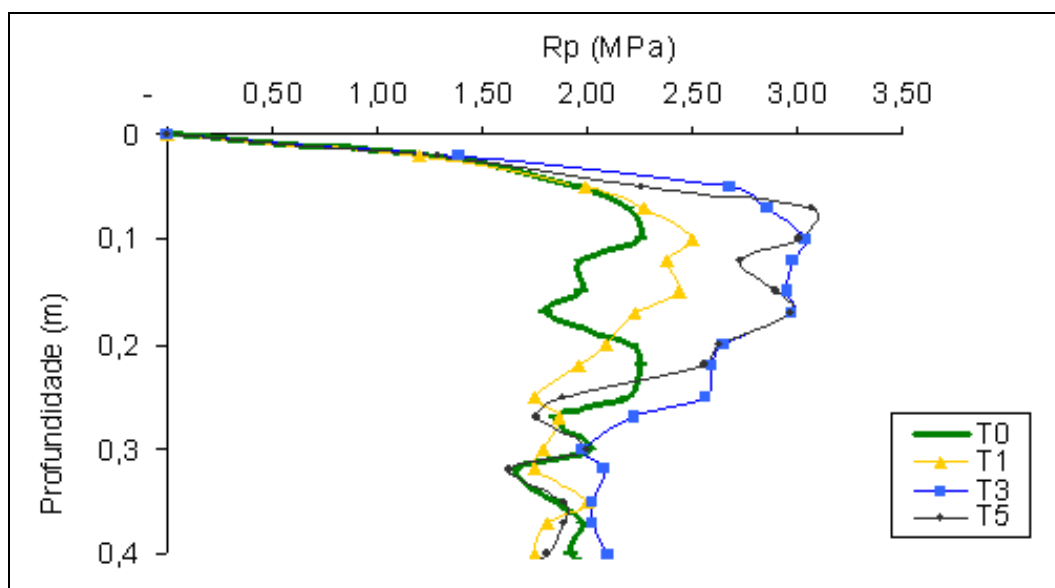


Figura 10 - Resistência do solo à penetração em quatro estados de compactação após colheita do milho.

NOTA: T0 ($U_g = 0,22 \text{ Kg Kg}^{-1}$); T1 ($U_g = 0,20 \text{ Kg Kg}^{-1}$); T3 ($U_g = 0,19 \text{ Kg Kg}^{-1}$); T5 ($U_g = 0,19 \text{ Kg Kg}^{-1}$).

Como no sistema plantio direto não ocorre revolvimento do solo, ocorre formação de camadas compactadas na profundidade de 0,07-0,15, com isso ocorrem pontos de maior R_p e no sistema convencional, a maior resistência ocorre na profundidade de 0,1 a 0,4 m (ALVES; SUZUKI, 2004). BEUTLER et al. (2001) relataram que o tráfego acentuado de máquinas e implementos pesados sobre o solo pode provocar compactação superficial do solo até a profundidade de 15 a 20 cm.

Com relação aos tratamentos T0 e T1, observa-se que estes possuem também valores de R_p elevados, o tratamento T1 apresenta na camada de 0,05 até 0,23 m, valores de R_p maior ou igual a 2,0 MPa e para a profundidade de 0,25 a 0,4 m ocorreram valores inferiores a 2 MPa, provavelmente devido ao aumento da umidade do solo com o aumento da profundidade. Na testemunha (T0) os valores de R_p também apresentaram alta variabilidade, com picos de até 2,0 MPa sendo que na profundidade de 0,05 a 0,1 m, e 0,2 a 0,25m ocorreram os maiores valores, isso pode ter acontecido pelo fato da umidade, no momento da coleta dos dados, estar menor que dos tratamentos T1 e T3.

Como a área de experimental possui somente oito anos sob sistema plantio direto, pode ter ainda sinais de compactação subsuperficial, provocado

pelo tráfego intenso do sistema convencional que ocorreram antes da implantação do sistema plantio direto. Estes dados corroboram com TAVARES FILHO et al. (2001) que relatam que o sistema convencional causa problemas de compactação a partir da profundidade de 0,2 m.

Os dados de Rp para a cultura da soja estão apresentados na Tabela 29. Observa-se que os valores de resistência do tratamento T0 diferem dos tratamentos T3 e T5 em todas as profundidades analisadas. Verifica-se também que na profundidade de 0,1-0,2 m são encontrados os maiores valores que estão na faixa de 2,30 a 2,50 MPa. Verifica-se ainda que o tratamento T1 diferiu dos tratamentos T3 e T5 na profundidade de 0,0-0,1 m, isso se deve ao revolvimento do solo que ocorreu na semeadura nesta camada.

Na Figura 11, a qual revela grande variabilidade dos dados, com pontos discrepantes. Nota-se que os tratamentos T3 e T5 apresentaram os maiores picos de Rp.

O tratamento T5 obteve maior valor de Rp na camada de 0,05 a 0,1 m, com valores iguais ou maiores a 2,5 MPa. E na profundidade de 0,1 a 0,2 m, os valores não ultrapassaram de 2,5 MPa. Estes resultados pode ter ocorrido pelo acúmulo de pressões que ocorrem no solo de uma safra para outra.

Tabela 29 - Resistência do solo à penetração em quatro estados de compactação na fase pós-colheita da cultura da soja

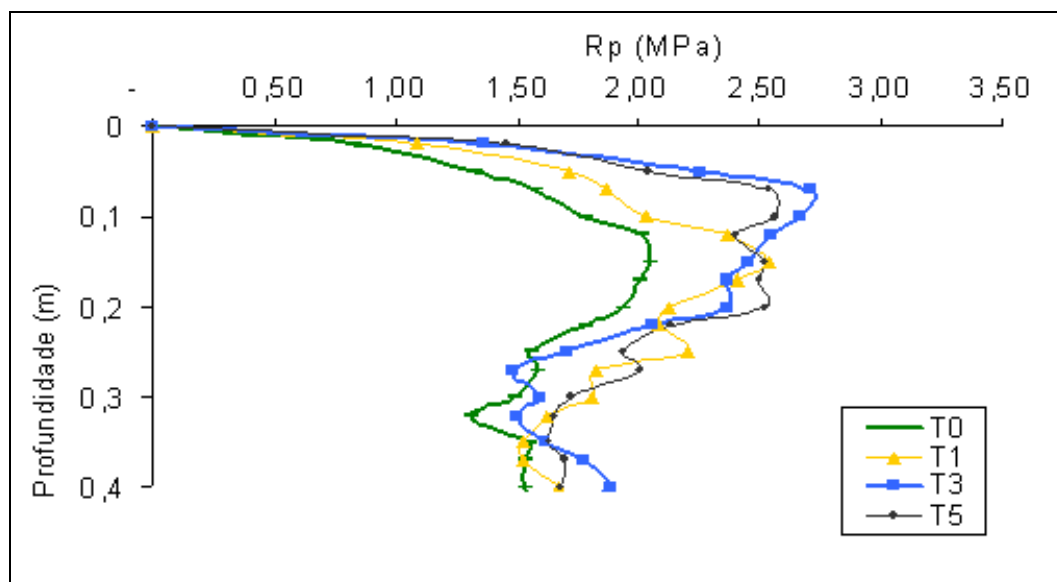
Tratamentos	Profundidades			Média
	0,0-0,1 m	0,1-0,2 m	0,2-0,4 m	
T0	1,42 b	2,00 b	1,51 b	1,64
T1	1,68 b	2,38 a	1,75 a	1,93
T3	2,25 a	2,43 a	1,65 a	2,21
T5	2,14 a	2,52 a	1,82 a	2,16
CV (%)	43	21	28	

*Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste t- Student ($P > 0,05$)

Para a testemunha (T0), os valores de Rp não ultrapassaram a 2 MPa nas profundidades de 0,10 a 0,2 m e na camada de 0,1 a 0,2 m, verifica-se que os valores de Rp estão na faixa de 1,5 a 2,0 MPa. Para o T1, observa-se que de 0,15 a 0,21 m ocorrem os maiores valores de Rp, sendo que nas outras profundidades os valores foram menores que 2 MPa. Isso pode ser explicado pelo acúmulo de pressões que ocorrem de uma safra para outra. Nota-se ainda

que a partir de 0,25 m os tratamentos possuem comportamento semelhante, com decréscimo da R_p com o aumento da profundidade.

Figura 11 - Resistência do solo à penetração em quatro estados de



compactação, fase pós colheita da soja.

NOTA: T0 ($U_g = 0,22 \text{ Kg Kg}^{-1}$); T1 ($U_g = 0,20 \text{ Kg Kg}^{-1}$); T3 ($U_g = 0,19 \text{ Kg Kg}^{-1}$); T5 ($U_g = 0,19 \text{ Kg Kg}^{-1}$).

Os valores de R_p obtidos nos tratamentos indicam o aparecimento de camadas no solo com maior R_p e com valores acima dos citados na literatura: 2,5 MPa, CANARACHE (1990); 3,5 MPa, MEROTTO e MUNDSTOSK (1999), como impeditivos ao desenvolvimento radicular. Apesar de serem relatados pelos demais autores, pode não afetar o desenvolvimento radicular e vegetativo da planta, pois, existindo condições estruturais que permitam a difusão de oxigênio, condições químicas (nutrientes) disponíveis e conteúdo de água no solo as raízes penetrarão no perfil do solo, embora ocorram nas raízes, dependendo do tipo da cultura, mudanças morfológicas.

Esses resultados evidenciam que as pressões no solo são acumulativas ao longo do tempo (tensão de pré-adensamento), tanto por ação natural como por ação do homem, ou seja, pela passagem sobre o solo de máquinas ou implementos que acarretam, com o passar do tempo, alterações na estrutura do solo. Verifica-se ainda que as culturas estudadas possuem comportamento diferente frente à estrutura do solo e às adversidades climáticas em campo, por apresentarem sistema radicular diferenciado.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos pela pesquisa permitem concluir que:

- Os estados de compactação empregados na primeira fase experimental modificaram a estrutura do solo. Esse efeito foi mais pronunciado na profundidade de 0,0 a 0,1 m, em que os atributos físicos do solo, como a macroporosidade e densidade tiveram maior alteração.
- Com o aumento do número de passadas do rolo compactador ocorreu redução de 90% na velocidade de infiltração do tratamento T5.
- Apesar das mudanças significativas dos atributos físicos do solo, o rendimento de grãos de trigo não foi reduzido com o aumento dos estados de compactação.
- Os valores mais elevados de R_p (2,50 a 3,00 MPa) ocorreram na camada de 0,07 a 0,12 m, entretanto esse valor não foi suficiente para alterar a população inicial da soja, entretanto a do milho foi reduzida.
- Os atributos físicos de solo como densidade, macroporos e porosidade total voltam às condições iniciais somente após duas safras.

REFERÊNCIAS

ABREU, S. L. **Propriedades hídricas e mecânicas afetadas por sistema de manejo e variabilidade espacial de um argissolo**. Santa Maria, 2000. 65 f. Dissertação (mestrado em Agronomia - Solos) - Universidade Federal de Santa Maria.

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, p. 519-531, 2004.

ADAMS, B. A.; WULFSOHN, D. Variation of the critical-state boundaries of an agricultural soil. **Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 48, p. 739-748, 1997.

ALAKUKKU, L.; ELOMEN, P. Long-term effects of a single compaction by heavy field traffic on yield and nitrogen uptake of annual crops. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 36, p. 141-152, 1995.

ALBUQUERQUE, J.A.; REINERT, D. J.; FIORIN, R.E.; RUEDELL, J.; PETRERE, C.; FONTINELLI, F. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo ao final de sete anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, n. 1, p. 115-119, 1995.

ALVARENGA, C .R.; COSTA, L. M.; MOURA FILHO, W.; REGAZZI, A. J. Crescimento de raízes de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 2, p. 319-326, 1996.

ALVES, M. C. **Sistemas de rotação de culturas com plantio direto em Latossolo Roxo: efeito nas propriedades físicas e químicas**, 1992. 102 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiros", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1992.

ALVES, G. A.; ANDRADE, M. J. B.; CORRÊA, J. B. D.; MORAES, A. R.; SILVA, M. V. Comportamento de genótipos de feijoeiro em latossolo vermelho distroférico típico com diferentes graus de compactação. **Ciência Agrotec**, Lavras - MG, v. 27, n. 1, p. 36 -43, 2003.

ALVES, M. C.; SUZUKI, L. E. A. S. Influência de diferentes sistemas de manejo do solo na recuperação de suas propriedades físicas. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 26, n. 1, p. 27-34, 2004.

ANDREOLLA, V. R. M. **Eficácia de mecanismos sulcadores de semeadoras-adubadoras e suas implicações nos atributos físicos de um Latossolo sob integração agropecuária e na produtividade de soja (*Glycine max* L. Merill)**. Cascavel, 2005. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J.(Ed) **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996, p. 123-141 (SSSA Special publication 49).

ASSAD, M. L. L. Fauna do solo. In: VARGAS, M. A. T.; HUNGRIA, M. **Biologia dos solos dos cerrados**. Planaltina: Embrapa, 1997. p. 32-36.

BALL, B.C.; CAMPBELL, D.J.; DOUGLAS, J.T.; HENSHALL, J.K.; O'SULLIVAN, M.F. Soil structural quality, compaction and land management. Europa. **Soil Science**, Baltimore, v. 48, p. 593-601, 1997.

BEEMSTER, G. T.S.; MASLE, J.; WILLIAMSON, R. E.; FARQUHAR, G. Effects of soil resistance to root penetration on leaf expansion in wheat (*Triticum aestivum* L.): Kinematic analysis of leaf elongation. **Journal of Experimental Botany**, London, v. 7, p. 1663-1678, 1996.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação** - Infiltração de água no solo. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa. 1995. 657 p.

BERTOL, I.; BEUTLER, J. F.; LEITE, D.; BATISTELA, O. Propriedades físicas de um cambissolo húmido afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Science Agricola**, Piracicaba, v. 58, p. 555-560, 2001.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J.; ZOLDAN JÚNIOR, W. A. 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, p. 155-163, 2004.

BEULTER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 6, p. 575-580, jun. 2004.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G. Relações entre alguns atributos físicos do solo e a produção de grãos de soja e arroz de sequeiro em latossolos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 34, p. 365-371, mar-abr 2004.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Matéria seca das plantas de soja e arroz em função do grau de compactação e do teor de água em latossolos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 1, p. 142-149, jan/abr.2004a.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 581-588, 2004b.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, p. 849-856, 2003.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; SILVA, L. M. Utilização dos penetrômetros de impacto e de anel dinamométrico em latossolos. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, n. 2, p. 191-199, mai. 2002.

BEUTLER, A. N. et al. Resistência à penetração e permeabilidade de latossolo vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p.167-177, 2001.

BORGES, E. N.; LOMBARDINETO, F.; CORRÊA, G. F.; BORGES, E. V. S. Alterações físicas introduzidas por diferentes níveis de compactação em Latossolo Vermelho-Escuro textura média. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 6, p. 575-580, jun. 1999.

BORGES, E. N.; NOVAIS, R. F.; REGAZZI, A. J. Resposta de variedades de soja à compactação de camadas do solo. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 35, n. 202, p. 553-568, 1988.

CAMARGO, O. A., ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: Esalq, 1997. 132 p.

CAMPOS, B. C.; REINERT, D. J.; NICOLODI, R.; RUEDELL, J.; PETRERE, C. Estabilidade estrutural de um latossolo vermelho-escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, p. 121-126, 1995.

CANARACHE, A. Penetrografe – a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 6, p. 51-70, 1990.

CARLESSO, R.; SANTOS, R. F. Limite crítico de disponibilidade de água no solo às plantas de milho cultivadas em solos de diferentes texturas. In:

CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26, 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Disponível em: <www.ufsm.br/ppgcs/congressos/XXVIcongresso_brasileiro.htm> Acesso em: 12/011/2005.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de latossolos roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, p. 99-105, 1990.

CATERPELLAR- Informações técnicas de máquinas. [www:brasil.cat.com/cda](http://www.brasil.cat.com/cda). Acesso a Internet: 12 agosto de 2005.

CINTRA, F. L. D.; MIELNICZUK, J. Potencial de algumas espécies vegetais para a recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, p. 197-201, 1983.

CINTRA, F. L. D.; MIELNICZUK, J. SCOPEL, I. Caracterização do impedimento mecânico em um Latossolo Roxo do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, p. 323-327, 1983.

CORSINI, P. C.; FERRAUDO, A. S. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em latossolo roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 2, p. 289-298, fev. 1999.

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas de plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v27, p.527-535, 2003.

DIAS JÚNIOR, M. S.; MIRANDA, E.É.V. de. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de Lavras (MG). **Ciências Agrotec.**, Lavras, v. 24, n. 2, p. 337-346, abr/jun. 2000.

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

EDWARDS, W. M. Predicting tillage effects on soil. Physical properties and processes. Predicting tillage effects on infiltration. **ASAE Special Publication**, Madison, n. 44, p. 106-115, 1982.

EHLERS, W. Observation on earthworm channels in infiltration on tilled and untilled losses of soil. **Soil Science**, Baltimore, v. 11, p. 242-249, 1985.

ELTZ, F. L. F. Ensino de plantio direto. In PEIXOTO, R T. O.; AICRENS, D. C.; SAMAICA, M. J. **Plantio direto: o caminho para uma agricultura sustentável**. Ponta Grossa: IAPAR- PRP/PG, 1997. p. 39-42.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília: EMBRAPA, 1999.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. **Manual de métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro, 1997. 99 p.

ERICKSON, A. E. Tillage effects on soil aeration. In: Predicting tillage effects on soil physical properties and processes. **ASA Special Publish**. American Society of Agronomy, Madison, v. 44, p. 91-104, 1982,

FERNANDEZ, E. M; CRUSCIOL, C. A. C.; THIMOTEO, C. M. S.; ROSOLEM, C. A. Matéria seca e nutrição da soja em razão da compactação do solo e adubação fosfatada. **Revista Científica**, São Paulo, v. 23, p. 117-132, 1995.

FERREIRA, F. P.; SILVA, V. R.; SECCO, D.; REICHERT, M.; REINERT, D. J. Condutividade hidráulica saturada, infiltração de água e compactação do solo

no sistema plantio direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E ÁGUA, 12, 2000, Ilhéus-BA, **Anais...** Ilhéus-BA: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 4-6.

FONTES, C. Z.; HERNANI, L. C.; SALTON, J. C. **Sistema plantio direto: o produtor pergunta a EMBRAPA responde.** Brasília: EMBRAPA Produção da Informação; Dourados: EMBRAPA Agropecuária Oeste, 1998. 248 p. (Coleção 500 perguntas, 500 respostas).

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, 2005.

GABRIEL FILHO, A. **Influência da variação de algumas propriedades físicas do solo no desenvolvimento radicular de plantas de eucalipto.** Botucatu, 1992. 70 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, 1992.

GENRO JÚNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 487-484, 2004.

GENRO JÚNIOR, S. A. **Alteração da compactação do solo com o uso de rotação de culturas no sistema plantio direto.** Santa Maria, 2002. 90 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, 2002.

GIMENEZ, D.; ALLMARAS, R. R.; HUGGINS, D. R.; NATER, E. A. Prediction of the saturated hydraulic conductivity-porosity dependence using fractals. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 61, p. 285-1292, 1997.

GOEDERT, W. J; SCHERMACK, M. J.; FREITAS, F. C de. Estado de compactação do solo em áreas cultivadas no sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, p. 223-227, fev. 2002.

GONZALEZ, F. L. **Morfologie propriétés physiques et conditions de formation des éléments structurés de la couche labourée**: contribution à l'interprétation du profil cultural. Paris, 1991, 133 f. These (Doctorat Ingénierie Agronomique) - Institut National Agronomique.

QUEIROZ-VOLTAN, R. B.; NOGUEIRA, S. S. S.; MIRANDA, M. A. C. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, p. 929-938, 2000.

GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. Compactação do solo na cultura do arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 4, p. 703-707, 2001.

GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. II: Efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 6, n. 2, p. 213-218, 2002.

HANKASSON, I.; VOORHEES, W. B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W. H.; VALENTINE, C.; STEWARD, B. A. **Methods for assessment of soil degradation**, Boca Raton: CRS Press, 1998. p. 167-179. (Advances on Soil Science).

HERNANI, L. C.; SALTON, J. C. Milho: informações técnicas. CENTRO DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DO OESTE. **Manejo e conservação de solos**. Dourados: EMBRAPA PA/CPAO, 1997. p.39-37. Circular Técnica, 5.

HILL, R. L. Long term conventional and no-tillage effects on selected soil physical properties. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 54, p. 161-166, 1990.

HILLEL, D. **Solo e água**: fenômenos e princípios físicos. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1970. 231 p.

HOEFT, R. G. Desafios para a obtenção de altas produtividades de milho e de soja nos EUA. **Potafos - Informações Agronômicas**, Piracicaba, n.104, 4 p. dez. 2003.

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

HORN, R.; WAY, T.; ROSTEK, J. Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. **Soil & Tillage Research**, Auburn, Al, USA, v. 73, p. 101-106, 2003.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Aplicações de curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, p. 1493-1500, 2000.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL - IPARDES. **Avaliação de impacto do Paraná rural**. Subprograma de manejo e conservação do solo- 1ª fase. Curitiba. v. 5, 1990, 204 p.

ISMAIL, I.; BLEVINS, R. L.; FRYE, W. W. Long-term no tillage effects on soil properties and continuous corn yield. **Soil Science American Journal**, Madison, v. 58, p. 193-198, 1994.

KAISER, D. R.; KUNZ, M.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SANTI, G.; STRECK, C. A. Compactação do solo e suas relações no desenvolvimento radicular e produtividade do feijoeiro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 28, n.3, p. 287-289. 1998. (Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria).

KERTZMANN, F.F. **Modificações na estrutura e no comportamento de um latossolo Roxo provocados pela compactação**. São Paulo - SP, 1996. 153 f. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. Relações solo-planta. São Paulo, Ceres, 1979. 262 p.

KLUTHCOUSKI, J. FANCELLI, A. L.; DOURADO-NETO, D.; RIBEIRO, C. M.; FERRARO, A. L. Manejo do solo e o rendimento de soja, milho, feijão e arroz em plantio direto. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 57, n. 1, p. 97-104, 2000.

KOPI, A. J.; DOUGLAS, J. T. a rapid inexpensive and quantitative procedure for assessing soil structure with respect to cropping. **Soil Use and Management**, Austrália, v. 7, p. 52-56, 1991.

KOOISTRA, M. J.; SCHOONDERBEEK, D.; BOONE, F. R.; VEEN, B. W.; VAN NOORDWIJK, M. Root soil contact of maize as measured by a thin-section technique. II. Effects of soil compactation. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 138, p. 119-129, 1992.

LANDERS, J. N. **Fascículo de experiências de plantio direto no cerrado**. Goiânia: APDC, 1995. 261 p.

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

LETEY, J. The study of soil structure: science or art. **Aust. Journal Soil**, Australia, v. 29, p. 699-707, 1991.

LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compactation effects o soil physicals properties and crop growth. **Geoderma**, Arizona v. 116, p. 107-136, 2003.

LOWERY, B.; SCHULER, T. T. Duration and effects of campaction on soil and plant growth in Wisconsin. **Soil Tillage Research**, Auburn, v. 29, p. 205-210, 1994.

MANTOVANI, E. C. **Compactação do solo**: Informação Agropecuária. Belo Horizonte, v. 13, 1987. 147 p.

MARQUEZ, L.; JEVENOS, J.; LINARES, P. **El efecto de la huella del neumático sobre las propiedades físico-mecánicas de los suelos**. Madrid: Laboreo, 1991. 198 p. (Apuntes didácticos). Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Madrid

MASCHIO, J. **Plantio direto consolida revolução no campo**. Faculdade de Ilha Solteira - UNESP. Departamento de fitossanidade e engenharia rural de solos. Disponível: www.agr.feis.unesp.br/. Acesso em: 06 de abril de 2005.

MATZENAUER, R.; BARNI, N. A.; MACHADO, F. A.; ROSA, F. S. Análise agroclimática das disponibilidades hídricas para a cultura da soja na região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 2, p. 263-275, 1998.

MAZIERO, J.V.G.; MIALHE, L.G.; CORRÊA, I.M.; YANAY, D.; MENEZES, J.F. Efeito da patinação da roda motriz de um trator agrícola na compactação do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 56, n. 1, p.1-11, 1997.

MEROTTO JÚNIOR, A.; MUNDSTOCK, C. M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 23, p.135-143, 1999.

MILANI, D. I. C. **Variabilidade espacial da infiltração de água e de atributos físicos em um Latossolo sob sistema plantio direto**. Cascavel, 2005. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

MORAES, M. H.; BENEZ, S. H. Efeitos de diferentes sistemas de preparo do solo em algumas propriedades físicas de uma terra roxa estruturada e na produção de milho para um ano de cultivo. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal v. 16, n. 2, p. 31-41, dez.1996.

MOURA FILHO, W.; BUOL, S. W. Studies of latossol roxo in Brazil. **Esperientiae**, Viçosa, v. 13, p. 201-234, 1972.

NAKAGAWA, J.; GASPAR, C. C.; SANTOS, J. R.; CARDOSO, C. L.; BICUDO, S. J. Qualidade de sementes de trigo e de soja em função de sistemas de preparo de solo e da sucessão de culturas. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 25, n. 1, p. 73-80, 2003.

NELSON, R. G. Investigation of frequency and moisture content effects pm deformation characteristics of soils. **ASAE Paper**, California, n. 93, 152 p. mar 1993.

NOVAK, L. R.; MANTOVANI, E. C.; MARTIN, P. J.; FERNANDES, B. Efeito do tráfego de trator e da pressão de contato pneu/solo na compactação de um latossolo vermelho àlico, em dois níveis de umidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 27, p. 1587-1595, dez. 1992.

ORGANIZAÇÃO DAS COOPERATIVAS DO ESTADO DO PARANÁ – OCEPAR. **Custo de produção** - Plantio direto de aveia, milho, trigo e soja. Curitiba. Ocepar, ago 1989. p. 1-30 (Boletim técnico).

PABIN, J.; LIPIEC, J.; WLODEK, S.; BISKUPSKI, A.; KAUS, A. Critical soil bulk density and strength for pea deedlling root growth as related to order soil factors. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 46, p. 203-208, 1998.

PAGLIAI, M.; MARSILI, A.; SERVADIO, P.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Changes in some physical properties of a clay soil in Central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of médium power. **Soil & Tillage Research**, Amsterdan, v. 73, p. 119-129. 2003.

PAULETTI, V.; LIMA, M. R.; BARCIK, C.; BITTENCOURT, A. Rendimento de grãos de milho e soja em uma sucessão cultural de oito anos sob diferentes sistemas de manejo de solo e de culturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 3, mai/jun 2003.

PEDROTTI, A.; DIAS JÚNIOR, M. S. Compactação do solo: como evitá-la. **Agropecuária Catarinense**, Santa Catarina, v. 9, p. 50-52, 1996.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E. A.; CRESTANA, S.; FERREIRA, M. M.; DIAS JUNIOR, M. S.; GOMES, A. S.; TURATTI, A. L. Resistência mecânica à penetração de um planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 521-529, 2001.

PEIXOTO, R. T. Manejo orgânico da fertilidade do solo no sistema de plantio direto. In: **Plantio direto: O caminho para a agricultura sustentável**. Ponta Grossa, PR, 1997. p. 186-205.

PELLEGRINI, A.; BARRETO, U. F. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; CUBILLA, M. M.; KUNZ, M. Crescimento e produtividade da cultura do feijoeiro sob diferentes sistemas de manejo do solo. REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DE SOLO E DE ÁGUA, 13, 2000, Ilhéus. **Anais...** Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2000.

PRADO, R. M.; TORRES, J. L. ROQUE, C. G.; COAN, O. Sementes de milho sob compressão do solo e profundidade de semeadura: influência no índice de velocidade de emergência. **Scientia Agrária**, São Paulo, v. 18, p. 45-49, 2001.

PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: agricultura em regiões tropicais**. 1 ed. São Paulo: Nobel, 1990. 549 p.

RAGHAVAN, G. S. V.; MICKYES, E. Physical and hydraulic characteristics in compacted clay soils. **Journal of Terramechanics**, Elmsford, v. 19, p. 235-242, 1983.

RALISCH, R.; TAVARES FILHO, J. Compactação: uma preocupação pertinente. **A Granja**, Porto Alegre, v. 64, p.53-57, 2002.

REEVES, D. W. Soil management under no-tillage: soil physical aspects. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DO SISTEMA PLANTIO DIRETO, 1, 1995,

Passo Fundo. **Resumos**. Passo Fundo: Embrapa-CNPT, 1995. p. 127-130. 1 CD-ROM.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Aplicações do ciclo da água na agricultura**. Infiltração de água do solo. 2 ed. São Paulo: Manole, 2004. 245 p.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R. **Propriedades físicas de solos em sistema plantio direto irrigado**. Santa Maria: Palloti, 2001, p. 114-133. v. 1.

RIBEIRO, M. A. V. **Resposta da soja e do eucalipto a fósforo em solos de diferentes texturas, níveis de densidade e de umidade**. Lavras, 1999. 71 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras.

ROSOLEN, C. A.; ALMEIDA, A. C. S.; SACRAMENTO, L. V. S. Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. **Bragantina**, Campinas, v. 53, n. 2, p. 259-266, 1994.

ROSOLEN, C. A.; FERNANDEZ, E. M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. A. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 54, n. 5, p. 821-828, 1999.

SANTOS, H. P.; REIS, E. M.; DERPSCH, R. Rotação de culturas. In: EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Trigo (Passo Fundo, RS). **Plantio direto no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa - CNPT/FUNDACEP/FECOTRIGO/Fundação ABC/Aldeia Norte, 1993. p. 85-103.

SANTOS, H. P.; LHAMBY, J. C. B.; PRESTES, A. M.; REIS, E. M. Características agronômicas e controle de doenças radiculares de trigo, em rotação com outras culturas de inverno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 3, p. 277-288, mar. 1998.

SECCO, D. **Estados de compactação de dois Latossolos sob plantio direto e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas**. Santa Maria, 2003. 108 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, 2003.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; DA ROS, C. O. 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, p. 797-804, 2004.

SECCO, D.; SILVA, V. R.; RUBIN, R. B.; REINERT, J. M.; REICHERT, J. M. Efeitos da compactação nos atributos do solo e na produtividade da cultura do trigo, em Latossolo vermelho sob sistema de plantio direto. In: BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DE SOLO E DE ÁGUA, 13, CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 26, 2000, Ilhéus, BA: 2000. **Anais...** Ilhéus, BA: 2000: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo. 1 CD-ROM.

SERVADIO, P.; MARSILI, A.; PAGLIAI, M.; PELLEGRINI, S.; VIGNOZZI, N. Effects on some clay soil qualities following the passage of rubber-tracked and wheeled tractors in central Italy. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, p. 143-155. 2001.

SHARMA, M. L.; LUXMOORE, R. J. Soil spatial variability and its consequences on simulated water balance. **Water Resources Research**, Arizona, v. 15, n. 5, p. 1567-1573, 1979.

SHIERLAW, F.; ALSTON, A. M. Effect of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 77, p. 15-28, 1984.

SIDIRAS, N.; HENKLAIN, J. C.; DERPSCH, R. Comparison of three different tillage system with respect to aggregate stability, the soil and water conservation and the yields of soybean and wheat on an oxisol. In: CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL SOIL TILLAGE RESEARCH ORGANIZATION, Osijek, 1982. **Proceedings...** Osijek, 1982. p. 537-544.

SIDIRAS, N.; ROTH, C. H.; FARIAS, G. S. Efeito da intensidade da chuva na degradação por impacto de gotas em três sistemas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 8, p. 251-254, 1984.

SILVA, V. R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. Santa Maria, 2003. 171 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria.

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

SILVA, R. H.; ROSOLEN, C. A. Influência da cultura anterior e da compactação na absorção de macronutrientes em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 10, p. 1269-1275, out. 2001.

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, MG, v. 4, p. 239-249, 2000a.

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

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetado pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 24, p. 191-199, 2000c.

SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. **Biologia e bioquímica do solo**. Universidade Federal de Lavras. Disponível em: <www.ambientebrasil.com.br>. Acesso em: 10 de abril de 2005.

SMUCKER, A. J. M.; ERICKSON, A. E. Tillage and compactive modifications of gaseous flow and soil aeration. In: LARSON, W. E.; BLAKE, G. R.; VOORHEES, W. B.; BEEMSTER, G. T.S.; MASLE, J.; WILLIAMSON, R. E.; FARQUHAR, G. Effects of soil resistance to root penetration on leaf expansion in wheat (*Triticum aestivum* L.): Cinematic analysis of leaf elongation. **Journal of Experimental Botany**, London, v. 7, p. 1663-1678, 1996.

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

SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C. Soil compaction problems in words agriculture. In: -----. Soil compaction in crop productions. **Developments in Agricultural Engineering**, Elsevier: Amsterdam, 1994. 662 p. v. 11.

SOANE, B. D.; BALL, B. C. Review of management and conduct of long-term tillage studies with special reference to years experiment on barley in Scotland. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 45, n. 1, p. 17-37, 1998.

SOJKA, R. E. Stomatal closure in oxygen-stressed plants. **Soil Science**, Baltimore, v.154, p.269-280, 1992.

SOUZA, Z. M.; ALVES, M. C. Movimento de água e resistência à penetração em um Latossolo Vermelho distrófico de cerrado, sob diferentes usos e manejos, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 7, n. 1, p. 18-23, 2003.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 1, p. 83-91, jan. 1999.

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

STIRZAKER, R. J.; PASSIOURA, J. B.; WILMS, Y. Soil structure and plant growth: impact of bulk density and biopores. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 185, p. 151-162, 1996.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. C.; QUIMARÃES, M. F.; FONSECA, I. C. B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em latossolo roxo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 25, p. 725-730, 2001.

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

TIEPPO, R. C. Desenvolvimento de um penetrômetro manual eletrônico. Cascavel 2004. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agroindustriais) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

TORDIN, C. In: EMBRAPA. **Meio Ambiente e Agricultura**. <www.embrapa.br>. Acesso em: 10 de abril 2004.

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

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciado por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 301-309, 1998.

VANZELA, L. S.; ANDRADE, M. C. M. **Manejo de irrigação via solo**. <www.org.feis.unesp.br/manejoirrigacao>. Acesso em: 12 de agosto de 2005.

WANG, J.; KESKETH, J. D.; WOOLLEY, J. T. Preexisting channels and soybean rooting patterns. **Soil Science**, Baltimore, v. 141, p. 432-437, 1986.

WEAICH, K., BRISTOW, K. L., CASS, A. Preemergent shoot growth of maize under different drying conditions. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 56, p. 1272-1278, 1992.

WEIRICH NETO, P. H.; ROSA, A. L.T.; GOMES, J. A. Suscetibilidade de dois tipos de solo à compactação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 349-353, 2002.

WIERMANN, C.; WERNER, D.; HORN, R; ROSTEK, J.; WENER, B. Stress/strain processes in a structured silty loam Luvisol under different tillage treatments in Germany. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, p. 117-128, 2000.

YUSUF, R. I.; SIEMENS, J. C.; BULLOCK, D. G. Growth analysis of soybean under no tillage and conventional tillage systems. **Agronomy journal**, Madison, v. 91, n. 6, p. 928-933, 1999.

APÊNDICES

APÊNDICE A - POPULAÇÃO E ESTATURA DE PLANTAS DE TRIGO**Tabela 1A** - População final e estatura final de plantas de trigo

TRATAMENTOS	POPULAÇÃO FINAL	ESTATURA
T0	4 340000 a*	75,54 b*
T1	4 705882 a	83,64 a
T3	3 895294 b	77,24 ab
T5	3 549411 b	82,14 a
CV (%)	17,54	6,23

NOTA: * - Médias de tratamentos seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste t- Student ($P > 0,05$)

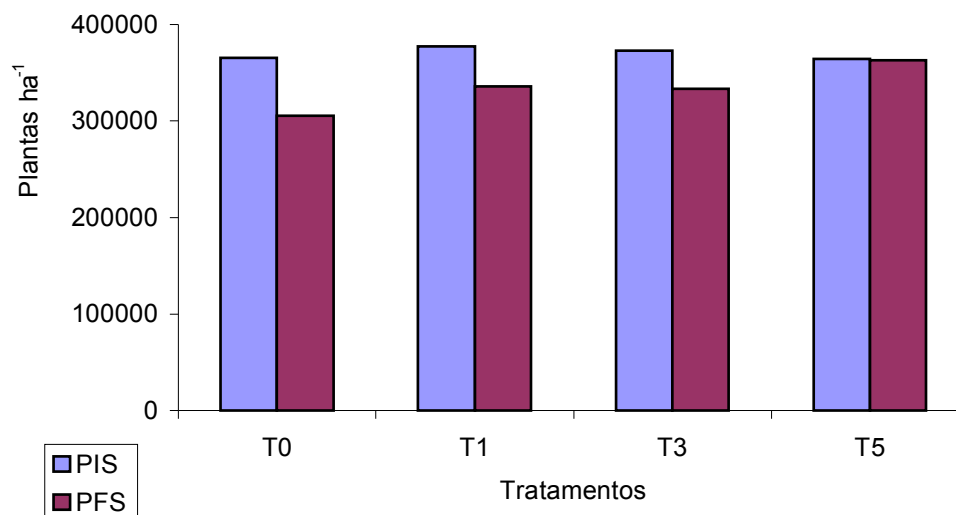
APÊNDICE B - POPULAÇÃO DE PLANTAS DE SOJA E TRIGO

Figura 1B - População inicial (PIS) e população final (PFS) de plantas de soja em quatro estados de compactação do solo.

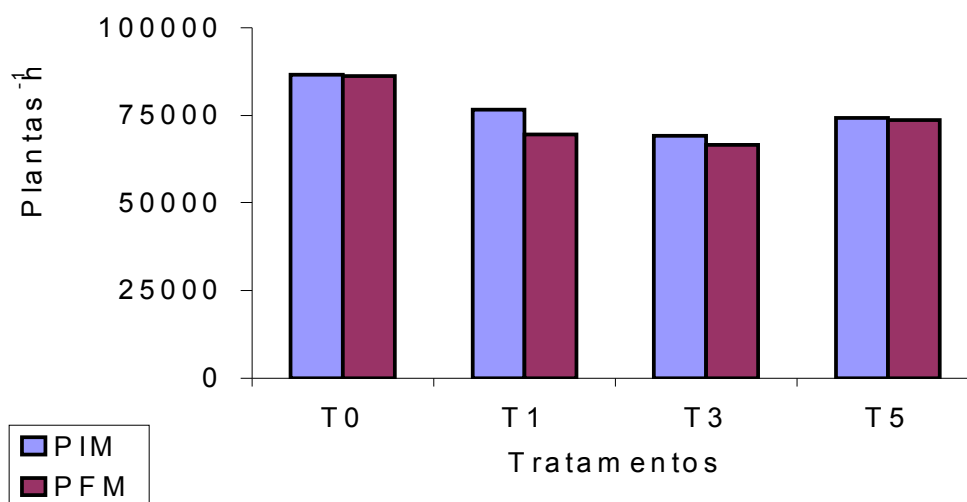


Figura 2B - População inicial (PIM) e população final (PFM) de plantas da cultura do milho em quatro estados de compactação do solo.