

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

**ATRIBUTOS FÍSICOS, SISTEMA RADICULAR E SUAS
RELAÇÕES COM A PRODUTIVIDADE DE MILHO EM
LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRICO
SUBMETIDO À COMPACTAÇÃO INDUZIDA**

ANDERSON CRISTIAN BERGAMIN

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2009**

**ATRIBUTOS FÍSICOS, SISTEMA RADICULAR E SUAS
RELAÇÕES COM A PRODUTIVIDADE DE MILHO EM
LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRICO SUBMETIDO À
COMPACTAÇÃO INDUZIDA**

ANDERSON CRISTIAN BERGAMIN
Engenheiro agrônomo

Orientador: PROF. DR. ANTONIO CARLOS TADEU VITORINO

Dissertação apresentada à Universidade
Federal da Grande Dourados, como parte
das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Agronomia – Produção
Vegetal, para obtenção do título de Mestre.

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2009

**ATRIBUTOS FÍSICOS, SISTEMA RADICULAR E SUAS RELAÇÕES COM A
PRODUTIVIDADE DE MILHO EM LATOSSOLO VERMELHO
DISTROFÉRICO SUBMETIDO À COMPACTAÇÃO INDUZIDA**

por

Anderson Cristian Bergamin

Dissertação apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de
MESTRE EM AGRONOMIA

Aprovado em: 19/02/2009

Prof. Dr. Antonio Carlos Tadeu Vitorino
Orientador – UFGD/FCA

Prof. Dr. Cristiano Márcio A. de Souza
Co-Orientador – UFGD/FCA

Profa. Dra. Beatriz Lempp
UFGD/FCA

Prof. Dr. Geraldo César de Oliveira
UFLA

“Nem tudo que se quer expressar é possível com gestos, atos ou palavras.”

DEDICO.

Aos meus pais Santo Bergamin e Inêz Aparecida Serafim Bergamin, ao meu irmão e companheiro de profissão Éverton Marcos Bergamin, e meu sobrinho Matheus Felipe Ketes Bergamin que embora distantes, não deixaram faltar carinho e incentivo na realização deste trabalho. Eternamente grato pela força, inspiração e existência. Amo todos vocês!!!!!!

OFEREÇO.

Meu orientador Antonio Carlos Tadeu Vitorino e meu co-orientador Cristiano Márcio Alves de Souza.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pelo dom da vida e por tantas realizações.

Ao meu orientador Prof. Antonio Carlos Tadeu Vitorino “Totó”, pela presença, amizade, confiança e profissionalismo. Muito obrigado pela sua orientação e ensinamentos.

Ao meu co-orientador Prof. Cristiano Márcio Alves de Souza pelas sugestões, ensinamentos, e amizade.

Ao programa de Pós-Graduação em Agronomia da UFGD, pela oportunidade, e a secretária Lúcia pela atenção e paciência.

A CAPES, pela bolsa concedida.

A Embrapa Agropecuária Oeste, em especial ao funcionário Ilson França Soares “Sabonete”.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia da UFGD, pelo aprimoramento no conhecimento.

À banca examinadora de Qualificação pelas sugestões.

Aos sempre amigos Fábio Régis de Souza e Luciano dos Reis Venturoso, que me ajudaram em todas as etapas deste trabalho, e são meus companheiros desde a graduação em Agronomia pela Universidade Federal de Rondônia.

Ao amigo Milson Evaldo Serafim que me incentivou a buscar novos conhecimentos por meio da Pós-Graduação.

Aos amigos de Pós-Graduação, Anísio da Silva Nunes, Bruno Tomazini, Carolina Tirloni, Carmem Pezarico, Danilo Fortes, Evandro Gelain, Fábio Stefanello, Leandro de Souza Carvalho, Rafael Doreto, em especial a Raquel Bonacina Vitorino, que além de companheira na turma de mestrado e esposa de meu orientador, recebeu uma árdua tarefa de ser minha segunda “mãe”; e Lenita Conus que sempre me ajudou e incentivou para que mais esta etapa fosse vencida.

Aos alunos de graduação Carla Carducci, Marcos Garbiati, Thais Cremon, Afonso, Igor, Andréia Parra e Francisca pela amizade e apoio na execução da pesquisa.

Aos funcionários da UFGD “Seu Jesus”, “Seu Moacir”, Nilton “Niltinho”, Elda, Mari, Nilda, Eva “Tia Eva” e Bruno.

Aos amigos de Rondônia em especial Suelen Reis Furtado, Daniel Valadão Júnior “Bob” e Franciele Caroline Valadão “Carol” pelo incentivo e apoio, e acima de tudo pelo exemplo de pessoas que são.

Aos amigos de Dourados em especial aos companheiros e moradores da República Rondônia, Danilo “Japonês” e Alexandre “Negão”.

A toda minha Família.

A todos, próximos ou distantes que, de alguma forma contribuíram para que esses momentos fossem vividos.

Muito obrigado!!!!

SUMÁRIO

	PÁGINA
RESUMO GERAL	viii
ABSTRACT	ix
1 INTRODUÇÃO GERAL	1
2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	4
3 ARTIGO 1	5
COMPACTAÇÃO DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO INDUZIDA PELO TRÁFEGO DE TRATOR E SUA RELAÇÃO COM O SISTEMA RADICULAR DO MILHO.	5
3.1 Resumo.	5
3.2 Abstract.	6
3.3 Introdução	7
3.4 Material e métodos.	9
3.5 Resultados e discussões.	13
3.6 Conclusões	24
3.7 Referências bibliográficas	25
4 ARTIGO 2	29
ATRIBUTOS FÍSICOS E INDICADORES DE QUALIDADE EM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO COM COMPACTAÇÃO INDUZIDA, E SUAS RELAÇÕES COM A PRODUTIVIDADE DE MILHO.	29
4.1 Resumo.	29
4.2 Abstract.	30
4.3 Introdução	31
4.4 Material e métodos.	34
4.5 Resultados e discussões	38
4.6 Conclusões.	50
4.7 Referências bibliográficas	51
5 ARTIGO 3.	54
ESTRUTURA ANATÔMICA DE RAÍZES DE MILHO CULTIVADO EM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO COM COMPACTAÇÃO INDUZIDA PELO TRÁFEGO DE TRATOR	54
5.1 Resumo.	54
5.2 Abstract	55
5.3 Introdução	56
5.4 Material e métodos.	59

5.5 Resultados e discussões	63
5.6 Conclusões	71
5.7 Referências bibliográficas	72
6 CONCLUSÕES GERAIS.	76

ATRIBUTOS FÍSICOS, SISTEMA RADICULAR E SUAS RELAÇÕES COM A PRODUTIVIDADE DE MILHO EM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRICO SUBMETIDO À COMPACTAÇÃO INDUZIDA

RESUMO

A compactação dos solos agrícolas em decorrência da intensificação da agricultura com elevado tráfego de máquinas, tem se tornando nos últimos anos, fator limitante ao desenvolvimento das plantas de milho, podendo causar modificações morfológicas e anatômicas nas raízes destas plantas. Assim, este trabalho teve por objetivo avaliar as alterações nos atributos físicos do solo, no crescimento radicular e produtividade do milho e os aspectos anatômicos das raízes, quando submetidos aos efeitos de diferentes estados de compactação, provocadas por passadas dos rodados de um trator agrícola. O estudo foi realizado na área da Fazenda Experimental de Ciências Agrárias da UFGD, no município de Dourados, MS. O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados, com cinco repetições. Os tratamentos foram constituídos por estados induzidos de compactação, sendo: PD – condição atual que reflete o histórico de oito anos de plantio direto; plantio direto com compactação adicional por tráfego de trator em uma (PDc1); duas (PDc2), quatro (PDc4) e seis passadas (PDc6). Houve uma redução na macroporosidade e porosidade total do solo; e aumento da densidade do solo, resistência do solo à penetração e umidade volumétrica, com o aumento na compactação do solo até a profundidade de 0,10 m. A microporosidade do solo não foi afetada pela compactação adicional. Analisando o sistema radicular do milho foram observados reduções nos valores de diâmetro, comprimento e superfície radicular, ocorrendo um decréscimo de 85% no comprimento radicular do milho comparando o PD com o PDc6. Foi observada correlação significativa ($p < 0,01$) entre todos os atributos físicos do solo estudados, sendo que a produtividade de milho se correlacionou de forma positiva com a macroporosidade, e negativa, com a resistência do solo à penetração, diâmetro médio geométrico e diâmetro médio ponderado de agregados. Quanto aos dados da cultura do milho, foram observados que o índice de velocidade de emergência, diâmetro do colmo, altura de plantas, massa de grãos e produtividade de grãos de milho foram reduzidos com o aumento da compactação do solo. Analisando a anatomia das raízes de milho, foi verificado um aumento na razão entre o córtex e o cilindro vascular da raiz com o aumento na compactação do solo. Essa razão correlacionou-se de modo significativo e negativo com a macroporosidade e, positivo com a densidade do solo e resistência do solo à penetração. Os atributos físicos avaliados, principalmente a resistência do solo à penetração e a macroporosidade, revelam o estado de compactação do solo, dessa forma podem ser utilizados como indicadores primários da qualidade física do solo, e possuem correlação com a razão entre a espessura do córtex e do cilindro vascular das raízes de milho.

Palavras-chave: tráfego de trator, plantio direto, comprimento radicular, anatomia de raiz, *Zea mays* L.

PHYSICAL ATTRIBUTES, ROOT SYSTEM AND ITS RELATIONS WITH THE PRODUCTIVITY OF MAIZE IN RED LATOSOL SUBMITTED TO COMPACTION INDUCED

ABSTRACT

Compaction of agricultural soils due to intensive farming with high traffic of agricultural machinery, has become in recent years, limiting factor for the development of maize plants and can cause morphologic and anatomic changes in roots of plants. This study aimed to evaluate changes in physical attributes of soil, root growth and yield of maize and anatomical aspects of the roots when subjected to the effects of different states of compaction induced by traffic of a tractor agricultural. The study was conducted in the field, in the Experimental Farm of Agricultural Sciences, Federal University of Grande Dourados, in Dourados, MS. The experimental design was randomized blocks with five replications. The treatments consisted of induced states of compaction, with: PD - current condition that reflects the history of eight years of no-tillage system, no-tillage with additional compaction by tractor traffic in one (PDc1), two (PDc2), four (PDc4) and six passes (PDc6). There was a reduction in macroporosity and total porosity of soil; and the soil density, soil resistance to penetration and volumetric moisture until 0.10 m depth. The soil microporosity was not affected by additional compaction. There were reductions in diameter, length and root surface values, with a decrease of 85% in root length comparing no-tillage system with PDc6. There was significant correlation between all the physical attributes of the soil studied. The yield of maize showed a positive correlation with the macroporosity and negative, with the soil resistance to penetration and aggregate stability. The index of emergence speed, the stem diameter, plant height, grain mass and grain yield of maize were reduced with increasing soil compaction. Looking at the anatomy of roots of maize, was observed a increase in the ratio between the cortex and vascular cylinder of the root with the increase in soil compaction. This ratio showed a negative correlation with the macroporosity and positive, with the soil resistance to penetration and soil density. The physical attributes evaluated, especially the soil resistance to penetration and macroporosity, reveal the state of soil compaction and can be used as primary indicators of soil physical quality, and has also correlated with the ratio between the thickness of the cortex and vascular cylinder the roots of maize.

Index terms: tractor traffic, no-tillage system, root length, anatomy of root, *Zea may* L.

INTRODUÇÃO GERAL

Na agricultura brasileira, o milho ocupa lugar de destaque na produção de grãos, sendo grande parte desta produção originada de cultivos realizados sob o sistema plantio direto. Dentre todos os cereais cultivados no país, o milho na safra 2007/2008, apresentou a segunda maior produção, com cerca de 58,6 milhões de toneladas de grãos, em uma área de aproximadamente 15 milhões de hectares (CONAB, 2009).

Pelas suas características fisiológicas e genéticas o milho tem alto potencial produtivo. No entanto, a produtividade média nacional é baixa, com aproximadamente $3,5 \text{ Mg ha}^{-1}$, demonstrando a existência de fatores do sistema de produção com ação limitante ao desempenho da cultura.

No sistema plantio direto a semeadura é feita sem preparo do solo, mantendo os restos culturais na superfície (LLANILLO et al., 2006). No entanto, a ausência de preparo (BEUTLER et al., 2007), associada à maior intensidade de uso da terra, expõe o solo a intenso tráfego de máquinas e contribui para alterar a qualidade estrutural do solo, aumentando a compactação sob o sistema plantio direto (COLLARES, 2005), principalmente em solos com elevados teores de argila (SECCO, 2003).

A compactação dos solos agrícolas nos últimos anos vem se tornando fator limitante ao aumento da produtividade e a sustentabilidade dos sistemas produtivos (SILVA, 2003). A causa desta compactação é o uso de máquinas nas operações de cultivo (RAPER, 2005), sendo ocasionada pela pressão, vibração e pela patinação dos rodados do trator (HORN et al., 1995). Para Radford et al. (2001) a compactação do solo é a principal causa da degradação do solo.

O tráfego de máquinas altera a qualidade física do solo que se acentua com a intensidade de passadas da máquina, afetando assim, o crescimento e desenvolvimento das plantas, diminuindo a produtividade no decorrer dos anos e aumentando os custos de produção.

Solos submetidos à compactação sofrem mudanças na dinâmica da água no solo; na porosidade total; no número e tamanho de poros; na temperatura e resistência do solo à penetração. Alterações nesses atributos devido à compactação do solo, na maioria das vezes, atuam negativamente sobre o desenvolvimento das plantas,

diminuindo o crescimento das raízes, reduzindo a absorção de água e nutrientes, e a difusão dos nutrientes no solo (SECCO, 2003), comprometendo a produtividade.

Com diminuição do espaço poroso do solo, principalmente de macroporos, decorrente da compactação, há menos oxigênio disponível às raízes. A redução dos macroporos interfere na capacidade de armazenamento e disponibilidade de água no solo, onde as raízes apresentam modificações morfológicas (GUIMARÃES e MOREIRA, 2001), podendo também ocorrer alterações anatômicas, visando minimizar os efeitos do menor volume de solo explorado pelo reduzido sistema radicular.

Alguns trabalhos, principalmente em ambiente controlado, têm mostrado os efeitos da compactação do solo sob a morfologia de raízes de milho, mas praticamente não há estudos quanto à anatomia de raiz. É preciso analisar a anatomia de raízes para se entender, quais são os mecanismos que a planta utiliza para sobreviver e produzir, quando cultivada sob limitações impostas pela compactação do solo.

Pouco se conhece sobre a influência do aumento do estado de compactação, na relação com os atributos físicos do solo, com o desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea do milho. Sabe-se que limitações ao crescimento e desenvolvimento das plantas causadas pela variação desses atributos, provocados pelo inadequado manejo da agricultura, remetem ao decréscimo da produtividade da cultura. Mesmo com os mecanismos de adaptação às adversidades ambientais que a planta possui, os condicionantes impostos pela compactação do solo alcançam situações críticas e até impeditivas do crescimento da planta (COLLARES, 2005).

Os processos que envolvem o manejo de plantas submetidas às variações ambientais, especificamente a compactação do solo, devem ser mais estudados, principalmente seus efeitos e suas relações com o sistema radicular, especialmente a anatomia de raiz e a produtividade de milho.

Assim sendo, este trabalho teve por objetivo avaliar as alterações nos atributos físicos do solo, no crescimento radicular e produtividade do milho e os aspectos anatômicos das raízes, quando submetidos aos efeitos de diferentes estados de compactação, provocadas por passadas dos rodados de um trator agrícola.

Este trabalho encerra três artigos, todos realizados em Latossolo Vermelho Distroférico de textura muito argilosa, analisando diferentes estados de compactação do solo induzidas pelo tráfego de um trator. No primeiro é descrito a influência dos estados de compactação, sobre a densidade, porosidade, resistência do solo à penetração e estabilidade de agregados, bem como as conseqüências sobre o crescimento radicular

da cultura do milho. O segundo envolve as relações entre os atributos físicos do solo, e destes com a produtividade do milho; além de determinar indicadores da qualidade física do solo. O terceiro avalia a estrutura anatômica das raízes de milho e sua relação com os atributos físicos do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P da C.; LEONEL, C.L.; SÃO JOÃO, A. de C.G.; FREDDI, O. da S. Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação e da qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.6, p.1223-1232, 2007.

COLLARES, G.L. **Compactação em Latossolos e Argissolo e relação com parâmetros de solo e de plantas**. 2005. 105 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Avaliação da safra agrícola de grãos 2008/2009: quarto levantamento**. Brasília, 2009. 39p. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/4_levantamento_jan2009.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2009.

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

HORN, R.; DOMZAL, H.; SLOWNISKA-JURKIEWICZ, A.; OUWERKERK, C. van. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and environment. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.35, p.23-36, 1995.

LLANILLO, R.F; RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; GUIMARÃES, M. de F.; FERREIRA, R.R.M. Evolução de propriedades físicas do solo em função dos sistemas de manejo em culturas anuais. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.27, n.2, p.205-220, 2006.

RADFORD, B.J.; YULE, D.F.; McGARRY, D.; PLAYFORD, C. Crop responses to applied soil compaction and to compaction repair treatments. **Soil & Tillage Research**, v.61, p.157-166, 2001.

RAPER, R.L. Agricultural traffic impacts on soil. **Journal of Terramechanics**, v.42, n.3-4, 259–280, 2005.

SECCO, D. **Estados de compactação e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas em dois Latossolos sob plantio direto**. 2003. 105 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS.

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

ARTIGO 1

COMPACTAÇÃO INDUZIDA DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRICO E SUAS RELAÇÕES COM O CRESCIMENTO RADICULAR DO MILHO

RESUMO

A compactação dos solos agrícolas em decorrência da intensificação da agricultura com elevado tráfego de máquinas, tem se tornando nos últimos anos, fator limitante ao desenvolvimento das plantas. Assim, o objetivo desse trabalho foi avaliar em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, cultivado em sistema plantio direto, a influência da compactação induzida pelo tráfego de um trator, sobre a densidade, porosidade, resistência do solo à penetração e estabilidade de agregados, bem como as conseqüências sobre o crescimento radicular da cultura do milho. O estudo foi realizado na área da Fazenda Experimental de Ciências Agrárias da UFGD, no município de Dourados, MS. O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados, com cinco repetições. Os tratamentos foram constituídos por estados induzidos de compactação, sendo: PD – condição atual que reflete o histórico de oito anos de plantio direto; plantio direto com compactação adicional por tráfego de trator em uma (PDc1); duas (PDc2), quatro (PDc4) e seis passadas (PDc6). Houve uma redução na macroporosidade e porosidade total do solo; e aumento da densidade do solo, resistência do solo à penetração e umidade volumétrica, com o aumento na compactação do solo até a profundidade de 0,10 m. A microporosidade do solo não foi afetada pela compactação adicional. Analisando o sistema radicular do milho foram observados reduções nos valores de diâmetro, comprimento e superfície radicular, ocorrendo um decréscimo de 85% no comprimento radicular do milho comparando o PD com o PDc6. A macroporosidade do solo é um bom indicador da qualidade do solo para avaliações de comprimento e superfície radicular.

Palavras-chave: atributos físicos, comprimento radicular, superfície radicular.

COMPACTION INDUCED OF A RED LATOSOL AND ITS RELATIONSHIP WITH MAIZE ROOT GROWTH

ABSTRACT

Compaction of agricultural soils due to intensive farming with high traffic of agricultural machinery, has become in recent years, limiting factor for the development of plants. The objective of this study was to evaluate in a Red Latosol, under no-tillage system, the influence of compaction induced by traffic of a tractor on the density, porosity, soil resistance to penetration and aggregates stability, and the consequences on the root growth of the corn crop. The treatments consisted of induced states of compaction, with: PD - current condition that reflects the history of eight years of no-tillage system, no-tillage with additional compaction by tractor traffic in one (PDc1), two (PDc2), four (PDc4) and six passes (PDC6). There was a reduction in macroporosity and total porosity of soil; and the soil density, soil resistance to penetration and volumetric moisture until 0.10 m depth. The soil microporosity was not affected by additional compaction. There were reductions in diameter, length and root surface values, with a decrease of 85% in root length comparing no tillage system with PDC6. The soil macroporosity is a good indicator of soil quality assessments for length and root surface.

Index terms: physical attributes, root length, root surface.

INTRODUÇÃO

O sistema de plantio direto vem sendo praticado por grande parte dos agricultores no Brasil, sendo a cultura do milho implantada principalmente neste sistema. Nesse sistema a semeadura é feita sem preparo do solo, mantendo os restos culturais na superfície e reduzindo a erosão (LLANILLO et al., 2006). No entanto, a ausência de preparo do solo (BEUTLER et al., 2007), associada à maior intensidade de uso da terra, expõe o solo a intenso tráfego de máquinas e contribui para alterar a qualidade estrutural do solo, o que acarreta aumento da compactação sob o sistema de plantio direto (COLLARES et al., 2006), principalmente em solos com elevados teores de argila (SECCO et al., 2004).

Nesse sistema pode ocorrer compactação superficial do solo (BEUTLER et al., 2001; TAVARES FILHO et al., 2001), observando aumentos significativos e prejudiciais da compactação para as plantas, principalmente até 0,20 m de profundidade (CARDOSO et al., 2006), sendo que, o maior estado de compactação é verificado próximo aos 0,10 m de profundidade (GENRO JUNIOR et al., 2004).

Estudos que relatam alterações significativas nos atributos físicos do solo em virtude do tráfego contínuo de máquinas pesadas, do não revolvimento do solo e do uso freqüente de equipamentos agrícolas em solo com umidade elevada são frequentes (STRECK et al., 2004) e a compactação ocasionada pelo tráfego de máquinas agrícolas é a principal causa da degradação física dos solos pela redução de seu espaço poroso (RAPER, 2005). Para Collares et al. (2006), em consequência da compactação, há uma alteração estrutural do solo ocorrendo a reorganização das partículas e de seus agregados, aumentando a densidade e resistência mecânica do solo à penetração, e reduzindo a macroporosidade, inibindo assim, o crescimento e o desenvolvimento radicular das plantas, sendo esta resposta das plantas mais facilmente observada, quando ocorre precipitação pluvial irregular no período de cultivo.

A resposta das principais culturas à compactação ainda não está completamente conhecida (COLLARES et al., 2008). Um aumento na compactação reduz o crescimento de raízes devido o aumento na resistência do solo à penetração, podendo ocasionar sérios problemas nos cultivos agrícolas por restringir o acesso das raízes a água e nutrientes, diminuindo a produção das culturas (CLARK et al., 2003). Alguns pesquisadores utilizam a resistência do solo à penetração e a densidade do solo

para avaliar efeitos dos sistemas de manejo do solo no sistema radicular (FREDDI et al., 2007; COLLARES et al., 2008). Entretanto, não tem sido possível estabelecer relações funcionais desses atributos com o crescimento do sistema radicular e a produção das culturas, pois estas são influenciadas pelas complexas interações entre ar-água-sólido, dificultando a obtenção de valores críticos ao desenvolvimento e produtividade das culturas (BEUTLER et al., 2004).

As pesquisas realizadas para obter respostas das plantas em diferentes estados de compactação, normalmente, têm sido realizadas em vasos, e podem não representar realmente as condições impostas pelo ambiente a campo ao desenvolvimento das plantas. Para Foloni et al. (2003) o crescimento radicular do milho em Latossolo Vermelho Distroférico de textura média, foi prejudicado em 50% quando a resistência do solo à penetração foi igual a 0,75 MPa e foi totalmente inibido quando esta chegou a 1,4 MPa. Tem sido utilizado o valor de 2,0 MPa como limite crítico de resistência do solo à penetração (TAYLOR et al., 1966), mas para Beutler et al. (2004) e Serafim (2007), este valor é questionável, sugerindo a necessidade de mais estudos.

Devido à grande dificuldade em avaliar a campo a compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas agrícolas, poucos estudos têm sido realizados. No entanto, é necessário conhecer os estados de compactação que reduzem o crescimento do sistema radicular das plantas, visando o uso do solo de forma eficiente e sustentável, minimizando os efeitos adversos da compactação do solo.

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar diferentes estados de compactação em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso em sistema plantio direto, induzidos pelo tráfego de um trator, por meio de atributos físicos e suas consequências sobre o sistema radicular da cultura do milho.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na área da Fazenda Experimental de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), no município de Dourados, MS, no ano agrícola de 2007/2008. O local situa-se em latitude 22°14'08"S, longitude de 54°59'13"W e altitude de 434 m. O clima é do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen. As precipitações pluviiais e temperatura média do ar obtidas durante o ciclo da cultura do milho são apresentadas na figura 1.

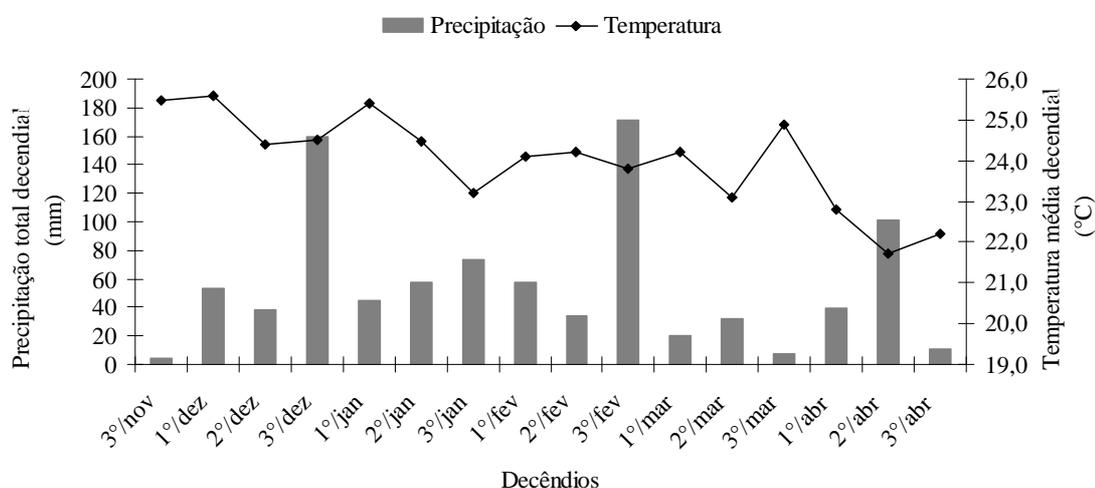


FIGURA 1. Precipitação pluviométrica total e temperatura média do ar em cada decêndio na área experimental, no período de novembro de 2007 a abril de 2008.

O solo foi um Latossolo Vermelho Distroférrico, cuja composição granulométrica, determinada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997) foi 644 g kg⁻¹ de argila, 203 g kg⁻¹ de silte e 153 g kg⁻¹ de areia nos primeiros 0,20 m. As características químicas foram: pH (H₂O) = 5,7; Ca²⁺ = 69,2 mmol_c dm⁻³; Mg²⁺ = 31,0 mmol_c dm⁻³; Al³⁺ = 0,0 mmol_c dm⁻³; H+Al³⁺ = 58,0 mmol_c dm⁻³; P = 7,0 mg dm⁻³; K = 5,1 mmol_c dm⁻³ e MO = 37 g kg⁻¹ (EMBRAPA, 1997).

O delineamento experimental foi de blocos casualizados com cinco repetições, e os tratamentos foram cinco estados de compactação: PD – Plantio direto sobre a condição atual que reflete o histórico do manejo de oito anos de plantio direto; PDc1, PDc2, PDc4 e PDc6 - Plantio direto com compactação adicional por tráfego de

trator em uma, duas, quatro e seis passadas, respectivamente. As parcelas mediram 5 m de comprimento e 3,6 m de largura, possuindo uma área total de 18 m².

A indução a compactação do solo foi realizada no dia 13 de novembro de 2007, dois dias após intensa precipitação pluvial, quando o solo possuía um conteúdo de água próximo à capacidade de campo de 0,28 kg kg⁻¹ na camada de 0,0-0,20 m de profundidade, determinado conforme proposto em Embrapa (1997). Foi utilizado um trator agrícola MF 292 (105 cv), com rodado de pneus diagonais e massa total de 5 Mg, com pressão de inflação de 96 kPa nos pneus dianteiros (14.9 – 24 R1) e 110 kPa nos pneus traseiros (18.4 – 34 R1), sendo 39% da massa do trator distribuída no eixo dianteiro e 61% no eixo traseiro. A compactação foi realizada por meio da passagem dos rodados deste trator, perfazendo toda a superfície da parcela de forma que os pneus comprimissem áreas paralelas entre si. O número de vezes que o trator trafegou, variou conforme o tratamento, sendo que o tráfego foi sobreposto ao anterior de forma que toda área de cada parcela fosse trafegada com número igual de vezes.

A semeadura do milho (cv. BRS 3150) foi efetuada no dia 22 de novembro de 2007, utilizando-se uma semeadora-adubadora de plantio direto com quatro linhas. O mecanismo sulcador do solo da semeadora foi retirado para não eliminar os possíveis efeitos negativos da compactação, sendo utilizado somente o disco de corte do dosador de sementes. A densidade de semeadura foi de oito sementes por metro linear, com espaçamento entrelinhas de 0,90 m. Adubação consistiu de 0,4 Mg ha⁻¹ da fórmula 10–30–10, para obtenção da produtividade esperada de 6 a 8 Mg ha⁻¹. Decorridos 10 dias da emergência das plântulas, foi realizado o desbaste para cinco plantas por metro. A adubação de cobertura foi realizada 30 dias após a emergência das plântulas, utilizando-se 0,1 Mg ha⁻¹ de N na forma de sulfato de amônio, e 0,04 Mg ha⁻¹ de K₂O na forma de cloreto de potássio. Cada unidade experimental possuiu quatro linhas de milho de cinco metros de comprimento.

As determinações do sistema radicular foram realizadas quando as plantas de milho estavam no estágio fenológico R1 (Florescimento e Polinização). Em cada parcela foi aberta uma trincheira transversal a uma linha de cultivo, onde a parede vertical da trincheira ficou a 0,05 m da planta de milho, expondo a raiz desta planta que foi escolhida aleatoriamente de maneira que representasse o conjunto de plantas da unidade experimental. Após a exposição da raiz em uma seção transversal à linha de cultivo e próxima ao eixo da planta, o perfil foi dividido em quadrículas de 0,05 m com auxílio de uma malha de 0,9 x 0,2 m colocado em pleno contato com o solo. Efetuou-se

então a fotografia do perfil com uma câmera digital (8 megapixels). Esta imagem foi segmentada com a técnica de limiarização (thresholding). Posteriormente as raízes foram analisadas nas profundidades de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m, quanto ao comprimento, superfície e diâmetro radicular pelo programa computacional Delta-T Scan.

Para as determinações da densidade, resistência à penetração e espaço poroso do solo, foram coletadas amostras com estrutura preservada em cilindros metálicos com 5,57 cm de diâmetro e 4,1 cm de altura nas mesmas profundidades em que se realizou a análise de raízes. As amostras foram retiradas nas entrelinhas da cultura do milho. Em cada parcela e profundidade foram coletadas três sub-amostras, sendo utilizado o valor médio como representativo.

Após o preparo das amostras, essas foram saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água até atingir cerca de $2/3$ da altura do anel e realizado o procedimento para obtenção da microporosidade pelo método da mesa de tensão, conforme descrito em Embrapa (1997). Estas amostras foram novamente saturadas e submetidas à tensão de 0,01 MPa, em câmeras de Richards, conforme Klute (1986). Esta tensão geralmente tem sido aplicada no solo, para posterior determinação da resistência do solo à penetração (SMITH et al., 1997).

Quando as amostras atingiram o equilíbrio nesta tensão foi medida a resistência do solo à penetração, utilizando um penetrógrafo eletrônico com velocidade constante de penetração de 1 cm min^{-1} , com diâmetro de base da haste de 4 mm e semi-ângulo de 30° , desenvolvido por Serafim et al. (2008). As amostras obtidas nos 5 mm superiores e inferiores da amostra foram descartadas, visando eliminar o efeito da periferia da amostra (BRADFORD, 1986). A frequência de leituras de resistência do solo à penetração correspondeu à coleta de um valor a cada 0,25 segundos, obtendo-se 800 leituras por amostra, sendo utilizado o valor médio.

Após a determinação da resistência à penetração, as amostras foram levadas à estufa a $105-110^\circ\text{C}$, por 48 horas, para determinar a umidade volumétrica e a densidade do solo pelo método do anel volumétrico. A porosidade total e a macroporosidade foram obtidas como proposto em Embrapa (1997).

A distribuição de agregados foi determinada para as quatro profundidades do solo, pelo método de peneiramento úmido. Sendo retirados blocos de solo com estrutura levemente alterada, secados ao ar, e passados em peneiras de 9,52 e 4,76 mm. Os agregados retidos na peneira de 4,76 mm foram empregados nas análises de

estabilidade de agregados via úmida, a qual foi realizada colocando as amostras sobre um jogo de peneiras com malhas de 2,0; 1,0; 0,5 e 0,105 mm, e submetendo-as a oscilações verticais, durante 15 minutos numa frequência de 32 oscilações por minuto. Foi adotado como índices de estabilidade, o diâmetro médio geométrico e o diâmetro médio ponderado, cujos cálculos foram feitos seguindo o proposto por Kemper e Rosenau (1986).

Os resultados foram submetidos à análise de variância, e quando significativa foi aplicado o teste de Duncan, a 5% de probabilidade, para a comparação de médias. Também, foram realizadas as correlações lineares simples para as combinações duas a duas, dos atributos físicos do solo estudados com o comprimento radicular do milho. Para isso foi utilizado o aplicativo computacional SAEG (RIBEIRO JÚNIOR, 2001).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O tráfego de trator alterou os atributos físicos do solo somente até 0,10 m de profundidade (Quadros 1, 2 e 3), constatando que em sistema de plantio direto, o tráfego de máquinas provoca aumento expressivo da compactação somente na camada de 0,0-0,10 m de profundidade, conforme o observado por Secco et al. (2004); Collares et al. (2006) e Freddi et al. (2007). Em sub-superfície (0,10 – 0,20 m) foram observados valores altos de densidade do solo em todos os tratamentos (Quadro 1), sendo estes, relacionados à ocorrência de um provável pé-de-grade nessa camada de solo. Isso faz com que o solo se torne bem estruturado, proporcionando maior capacidade de carga, não sendo alterado com o tráfego de trator em até seis passadas.

QUADRO 1. Densidade do solo, umidade volumétrica e resistência do solo à penetração nos tratamentos e profundidades em Latossolo Vermelho Distroférico de textura muito argilosa

Tratamentos ⁽¹⁾	Profundidade (m)			
	0,0-0,05	0,05-0,10	0,10-0,15	0,15-0,20
	Densidade do solo (Mg m ⁻³)			
PD	1,12 b	1,28 c	1,30 a	1,32 a
PDc1	1,13 b	1,30 bc	1,34 a	1,33 a
PDc2	1,21 a	1,36 ab	1,35 a	1,35 a
PDc4	1,22 a	1,37 a	1,35 a	1,35 a
PDc6	1,23 a	1,37 a	1,36 a	1,36 a
CV (%)	3,61	4,01	3,94	3,50
	Umidade volumétrica (m ³ m ⁻³) ⁽²⁾			
PD	0,35 b	0,39 b	0,40 a	0,43 a
PDc1	0,37 ab	0,39 b	0,42 a	0,45 a
PDc2	0,38 a	0,41 a	0,42 a	0,45 a
PDc4	0,38 a	0,42 a	0,42 a	0,45 a
PDc6	0,38 a	0,42 a	0,42 a	0,45 a
CV (%)	4,09	4,24	3,13	3,68
	Resistência do solo à penetração (MPa) ⁽²⁾			
PD	0,35 b	0,63 b	0,71 a	0,65 a
PDc1	0,36 b	0,66 b	0,75 a	0,68 a
PDc2	0,39 b	0,70 b	0,77 a	0,73 a
PDc4	0,51 a	0,92 a	0,84 a	0,76 a
PDc6	0,52 a	0,93 a	0,85 a	0,78 a
CV (%)	19,70	15,75	12,40	13,06

⁽¹⁾PD – plantio direto sem compactação adicional; PDc1, PDc2, PDc4 e PDc6 – correspondem a plantio direto com compactação adicional por tráfego de trator de 5 Mg em uma, duas, quatro e seis passadas, respectivamente. ⁽²⁾Determinações realizadas em amostras de solo com conteúdo de água retida em capacidade de campo (0,01 MPa). Médias na coluna seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

A densidade do solo (D_s) nas profundidades de 0,0-0,05 e 0,05-0,10 m aumentou a partir da pressão aplicada no solo pelo tráfego em duas passadas (PDc2) em relação ao tratamento sem compactação adicional (PD), onde o tráfego em quatro (PDc4) e seis vezes (PDc6) não aumentaram a D_s comparando-os com o PDc2. Streck et al. (2004) e Lima et al. (2006), em Argissolo Vermelho Distrófico arênico utilizando quatro passadas de uma máquina de 10 Mg, encontraram aumento na D_s comparado com o sistema de plantio direto sem compactação adicional na camada superficial do solo. Freddi et al. (2007), em Latossolo Vermelho Distrófico de textura média, também obtiveram aumento na D_s ocasionada pelo tráfego de tratores de 4 e 11 Mg. Observa-se que a D_s entre o PD e PDc1 não foi diferente (Quadro 1), evidenciando que o solo suportou as pressões exercidas pela passagem em uma vez da máquina sem aumentar sua D_s .

Considerando o valor de D_s de $1,37 \text{ Mg m}^{-3}$ obtido por Beutler et al. (2004) na camada de 0,0-0,20 m de profundidade, em Latossolo Vermelho Distrófico de textura média, como limitante a produção de soja e arroz, observa-se que o PDc2, PDc4 e PDc6 na profundidade de 0,05-0,10 m podem restringir a produtividade das plantas (Quadro 1).

A resistência do solo à penetração (RP) nas profundidades 0,0-0,05 e 0,05-0,10 m aumentou com o tráfego do trator, sendo que os tratamentos PDc4 e PDc6 apresentaram os maiores valores, não diferindo entre si (Quadro 1). O tráfego de trator em até duas passadas (PDc1 e PDc2) não alterou a RP do solo comparado ao PD. Resultados semelhantes foram obtidos por Streck et al. (2004), trabalhando com Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico trafegado por uma máquina de 10 Mg. Esses autores encontraram que o tráfego em quatro passadas diferiu dos tratamentos com duas e sem tráfego, aumentando a RP nestas mesmas profundidades.

Ocorreu um incremento de 49% e 48% nos valores de RP nas profundidades 0,0-0,05 e 0,05-0,10 m, respectivamente, comparando os tratamentos PD e PDc6. Para Servadio et al. (2005) o aumento no número de passadas do trator aumenta a RP. Zhang et al. (2006) analisando o tráfego em até nove vezes de pequenos tratores (massa de 900 kg) no nordeste da China, verificaram aumento na RP com o aumento de passadas do trator, principalmente até 0,10 m de profundidade. Os valores de RP encontrados no trabalho estão bem abaixo do preconizado como crítico de 2,0 MPa (TAYLOR et al., 1966), mas para Beutler e Centurion (2004), valores acima de 0,85 MPa em Latossolo Vermelho Distrófico de textura média já causam danos a produtividade da soja. Para

Llanillo et al. (2006) dependendo das condições de densidade e umidade, as áreas cultivadas podem rapidamente atingir valores de RP maiores que 2 MPa, principalmente em plantio direto.

Quanto a umidade volumétrica do solo, pode-se observar aumento desta com a compactação até a profundidade de 0,10 m (Quadro 1). Na profundidade de 0,0-0,05 m o PD não diferiu do PDc1, obtendo o menor valor de água volumétrica comparado aos demais tratamentos. Os tratamentos que receberam compactação adicional nesta camada de solo não diferiram quanto à umidade volumétrica. Na camada de 0,05-0,10 m o PD e PDc1 obtiveram a menor umidade volumétrica. O aumento na umidade volumétrica do solo pelo o aumento nas passadas do trator, não pode ser considerado como benéfico, pois esse está relacionado com o aumento na Ds. Deve-se salientar que o conteúdo de água por unidade de volume aumenta com a compactação, principalmente em tensões de água acima da capacidade de campo (0,01 MPa) (BEUTLER et al., 2005).

Analisando a porosidade total e a macroporosidade do solo nas camadas de 0,0-0,05 e 0,05-0,10 m de profundidade (Quadro 2), houve reduções nestes atributos, fato não observado para a microporosidade, pelo aumento do número de passadas. Os resultados seguem a mesma tendência dos obtidos por Streck et al. (2004) em Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico, cultivado em sistema de plantio direto, quando trafegado por diferentes passadas de uma máquina de 10 Mg, com pneus radiais com pressão interna de 0,35 MPa (50 lb in⁻²).

Adotando-se que a pressão média que o pneu exerce sobre a superfície do solo é aproximadamente igual à pressão interna dos pneus (CAMARGO e ALLEONI, 2006), verifica-se que no tratamento com uma passada do trator foi aplicado no solo uma pressão de 110 kPa, sendo assim, até esta pressão não ocorre alterações na porosidade total e macroporosidade do solo (Quadro 2). Kondo e Dias Junior (1999) em Latossolo Roxo muito argiloso cultivado com culturas anuais, verificaram que pressões aplicadas ao solo de até 183 kPa não provocam compactação do solo na faixa de friabilidade pelo fato da capacidade de suporte de carga do solo não ser excedida.

Verificando os valores de porosidade total (Pt) na camada de 0,0-0,05 m é possível observar que os tratamentos PD, PDc1 e PDc2 tiveram maior Pt que o PDc6, mas não foram diferentes entre si. Já o PDc4 obteve resultados semelhantes ao PDc2 e PDc6. Na camada de 0,05-0,10 m o PD obteve o valor mais alto de Pt comparado os tratamentos com tráfego em mais de duas passadas. Secco et al. (2004) estudando a

compactação adicional em plantio direto em Latossolo Vermelho Distroférico de textura argilosa verificaram redução da Pt e macroporosidade na superfície do solo quando utilizado três e cinco passadas de um rolo compactador comparado com o plantio direto sem compactação adicional.

QUADRO 2. Porosidade total, macroporosidade e microporosidade nos tratamentos e profundidades em Latossolo Vermelho Distroférico de textura muito argilosa

Tratamentos ⁽¹⁾	Profundidade (m)			
	0,0-0,05	0,05-0,10	0,10-0,15	0,15-0,20
	Porosidade total (m ³ m ⁻³)			
PD	0,62 a	0,57 a	0,55 a	0,54 a
PDc1	0,62 a	0,56 ab	0,54 a	0,56 a
PDc2	0,61 ab	0,55 b	0,54 a	0,55 a
PDc4	0,59 bc	0,53 c	0,53 a	0,54 a
PDc6	0,58 c	0,52 c	0,54 a	0,54 a
CV (%)	2,86	2,25	3,02	2,22
	Macroporosidade (m ³ m ⁻³)			
PD	0,23 a	0,16 a	0,12 a	0,10 a
PDc1	0,23 a	0,15 ab	0,11 a	0,09 a
PDc2	0,19 b	0,13 b	0,10 a	0,08 a
PDc4	0,17 b	0,09 c	0,10 a	0,08 a
PDc6	0,17 b	0,09 c	0,10 a	0,07 a
CV (%)	9,18	14,56	17,09	16,38
	Microporosidade (m ³ m ⁻³)			
PD	0,39 a	0,41 a	0,43 a	0,45 a
PDc1	0,39 a	0,41 a	0,43 a	0,46 a
PDc2	0,42 a	0,42 a	0,44 a	0,47 a
PDc4	0,42 a	0,44 a	0,43 a	0,46 a
PDc6	0,41 a	0,43 a	0,44 a	0,46 a
CV (%)	4,04	4,21	3,02	3,28

⁽¹⁾PD – plantio direto sem compactação adicional; PDc1, PDc2, PDc4 e PDc6 – correspondem a plantio direto com compactação adicional por tráfego de trator de 5 Mg em uma, duas, quatro e seis passadas, respectivamente. Médias na coluna seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

Na camada de 0,0-0,05 m no PD e PDc1 foram encontrados os maiores valores de macroporosidade. A aplicação de maior número de passadas do trator, acarretou na redução da macroporosidade na camada de 0,05-0,10 m, sendo os tratamentos PDc4 e PDc6 os que apresentaram os menores valores, enquanto no PD e o PDc1 estes foram mais elevados (Quadro 2). Com as passadas de trator ocorre diminuição da macroporosidade em comparação com áreas sem tráfego (Servadio et al., 2005). Comparando o tratamento PD com o PDc4 e PDc6, nas camadas de 0,0-0,05 e

0,05-0,10 m, verifica-se uma redução na macroporosidade de 26% e 44%, respectivamente. Freddi et al. (2007) analisando a camada de 0,0-0,10 m de profundidade em Latossolo Vermelho Distrófico de textura média, submetido a compactação induzida por um trator de 11 Mg, quando o conteúdo de água no solo estava próximo a capacidade de campo (0,01 MPa), verificaram que a macroporosidade foi reduzida de $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no solo não trafegado para apenas $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ nos tratamentos com quatro e seis passadas do trator.

Os valores de macroporosidade foram inferiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ nos tratamentos PDc4 e PDc6 na camada de 0,05-0,10 m de profundidade (Quadro 2), indicando prováveis limitações ao arejamento do solo em épocas mais úmidas como relatado por Collares et al. (2008). Feng et al. (2002) citam que esse valor para solos argilosos já causa inibição ao suprimento adequado de oxigênio às plantas, sendo necessários valores mais altos que $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de porosidade de aeração. Mas de maneira geral, o valor dado como crítico às plantas é $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (PAGLIAI et al., 2003).

A estabilidade de agregados medida pelo diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP) nas camadas de 0,0-0,05 e 0,05-0,10 m foi alterada pelos tratamentos aplicados (Quadro 3). Sendo observado aumento no DMG e DMP com o aumento das passadas de trator. Os valores de diâmetro médio de agregados encontrados nesse trabalho estão próximos aos encontrados por Corrêa (2002) em solos tropicais sobre plantio direto.

No tratamento PD foi encontrado o menor valor de DMG na camada de 0,0-0,10 m. A adição de compactação ao plantio direto pelo tráfego de trator aumentou o DMG, sendo observado na camada de 0,0-0,05 m os maiores valores nos tratamentos PDc4 e PDc6 e na camada de 0,05-0,10 m os maiores valores foram obtidos em PDc2, PDc4 e PDc6 (Quadro 3). Silva et al. (2006) encontraram resultados semelhantes quando trabalharam com pressões de compactação de até 120 kPa em Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso.

O DMP apresentou resultados semelhantes ao DMG (Quadro 3). Na camada de 0,0-0,05 m os menores valores de DMP foram encontrados no PD e PDc1, sendo o maior valor obtido no PDc6 não diferindo significativamente do PDc4. Para a camada de 0,05-0,10 m o PD obteve o menor valor de DMP diferindo dos demais tratamentos com compactação adicional. Já os maiores valores de DMP foram encontrados no PDc2, PDc4 e PDc6. Calonego e Rosolem (2008) analisando sistemas de manejo

observaram que na camada de 0,05-0,10 m o DMP é aumentado com o plantio direto e com o cultivo de plantas de cobertura, isto comparado com o solo escarificado.

QUADRO 3. Diâmetro médio geométrico e diâmetro médio ponderado nos tratamentos e profundidades em Latossolo Vermelho Distroférico de textura muito argilosa

Tratamentos ⁽¹⁾	Profundidade (m)			
	0,0-0,05	0,05-0,10	0,10-0,15	0,15-0,20
Diâmetro médio geométrico (mm)				
PD	2,64 c	2,67 c	2,77 a	2,76 a
PDc1	2,67 b	2,72 b	2,78 a	2,77 a
PDc2	2,69 b	2,76 a	2,78 a	2,77 a
PDc4	2,71 a	2,77 a	2,78 a	2,78 a
PDc6	2,72 a	2,78 a	2,78 a	2,78 a
CV (%)	0,56	0,58	0,46	0,49
Diâmetro médio ponderado (mm)				
PD	2,78 d	2,79 c	2,83 a	2,81 a
PDc1	2,79 cd	2,81 b	2,84 a	2,82 a
PDc2	2,80 bc	2,82 ab	2,84 a	2,82 a
PDc4	2,81 ab	2,83 a	2,85 a	2,84 a
PDc6	2,82 a	2,83 a	2,85 a	2,84 a
CV (%)	0,44	0,36	0,49	0,65

⁽¹⁾PD – plantio direto sem compactação adicional; PDc1, PDc2, PDc4 e PDc6 – correspondem a plantio direto com compactação adicional por tráfego de trator de 5 Mg em uma, duas, quatro e seis passadas, respectivamente. Médias na coluna seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

Este aumento na estabilidade de agregados verificada pelo aumento no DMG e DMP com a compactação adicional no solo em plantio direto, pode ser atribuída à provável agregação mecânica que ocorre por efeito da tensão exercida pela compactação, levando à união de partículas sob alta umidade no solo. Silva et al. (2006) verificaram que esse processo foi detectado em Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso.

A compactação do solo influenciou negativamente o comprimento radicular (CR), superfície radicular (SR) e diâmetro médio radicular (DR) em todas as profundidades (Quadro 4).

Foloni et al. (2003) também verificaram em Latossolo Vermelho Distroférico de textura média reduções na massa da matéria seca e densidade do comprimento radicular de plantas de milho na camada de solo compactada. Analisando a densidade de raízes de soja em Latossolo Vermelho Distroférico de textura média com o aumento do número de passadas que a máquina trafegou sobre o solo, Beutler e

Centurion (2004) observaram decréscimo linear na camada de 0,05-0,15 m, com menores alterações na camada de 0,15-0,20 m.

QUADRO 4. Comprimento radicular, superfície radicular e diâmetro médio radicular das raízes de milho nos tratamentos e profundidades em Latossolo Vermelho Distroférico de textura muito argilosa

Tratamentos ⁽¹⁾	Profundidade (m)			
	0,0-0,05	0,05-0,10	0,10-0,15	0,15-0,20
	Comprimento radicular (m m ⁻²)			
PD	101,11 a	69,40 a	31,68 a	17,68 a
PDc1	55,38 b	24,95 b	11,75 b	6,94 b
PDc2	21,71 c	13,24 bc	8,39 bc	4,83 bc
PDc4	20,05 c	9,75 bc	6,12 bc	3,80 bc
PDc6	16,44 c	7,76 c	4,61 c	2,80 c
CV (%)	37,39	45,83	37,69	38,36
	Superfície radicular (cm ² m ⁻²)			
PD	830,87 a	599,27 a	281,62 a	171,86 a
PDc1	611,31 b	298,06 b	134,41 b	81,23 b
PDc2	241,91 c	132,96 c	82,47 bc	48,25 bc
PDc4	219,60 c	110,28 c	69,22 c	37,52 c
PDc6	165,22 c	76,42 c	41,70 c	25,63 c
CV (%)	38,59	40,75	36,25	40,52
	Diâmetro de raiz (mm)			
PD	0,97 a	1,00 a	0,99 a	0,96 a
PDc1	0,98 a	1,01 a	0,94 ab	0,87 a
PDc2	0,92 ab	0,82 b	0,76 bc	0,74 b
PDc4	0,82 bc	0,89 ab	0,82 abc	0,70 b
PDc6	0,70 c	0,78 b	0,71 c	0,69 b
CV (%)	10,35	13,40	15,18	9,44

⁽¹⁾PD – plantio direto sem compactação adicional; PDc1, PDc2, PDc4 e PDc6 – correspondem a plantio direto com compactação adicional por tráfego de trator de 5 Mg em uma, duas, quatro e seis passadas, respectivamente. Médias na coluna seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

O CR e SR em todas as profundidades foram maiores no PD e os menores valores sempre foram obtidos nos tratamentos PDc2, PDc4 e PDc6. O CR e SR estão correlacionados de forma significativa ($p < 0,01$) e positiva ($r = 0,98$), por isso nota-se a semelhança encontrada entre os seus resultados.

Analisando a camada de 0,0-0,20 m de profundidade, se observaram reduções do comprimento médio de raízes de 55%, 78%, 82% e 86% no PDc1, PDc2, PDc4 e PDc6, respectivamente, comparado com PD. Guimarães e Moreira (2001) encontraram redução de 41,2% na densidade do comprimento radicular de plantas de arroz na camada de solo compactada (0,0-0,20 m). Sabendo-se que a diminuição em

40% do comprimento radicular é crítica à produtividade das plantas (PABIN et al, 1998), nota-se que em todos os tratamentos com compactação adicional este valor foi extrapolado, podendo limitar a capacidade das plantas em expressar todo seu potencial produtivo.

Analisando os resultados também é possível observar que na média dos tratamentos, 77% do CR se encontra na camada de 0,0-0,10 m de profundidade. Resultados semelhantes foram obtidos por Collares et al. (2006) em Argissolo Vermelho Distrófico arênico com a cultura do feijão, onde verificaram maior concentração de raízes na superfície do solo. Estes autores também observaram que as raízes do feijoeiro apresentaram crescimento reduzido nas camadas mais compactas, sendo a RP do solo o fator mais restritivo ao crescimento radicular, principalmente com solo mais denso e seco.

No crescimento e desenvolvimento do sistema radicular do milho, não houve nenhum período de veranico (Figura 1), sendo que, se ocorresse uma estiagem, principalmente nos estados de compactação mais elevados, poderia vir a prejudicar ainda mais o sistema radicular da cultura e conseqüentemente a produtividade da mesma. Vale ressaltar, que grande parte do sistema radicular do milho se limitou à camada de 0,0-0,10 m, assim, somente uma pequena quantidade de raízes poderiam buscar água na camada sub-superficial do solo (0,10-0,20 m).

O CR correlacionou-se de modo significativo ($p < 0,01$) e positivo com a macroporosidade ($r = 0,72$) e negativo com Ds ($r = -0,62$) e RP ($r = -0,59$) (Figura 2).

Mesmo com valores de RP abaixo de 1,10 MPa, o sistema radicular do milho sofreu expressivas reduções em seu comprimento. Isto pode estar relacionado ao conteúdo de água (capacidade de campo) em que se foi medido a RP, pois no campo há intensas variações no conteúdo de água do solo, podendo este ser reduzido, fazendo com que rapidamente a RP passe de uma condição não-limitante para limitante, influenciando negativamente o crescimento das raízes. Gonçalves et al. (2006) em Latossolo Vermelho Distroférico de textura muito argilosa em casa de vegetação verificaram que a cultura do milheto apresentou na camada compactada, diminuição da densidade do comprimento radicular com o aumento da Ds e RP, sendo que a partir da Ds de $1,18 \text{ Mg m}^{-3}$ e RP de 0,12 MPa já ocorreram reduções no crescimento das raízes. Para Rosolem et al. (1999) o crescimento das raízes primárias de milho é reduzido pela metade quando a RP atinge 0,33 MPa.

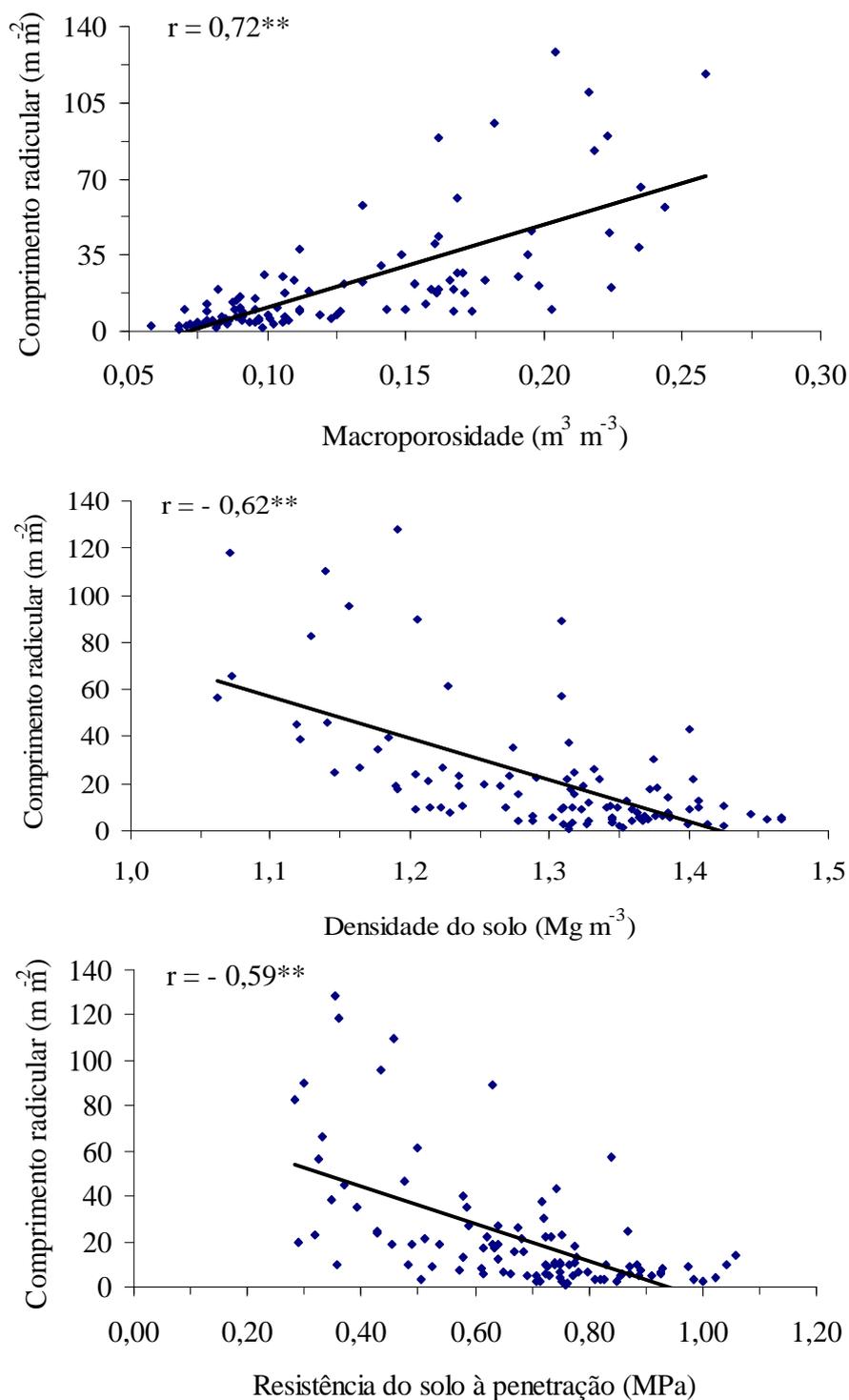


FIGURA 2. Comprimento radicular (CR) de acordo com a macroporosidade (Mac), densidade do solo (Ds) e resistência do solo à penetração (RP) em Latossolo Vermelho Distroférico de textura muito argilosa. ******significativo pelo teste t, a 1% de probabilidade. Camada de 0,0-0,20 m (n=100).

O aumento da RP e Ds causou redução linear do CR (Figura 2). Beulter e Centurion (2004) trabalhando em Latossolo Vermelho Distroférico de textura média e

Cardoso et al. (2006) em Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, relatam que camadas de solo onde ocorre aumento da RP proporcionam um decréscimo linear da densidade de raízes. Analisando o sistema radicular do milho, Rosolem et al. (1999) verificaram que o aumento da Ds de 1,07 até 1,38 Mg m⁻³ em Latossolo com 48% de argila, reduziu linearmente o comprimento da raiz seminal primária.

Analisando-se os dados apresentados na figura 2, pode-se observar a importância da macroporosidade sobre o crescimento do sistema radicular do milho comparado com os demais atributos físicos do solo estudados. Mostrando que as raízes de milho crescem pelos espaços dos macroporos, corroborando com os resultados obtidos por Abreu et al. (2004) e Servadio et al. (2005). Estabelecendo o limite crítico de macroporosidade de 0,10 m³ m⁻³, pode-se observar que nessa porosidade já encontra uma péssima condição ao crescimento radicular.

As correlações da macroporosidade, da densidade do solo e da resistência do solo à penetração com o comprimento radicular do milho, evidenciam que quando os valores destes atributos físicos do solo estão mais distantes dos considerados críticos, o comprimento radicular do milho é pouco influenciado por esses atributos, sendo isso comprovado pela maior dispersão dos dados. Observa-se que a macroporosidade do solo acima de aproximadamente 0,16 m³ m⁻³ tem pouca influência sobre o comprimento radicular do milho, já quando os valores estão abaixo desse, nota-se uma pequena dispersão entre os dados, evidenciando elevada atuação da macroporosidade sobre o comprimento radicular do milho. Para a densidade do solo e resistência do solo à penetração, foram observados que valores acima de aproximadamente 1,32 Mg m⁻³ e 0,64 MPa, respectivamente, são mais precisos para descrever a influência destes atributos sobre o comprimento radicular do milho.

Com relação ao diâmetro das raízes, observa-se que a compactação do solo reduziu os valores desse atributo avaliado nas raízes de milho em todas as profundidades (Quadro 4). Sendo que na camada de 0,0-0,20 m os tratamentos PD e PDc1 foram semelhantes entre si apresentando sempre os maiores diâmetros de raízes. Já os tratamentos PDc4 e PDc6 também foram semelhantes, mas com os valores de diâmetro de raiz reduzidos. Esta redução no diâmetro de raiz pode ser uma adaptação das plantas às condições restritivas impostas pela compactação, para que as raízes possam penetrar no espaço poroso do solo de menor diâmetro, a fim de obter água e nutrientes para o seu crescimento e desenvolvimento. Clark et al. (2003) afirmam que há a formação de raízes laterais com menor diâmetro para penetrar em pequenos poros.

Collares et al. (2008) também observaram em plantio direto compactado o surgimento de raízes secundárias e mais finas de feijão.

CONCLUSÕES

1. O aumento da compactação do solo induzida pelo tráfego de trator promove, aumento da densidade do solo e da resistência do solo à penetração; e redução da macroporosidade e porosidade total, de maneira efetiva até 0,10 m de profundidade.

2. A compactação adicional influencia negativamente o sistema radicular do milho, sendo a macroporosidade um bom atributo para análises do comprimento e superfície radicular.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, S.L.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Escarificação mecânica e biológica para redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p.519-531, 2004.
- BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; CRUZ, J.C.; PEREIRA FILHO, I.A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.1, p.167-177, 2001.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P. Intervalo hídrico ótimo e a produção de soja e arroz em dois latossolos. **Irriga**, Botucatu, v.9, n.2, p.181-192, 2004.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.6, p.581-588, 2004.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; FREDDI, O.S.; ANDRIOLI, I. Efeito da compactação do solo na estabilidade de agregados e no conteúdo gravimétrico de água. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.27, n.2, p.193-198, 2005.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C.; LEONEL, C.L.; SÃO JOÃO, A.C.G.; FREDDI, O.S. Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação e da qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.6, p.1223-1232, 2007.
- BRADFORD, J.M. Penetrability. In: KLUTE, A. **Methods of soil analyses – physical and mineralogical methods**. 2 ed. Madison: ASA – SSSA, 1986. p.463-478.
- CALONEGO, J.C.; ROSOLEM, C.A. Estabilidade de agregados do solo após manejo com rotação de culturas e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.4, p.1399-1407, 2008.
- CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. **Causas da compactação do solo**. 2006. Disponível em: <<http://www.infobibos.com/Artigos/CompSolo/C3/Comp3.htm>>. Acesso em: 15 abr. 2009.
- CARDOSO, E.G.; ZOTARELLI, L.; PICCININ, J.L.; TORRES, E.; SARAIVA, O.F.; GUIMARÃES, M.F. Sistema radicular da soja em função da compactação do solo no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.3, p.493-501, 2006.
- CLARK, L.J.; WHALLEY, W.R.; BARRACLOUGH, P.B. How do roots penetrate strong soil? **Plant and Soil**, v.255, n.1, p.93-104, 2003.

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.11, p.1663-1674, 2006.

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.3, p.933-942, 2008.

CORRÊA, J.C. Efeito de sistemas de cultivo na estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho-Amarelo em Querência, MT. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.2, p.203-209, 2002.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: 1997. 212 p.

FENG, G.; WU, L.; LETEY, J. Evaluating aeration criteria by simultaneous measurement of oxygen diffusion rate and soil-water regime. **Soil Science**, v.167, n.8, p.495-503, 2002.

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

FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; BEUTLER, A.N.; ARATANI, R.G.; LEONEL, C.L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.4, p.627-636, 2007.

GENRO JUNIOR, S.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p.477-484, 2004.

GONÇALVES, W.G.; JIMENEZ, R.L.; ARAÚJO FILHO, J.V.; ASSIS, R.L.; SILVA, G.P.; FÁBIO R.; PIRES, F.R. Sistema radicular de plantas de cobertura sob compactação do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.1, p.67-75, 2006.

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

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis - physical and mineralogical methods**. 2 ed. Madison: ASA – SSSA, 1986, p.425-441.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis - physical and mineralogical methods**. 2 ed. Madison: ASA – SSSA, 1986, p.635-662.

KONDO, M.K.; DIAS JUNIOR, M.S. Estimativa do efeito do uso e da umidade do solo sobre a compactação adicional de três latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.2, p.211-218, 1999.

LIMA, C.L.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S. Compressibilidade de um Argissolo sob plantio direto escarificado e compactado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.6, p.1765-1772, 2006.

LLANILLO, R.F; RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; GUIMARÃES, M.F.; FERREIRA, R.R.M. Evolução de propriedades físicas do solo em função dos sistemas de manejo em culturas anuais. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.27, n.2, p.205-220, 2006.

PABIN, J., LIPIEC, J., WLODEK, S., BISKUPSKI, A.; KAUS, A. Critical soil bulk density and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.46, n.3, 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 medium power. **Soil & tillage research**, v.73, n.1-2, p.119–129, 2003.

RAPER, R.L. Agricultural traffic impacts on soil. **Journal of Terramechanics**, v.42, n.3-4, 259–280, 2005.

RIBEIRO JÚNIOR, J.I. **Análises estatísticas no SAEG**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2001. 301 p.

ROSOLEM, C.A.; FERNANDEZ, E.M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C.A.C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.5, p.821-828, 1999.

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, n.5, p.797-804, 2004.

SERAFIM, M.E. **Desenvolvimento de um penetrógrafo de bancada visando a determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO) em diferentes sistemas de produção**. 2007. 79 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados-MS.

SERAFIM, M.E.; VITORINO, A.C.T.; SOUZA, C.M.A.; PRADO, E.D.; VENTURIN, J.C.; YAMAMOTO, N.T. Desenvolvimento de um penetrógrafo eletromecânico de bancada. **Revista Ciências Técnicas Agropecuarias**, Havana, v.17, n.1, p.61-65, 2008.

SERVADIO, P.; MARSILI, A.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S.; PAGLIAI, M. Effects on some soil qualities in central Italy following the passage of four wheel drive tractor fitted with single and dual tires. **Soil & Tillage Research**, v.84, p.87–100, 2005.

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

SMITH, C.W.; JOHNSTON, M.A.; LORENTZ, S. The effect of soil compaction and soil physical properties on the mechanical resistance of South African forestry soils. **Geoderma**, v.78, p.93-111, 1997.

STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.3, 755-760, 2004.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G.M.; GUIMARÃES, M.F.; FONSECA, I.C.B. Resistência à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.3, p.725-730, 2001.

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

ZHANG, X.Y.; CRUSE, R.M.; SUI, Y.Y.; JHAO, Z. Soil Compaction Induced by Small Tractor Traffic in Northeast China. **Soil Science Society of America Journal**, v.70, n.2, p.613-619, 2006.

ARTIGO 2

INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRICO COM COMPACTAÇÃO INDUZIDA, E SUAS RELAÇÕES COM A PRODUTIVIDADE DE MILHO

RESUMO

Na agricultura brasileira, o milho ocupa lugar de destaque pelo elevado volume de produção de grãos. No entanto, a compactação do solo ocasiona negativas alterações nos atributos físicos do solo, limitando o desempenho desta cultura. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, cultivado em sistema plantio direto, as relações entre os atributos físicos do solo, e destes com a produtividade de milho; além de determinar indicadores da qualidade física do solo quando submetido a diferentes estados de compactação induzida. O estudo foi realizado a campo, na área da Fazenda Experimental de Ciências Agrárias da UFGD, no município de Dourados, MS. O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso, com cinco repetições. Os tratamentos foram constituídos por estados induzidos de compactação, sendo: PD – condição atual que reflete o histórico de oito anos de plantio direto; plantio direto com compactação adicional por tráfego de trator em uma (PDc1); duas (PDc2), quatro (PDc4) e seis passadas (PDc6). Houve correlação significativa ($p < 0,01$) entre todos os atributos físicos do solo estudados. A produtividade de milho se correlacionou de forma positiva com a macroporosidade, e negativa, com a resistência do solo à penetração, diâmetro médio geométrico e diâmetro médio ponderado. Quanto aos dados da cultura do milho, foram observados que o índice de velocidade de emergência, diâmetro do colmo, altura de plantas, massa de grãos e produtividade de grãos de milho foram reduzidos com o aumento da compactação do solo. Os atributos físicos avaliados, principalmente a resistência do solo à penetração e a macroporosidade, revelam o estado de compactação do solo, dessa forma são utilizados como indicadores primários da qualidade física do solo.

Palavras-chave: atributos físicos, plantio direto, tráfego de trator.

INDICATORS OF QUALITY OF A PHYSICAL RED LATOSOL WITH COMPACTION INDUCED, AND THEIR RELATIONS WITH THE PRODUCTIVITY OF MAIZE

ABSTRACT

In Brazilian agriculture, maize is therefore high for high volume production of grains. However, soil compaction causes negative changes in physical attributes of soil, limiting the performance of this culture. The aim paper was to evaluate in a Red Latosol, cultivated by no-tillage system, the relationships between physical attributes of soil, and these with the productivity of maize; in addition to determining indicators of soil physical quality when subjected the different states of compaction induced. The study was conducted in the field, in the Experimental Farm of Agricultural Sciences, Federal University of Grande Dourados, in Dourados, MS. The experimental design was randomized blocks with five replications. The treatments consisted of induced states of compaction, with: PD - current condition that reflects the history of eight years of no-tillage system, no-tillage with additional compaction by tractor traffic in one (PDc1), two (PDc2), four (PDc4) and six passes (PDC6). There was significant correlation between all the physical attributes of the soil studied. The yield of maize showed a positive correlation with the macroporosity and negative, with the soil resistance to penetration and aggregate stability. The index of emergence speed, the stem diameter, plant height, grain mass and grain yield of maize were reduced with increasing soil compaction. The physical attributes evaluated, especially the soil resistance to penetration and macroporosity, reveal the state of soil compaction, thus are used as primary indicators of soil physical quality.

Index terms: physical attributes, no-tillage system, tractor traffic.

INTRODUÇÃO

Na agricultura brasileira, o milho ocupa lugar de destaque na produção de grãos, sendo grande parte desta produção originada de cultivos realizados sob o sistema plantio direto. No entanto, a produtividade média nacional é baixa, demonstrando que um ou mais fatores do sistema de produção estão limitando o pleno desempenho da cultura.

O aumento da compactação dos solos agrícolas em sistema plantio direto pode ser um fator limitante ao desenvolvimento e produtividade da cultura do milho, principalmente quando no período de cultivo (não-irrigado) a distribuição de chuvas ocorre de forma irregular e com baixas precipitações. Em condições favoráveis de umidade a produção das plantas não é reduzida (RAPER, 2005). Para Hamza e Anderson (2005) esta compactação vem ocorrendo devido à intensificação da atividade agrícola com elevado tráfego de máquinas, que estão cada vez mais robustas, aumentando a quantidade de áreas compactadas e degradando a qualidade física do solo, contribuindo assim, para a redução da produtividade das culturas.

Em sistema plantio direto, pela mobilização do solo somente na linha de semeadura, tem sido observado aumento na compactação do solo principalmente em sua camada mais superficial (SECCO et al., 2004), promovendo efeitos negativos na estrutura do solo (COLLARES et al., 2006), ocasionados principalmente pela ocorrência sistemática do tráfego de máquinas agrícolas (RICHART et al., 2005). Este efeito do tráfego de máquinas pode impactar negativamente a produção das culturas, porém nem sempre isto ocorre, pois os danos causados às plantas pela compactação dependem das condições climáticas e do estado de compactação em que o solo se encontra, sendo que em moderada compactação é improvável a redução da produção (RAPER, 2005).

Na literatura, ainda existem dúvidas sobre qual o estado de compactação do solo, sob plantio direto, que reduz a produtividade das culturas e quais os limites críticos dos atributos físicos que limitam o pleno desenvolvimento das plantas (SECCO et al., 2004). Para Beutler et al. (2004), o crescimento e a produtividade das plantas são influenciados pelas diversas interações entre os atributos físicos do solo, dificultando a obtenção de valores críticos. Sabe-se que a densidade do solo, porosidade total e de aeração e a resistência do solo à penetração podem caracterizar o estado de

compactação (SUZUKI et al., 2007). No entanto, a densidade da camada compactada que indique um estado de compactação limitante ao crescimento das plantas varia conforme o solo (SILVA et al., 2006a).

A compactação causa aumento de massa por unidade de volume, gerando maior densidade do solo e resistência do solo à penetração, com redução linear da porosidade de aeração e da porosidade total (STONE et al., 2002). A densidade do solo tem papel fundamental nos estudos agronômicos, por possuir estreita relação com outros atributos físicos do solo, onde com seu aumento, ocorre aumento da microporosidade e da resistência do solo à penetração (LIMA et al., 2007). O limite crítico de resistência do solo à penetração proposto por Taylor et al. (1966) de 2 MPa tem sido usado por autores como Tormena et al. (1998), Beutler et al. (2004), Freddi et al. (2007a) e Serafim (2007). Para a macroporosidade este valor é de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (PAGLIAI et al., 2003). Enquanto a porosidade do solo ideal é referida por Lima et al. (2007), quando se apresentar com $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ do seu volume total, no qual a microporosidade variaria entre 0,25 e $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, e a macroporosidade ficaria entre 0,17 e $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Estes atributos têm sido comumente utilizados, como indicadores da qualidade do solo para comparar diferentes sistemas de manejo (MARCHÃO et al., 2007). Sendo a qualidade do solo entendida como a capacidade do solo de manter uma produção de modo sustentável (COSTA et al., 2006).

Como consequência, cresce o interesse em avaliar a qualidade física do solo dentro do próprio sistema plantio direto, quando submetido a diferentes estados de compactação, ocasionados pelo tráfego de máquinas agrícolas. A identificação de indicadores físicos sensíveis a esses impactos fornecem informações importantes sobre o que ocorre com as relações físico-hídricas do solo, facilitando a compreensão da suscetibilidade do solo à compactação.

Em plantio direto, ainda existe espaço para estudos sobre as relações entre a compactação e os atributos físicos do solo, e destes sobre o crescimento e desenvolvimento do milho. Portanto, os processos que envolvem o manejo de plantas submetidas às variações ambientais, especificamente à compactação do solo, devem ser mais estudados, principalmente seus efeitos e suas relações com a produtividade de milho.

Diante do exposto, este trabalho objetivou analisar em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso cultivado em sistema plantio direto, as relações

entre os atributos físicos do solo, e destes com a produtividade do milho; além de determinar indicadores da qualidade física do solo submetido a diferentes estados de compactação induzida.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na área da Fazenda Experimental de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), no município de Dourados, MS, no ano agrícola de 2007/2008. O local situa-se em latitude 22°14'08"S, longitude de 54°59'13"W e altitude de 434 m. O clima é do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen. As precipitações pluviiais e temperatura média do ar obtidas durante o ciclo da cultura do milho são apresentadas na figura 1.

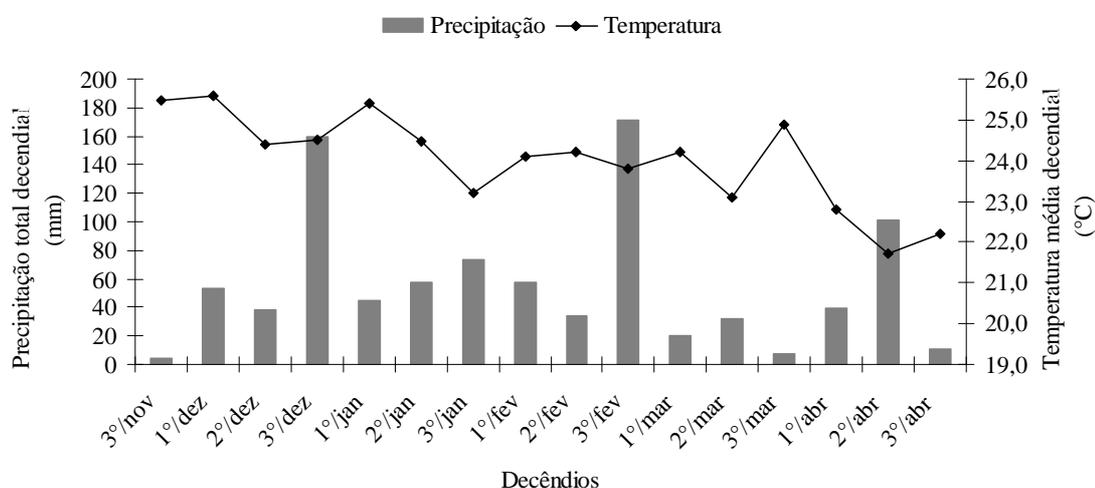


FIGURA 1. Precipitação pluviométrica total e temperatura média do ar em cada decêndio na área experimental, no período de novembro de 2007 a abril de 2008.

O solo foi um Latossolo Vermelho Distroférrico, cuja composição granulométrica, determinada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997) foi 644 g kg⁻¹ de argila, 203 g kg⁻¹ de silte e 153 g kg⁻¹ de areia nos primeiros 0,20 m. As características químicas foram: pH (H₂O) = 5,7; Ca²⁺ = 69,2 mmol_c dm⁻³; Mg²⁺ = 31,0 mmol_c dm⁻³; Al³⁺ = 0,0 mmol_c dm⁻³; H+Al³⁺ = 58,0 mmol_c dm⁻³; P = 7,0 mg dm⁻³; K = 5,1 mmol_c dm⁻³ e MO = 37 g kg⁻¹ (EMBRAPA, 1997).

O delineamento experimental foi de blocos casualizados com cinco repetições, e os tratamentos foram cinco estados de compactação: PD – Plantio direto sobre a condição atual que reflete o histórico do manejo de oito anos de plantio direto; PDc1, PDc2, PDc4 e PDc6 - Plantio direto com compactação adicional por tráfego de

trator em uma, duas, quatro e seis passadas, respectivamente. As parcelas mediram 5 m de comprimento e 3,6 m de largura, possuindo uma área total de 18 m².

A indução a compactação do solo foi realizada no dia 13 de novembro de 2007, dois dias após intensa precipitação pluvial, quando o solo possuía um conteúdo de água próximo à capacidade de campo de 0,28 kg kg⁻¹ na camada de 0,0-0,20 m de profundidade, determinado conforme proposto em Embrapa (1997). Foi utilizado um trator agrícola MF 292 (105 cv), com rodado de pneus diagonais e massa total de 5 Mg, com pressão de inflação de 96 kPa nos pneus dianteiros (14.9 – 24 R1) e 110 kPa nos pneus traseiros (18.4 – 34 R1), sendo 39% da massa do trator distribuída no eixo dianteiro e 61% no eixo traseiro. A compactação foi realizada por meio da passagem dos rodados deste trator, perfazendo toda a superfície da parcela de forma que os pneus comprimissem áreas paralelas entre si. O número de vezes que o trator trafegou, variou conforme o tratamento, sendo que o tráfego foi sobreposto ao anterior de forma que toda área de cada parcela fosse trafegada com número igual de vezes.

A semeadura do milho (cv. BRS 3150) foi efetuada no dia 22 de novembro de 2007, utilizando-se uma semeadora-adubadora de plantio direto com quatro linhas. O mecanismo sulcador do solo da semeadora foi retirado para não eliminar os possíveis efeitos negativos da compactação, sendo utilizado somente o disco de corte do dosador de sementes. A densidade de semeadura foi de oito sementes por metro linear, com espaçamento entrelinhas de 0,90 m. Adubação consistiu de 0,4 Mg ha⁻¹ da fórmula 10–30–10, para obtenção da produtividade esperada de 6 a 8 Mg ha⁻¹. Decorridos 10 dias da emergência das plântulas, foi realizado o desbaste para cinco plantas por metro. A adubação de cobertura foi realizada 30 dias após a emergência das plântulas, utilizando-se 0,1 Mg ha⁻¹ de N na forma de sulfato de amônio, e 0,04 Mg ha⁻¹ de K₂O na forma de cloreto de potássio. Cada unidade experimental possuiu quatro linhas de milho de cinco metros de comprimento.

Na maturação fisiológica do milho (R.6) foi determinada a altura das plantas e o diâmetro do colmo, em dez plantas por parcela. A altura das plantas foi determinada entre o colo da planta e a inserção da base da última folha expandida, e o diâmetro do colmo determinado utilizando a média de duas leituras do terceiro internódio do colmo por meio de paquímetro digital, com resolução de 0,01 mm.

A parcela útil correspondeu a 3 m de comprimento das duas linhas centrais da parcela experimental. A produtividade de grãos de milho foi obtida extrapolando-se a produção de grãos da área útil da parcela para um hectare, considerando-se o teor de

água das sementes de 14%. Os componentes avaliados da produtividade do milho foram: número de filas de grãos por espiga, número de grãos por fila e comprimento de espiga, em dez espigas por parcela; e massa de 100 grãos. A massa de 100 grãos foi avaliada pela contagem manual de cinco amostras de 100 grãos por parcela, pesagem e correção do teor de água para 14%.

Para as determinações da densidade, resistência à penetração e espaço poroso do solo, foram coletadas amostras com estrutura preservada em cilindros metálicos com 5,57 cm de diâmetro e 4,1 cm de altura nas profundidades de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m. As amostras foram retiradas nas entrelinhas da cultura do milho. Em cada parcela e profundidade foram coletadas três sub-amostras, sendo utilizado o valor médio como representativo.

Após o preparo das amostras, essas foram saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água até atingir cerca de 2/3 da altura do anel e realizado o procedimento para obtenção da microporosidade pelo método da mesa de tensão, conforme descrito em Embrapa (1997). Estas amostras foram novamente saturadas e submetidas à tensão de 0,01 MPa, em câmeras de Richards, conforme Klute (1986). Esta tensão geralmente tem sido aplicada no solo, para posterior determinação da resistência do solo à penetração (SMITH et al., 1997).

Quando as amostras atingiram o equilíbrio nesta tensão foi medida a resistência do solo à penetração, utilizando um penetrógrafo eletrônico estático com velocidade constante de penetração de 1 cm min⁻¹, com diâmetro de base da haste de 4 mm e semi-ângulo de 30°, desenvolvido por Serafim et al. (2008). As amostras obtidas nos 5 mm superiores e inferiores da amostra foram descartadas, visando eliminar o efeito da periferia da amostra (BRADFORD, 1986). A frequência de leituras de resistência do solo à penetração correspondeu à coleta de um valor a cada 0,25 segundos, obtendo-se 800 leituras por amostra, sendo utilizado o valor médio.

Após a determinação da resistência à penetração, as amostras foram levadas à estufa a 105-110 °C, por 48 horas, para determinar a umidade volumétrica e a densidade do solo pelo método do anel volumétrico. A porosidade total e a macroporosidade foram obtidas como proposto em Embrapa (1997).

A distribuição de agregados foi determinada para as quatro profundidades do solo, pelo método de peneiramento úmido. Sendo retirados blocos de solo com estrutura levemente alterada, secados ao ar, e passados em peneiras de 9,52 e 4,76 mm. Os agregados retidos na peneira de 4,76 mm foram empregados nas análises de

estabilidade de agregados via úmida, a qual foi realizada colocando as amostras sobre um jogo de peneiras com malhas de 2,0; 1,0; 0,5 e 0,105 mm, e submetendo-as a oscilações verticais, durante 15 minutos numa frequência de 32 oscilações por minuto. Foi adotado como índices de estabilidade, o diâmetro médio geométrico e o diâmetro médio ponderado, cujos cálculos foram feitos seguindo o proposto por Kemper e Rosenau (1986).

A qualidade física do solo foi avaliada com o uso de modelos gráficos, em que cada parâmetro foi locado em um dos seus eixos (COSTA et al., 2006). Os gráficos avaliam qualitativamente a tendência do impacto dos estados de compactação sobre o plantio direto. Os atributos físicos medidos no tratamento plantio direto sem compactação adicional (PD) foram adotados como referência. O indicador numérico para expressar o efeito do tratamento sobre cada atributo utilizado (macroporosidade, resistência do solo à penetração, densidade do solo e porosidade total) foi definido como sendo a diferença entre o valor determinado e o quociente do valor do parâmetro considerado e seu respectivo valor de referência (PD), multiplicado por 100% (MARCHÃO et al., 2007). Qualquer valor de indicador numérico de qualidade será positivo em qualquer valor superior ao de referência e negativo em qualquer valor inferior.

Os dados da cultura do milho foram submetidos à análise de variância, e quando significativa foi aplicado o teste de Duncan, a 5% de probabilidade, para a comparação de médias. Também, foi montada matriz de correlação, objetivando efetuar as correlações lineares simples para as combinações duas a duas, entre todos os atributos físicos do solo estudados, e destes com a produtividade do milho. Para isso foi utilizado o aplicativo computacional SAEG (RIBEIRO JÚNIOR, 2001).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Houve correlação significativa ($p < 0,01$), entre todos os atributos físicos do solo estudados (Quadro 1) uma vez que o aumento no estado de compactação reflete no incremento dos valores de densidade do solo, resultando em aumento da resistência do solo à penetração e alterações no espaço poroso do solo, sendo semelhante aos resultados obtidos por Araújo et al. (2007) em Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico de textura muito argilosa. Freddi et al. (2008) trabalhando em Latossolo Vermelho Eutroférico de textura argilosa observaram coeficientes de correlação elevados e significativos entre a macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo.

QUADRO 1. Estimativas das correlações de Pearson entre atributos físicos do solo em Latossolo Vermelho Distrófico de textura muito argilosa

	MAC	MIC	PT	RP	UM	DS	DMG	DMP
MAC	-							
MIC	-0,78**	-						
PT	0,84**	-0,32**	-					
RP	-0,81**	0,44**	-0,84**	-				
UM	-0,81**	0,88**	-0,46**	0,54**	-			
DS	-0,82**	0,70**	-0,63**	0,71**	0,76**	-		
DMG	-0,85**	0,60**	-0,77**	0,77**	0,70**	0,70**	-	
DMP	-0,62**	0,40**	-0,59**	0,65**	0,45**	0,50**	0,78**	-

** significativo pelo teste t, a 1% de probabilidade. MAC – macroporosidade; MIC – microporosidade; PT – porosidade total; RP – resistência do solo à penetração na capacidade de campo (0,01 MPa); UM – umidade volumétrica na capacidade de campo (0,01 MPa); DS – densidade do solo; DMG – diâmetro médio geométrico; e DMP – diâmetro médio ponderado. Correlações entre os atributos físicos do solo determinadas na camada de 0,0-0,20 m ($n = 100$).

O aumento da densidade do solo ocasionou diminuição da macroporosidade e porosidade total; e aumento da microporosidade, umidade volumétrica, resistência do solo à penetração e diâmetro médio geométrico do agregado (Figura 2) e diâmetro médio ponderado (Quadro 1), estando de acordo com os resultados de porosidade do solo e resistência do solo à penetração, em função da densidade do solo obtido por Secco et al. (2004) e Collares et al. (2008). Resultados semelhantes foram obtidos por Muller et al. (2001) em Argissolo Vermelho-Amarelo; e Stone et al. (2002) em Latossolo Vermelho Perférico de textura argilosa, que encontraram redução da macroporosidade e porosidade total com o aumento da densidade do solo.

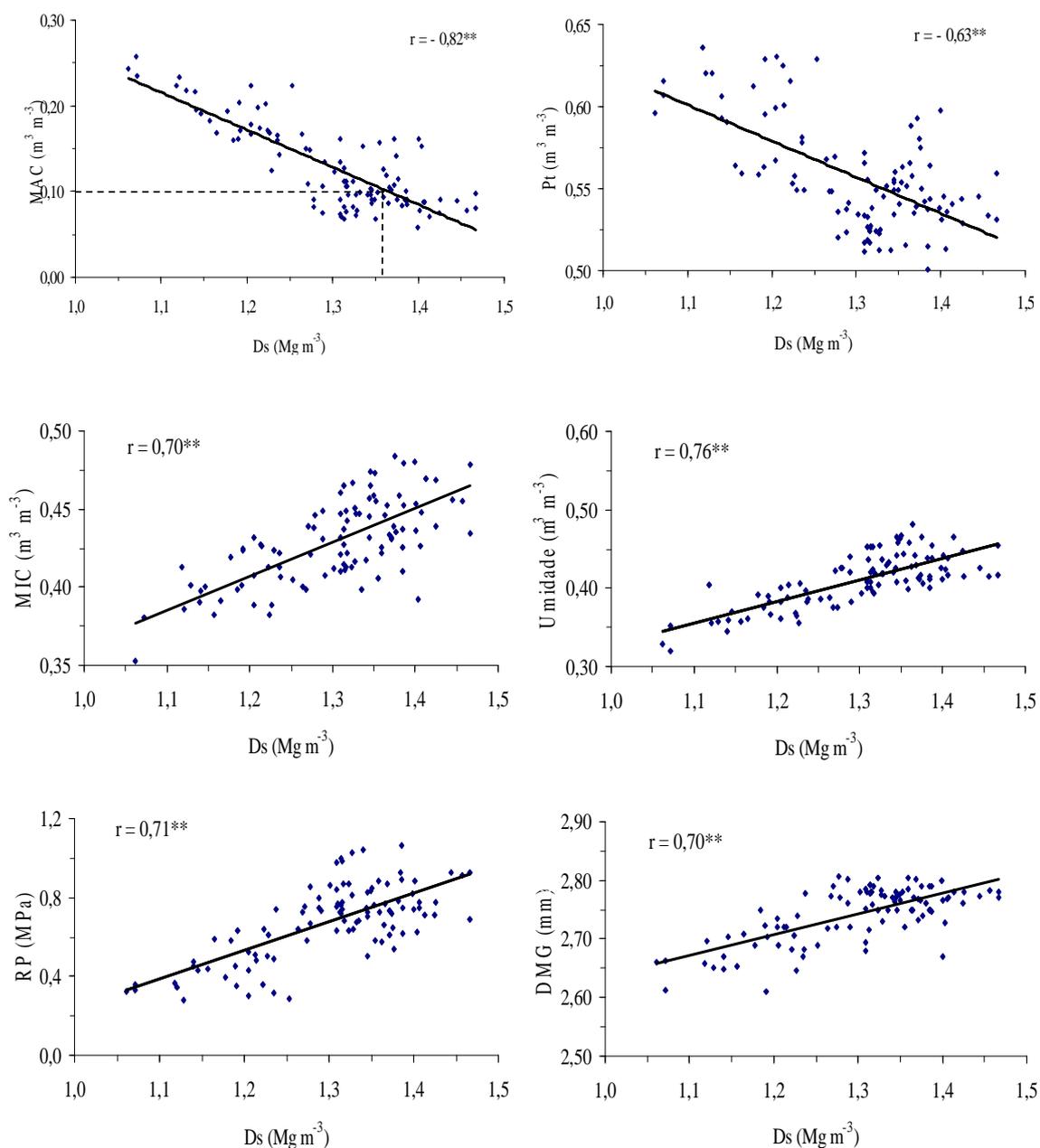


FIGURA 2. Macroporosidade (MAC), microporosidade (MIC), porosidade total (Pt), umidade volumétrica, resistência do solo à penetração (RP) e diâmetro médio geométrico (DMG) em função da densidade do solo (D_s). RP e Umidade, determinadas com conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa. ** significativo pelo teste t, a 1% de probabilidade. $n=100$ (camada de 0,0-0,20 m).

Em solo com densidade elevada ocorre redistribuição dos tamanhos dos poros, com a redução da porosidade total e macroporosidade, tendendo a aumentar a microporosidade e a umidade volumétrica do solo (Figura 2). Muller et al. (2001) e Silva et al. (2006b) observaram essa mesma tendência, que o aumento da microporosidade ocasionada pelo aumento da densidade do solo acarreta em maior

volume de água no solo. Mas este aumento na umidade volumétrica do solo não pode ser considerado benéfico, pois está relacionado com o aumento da densidade do solo.

Ao se considerar uma macroporosidade mínima de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para o suprimento adequado de oxigênio as plantas (PAGLIAI et al., 2003), esse valor correspondeu a uma densidade do solo de, aproximadamente, $1,36 \text{ Mg m}^{-3}$ (Figura 2), indicando maior risco de limitações ao desenvolvimento e crescimento das plantas pela redução do crescimento radicular e absorção de água e nutrientes, em densidade do solo igual ou superior a este valor. No município de Cruz Alta (RS), Secco et al. (2004) encontraram em Latossolo Vermelho Distroférico de textura argilosa, cultivado em sistema plantio direto, que os valores de macroporosidade do solo foram inferiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, quando a densidade do solo foi igual ou superior a $1,36 \text{ Mg m}^{-3}$. Freddi et al. (2008) em Latossolo Vermelho Eutroférico argiloso também encontraram valor semelhante, com a diminuição da porosidade de aeração pelo aumento da densidade do solo, esta alcançou valores restritivos ao intervalo hídrico ótimo igual ou acima de $1,35 \text{ Mg m}^{-3}$.

Secco et al. (2004), Silva et al. (2006b) e Araújo et al. (2007) observaram correlações lineares e positivas entre a densidade do solo e a resistência do solo à penetração, corroborando com os resultados encontrados neste estudo (Figura 2). Ribon e Tavares Filho (2004) procurando modelos para estimar a resistência do solo à penetração, observaram correlação positiva entre este atributo e a densidade do solo.

Quanto à correlação positiva entre a densidade do solo e o diâmetro médio geométrico (Figura 2) e diâmetro médio ponderado (Quadro 1), este resultado pode ser explicado pela tensão exercida no solo pelos estados de compactação, facilitando a aproximação das partículas e aumento da consistência dos agregados. O diâmetro médio geométrico correlacionou de forma linear e positiva com o diâmetro médio ponderado. O aumento do diâmetro dos agregados reduziu a porosidade total e macroporosidade, aumentando o microporosidade do solo (Quadro 1). Isto é válido para o sistema plantio direto que possui uma estrutura bem desenvolvida e com boa capacidade de suporte de carga, não sendo observado a ruptura dos agregados com o aumento da densidade do solo. Silva et al. (2006b) encontraram resultados semelhantes quando trabalharam com pressões de compactação de até 120 kPa em Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso. Stone et al. (2002) citam que a compactação do solo causa uma aproximação das partículas, diminuindo a porosidade total.

O aumento da resistência do solo à penetração ocasionou redução da macroporosidade e porosidade total; e aumento da microporosidade, umidade volumétrica, diâmetro médio geométrico e diâmetro médio ponderado (Figura 3).

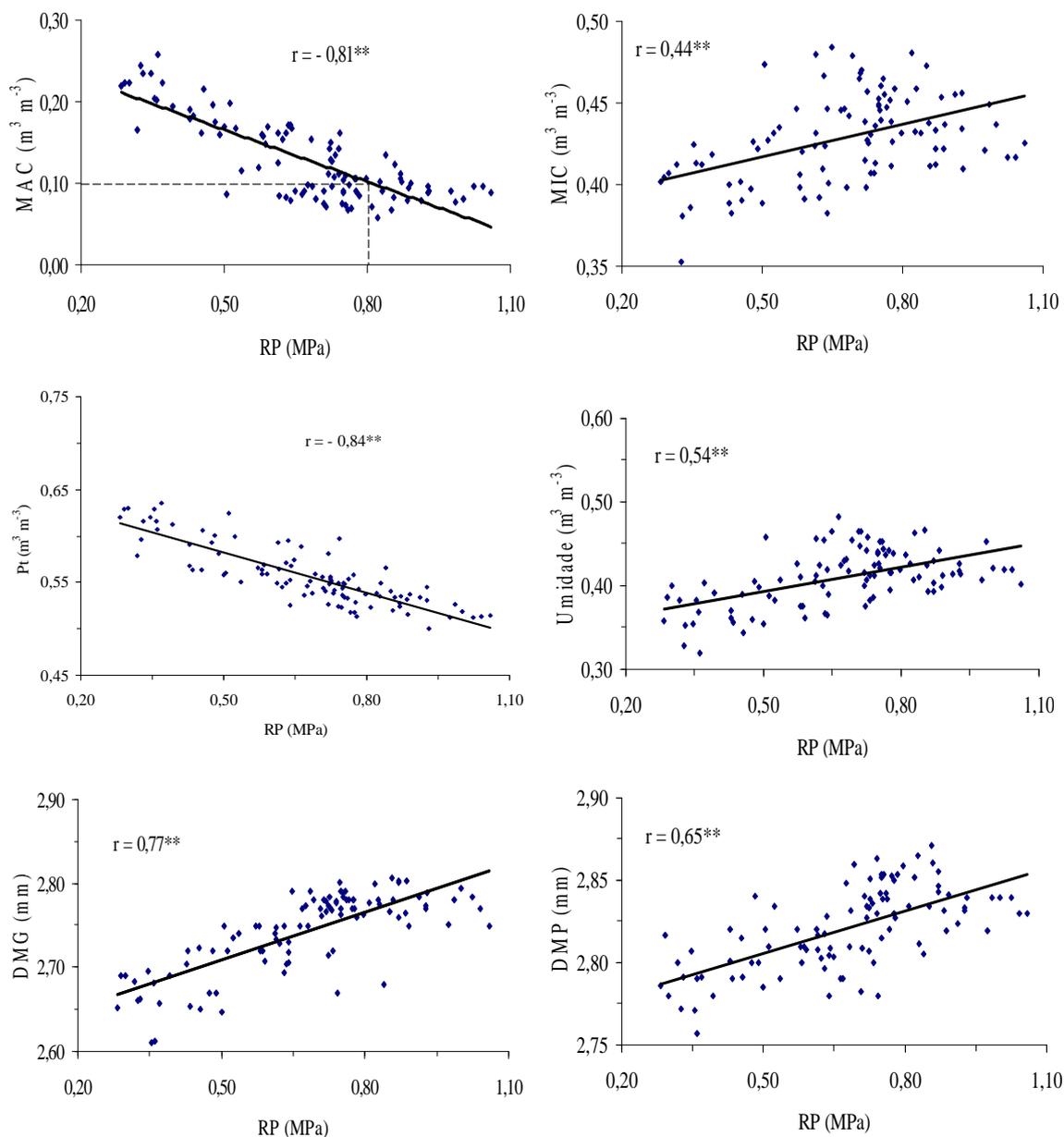


FIGURA 3. Macroporosidade (MAC), microporosidade (MIC), porosidade total (Pt), umidade volumétrica, diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP) em função da resistência do solo à penetração (RP). RP e Umidade, determinadas com conteúdo de água retida em capacidade de campo (0,01 MPa). **significativo pelo teste t, a 1% de probabilidade. n = 100 (camada de 0,0-0,20 m).

Este aumento da umidade volumétrica com o aumento da resistência do solo à penetração está relacionado com aumento na densidade do solo. Pois, tanto a umidade

quanto a resistência, foram determinadas no solo com conteúdo de água na capacidade de campo (0,01 MPa), sendo as diferenças de umidade entre as amostras, relacionadas a maior quantidade de solo por unidade de volume em solo mais compactado, aumentando seu conteúdo volumétrico de água. Esses resultados estão coerentes com Silva et al. (2006b), que avaliando atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do solo, verificaram correlação linear significativa ($p < 0,001$) e positiva entre a resistência do solo à penetração e microporosidade; e negativa com a porosidade total e macroporosidade.

Os valores de resistência do solo à penetração obtidos no trabalho estão abaixo do preconizado como crítico pela literatura de 2,0 MPa (Taylor et al., 1966). Vale salientar que os valores de resistência do solo à penetração foram determinados com conteúdo de água no solo na capacidade de campo (0,01 MPa), sendo que nas áreas cultivadas, em grande parte do tempo, o conteúdo de água no solo fica abaixo da capacidade de campo, podendo encontrar valores de resistência do solo à penetração superiores ao considerado crítico. Para Llanillo et al. (2006) dependendo das condições de densidade e umidade, as áreas cultivadas podem rapidamente atingir valores de resistência do solo à penetração maiores que 2 MPa, principalmente em plantio direto.

Considerando uma macroporosidade mínima de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para o suprimento adequado de oxigênio as plantas (PAGLIAI et al., 2003), esse valor correspondeu a uma resistência do solo à penetração de, aproximadamente, 0,81 MPa (Figura 3). Servadio et al. (2005) em trabalho realizado na Itália em solo submetido a diferentes intensidades de tráfego de máquinas, verificaram correlações significativas e negativas entre a resistência do solo à penetração e a macroporosidade. Estes mesmos autores obtiveram macroporosidade abaixo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ com resistência do solo à penetração de 1,36 e 1,21 MPa, nas camadas de 0,0-0,10 e ,10-0,20 m de profundidade, respectivamente.

As relações entre a resistência do solo à penetração e diâmetro de agregados confirmam a observação anterior para a densidade do solo em que se aumenta o diâmetro médio geométrico e ponderado com o aumento da compactação do solo (Figura 3). Isso vem confirmar as interações entre esses atributos (Quadro 1).

Na figura 4 podem ser observadas as relações da porosidade total e microporosidade com a macroporosidade. Verifica-se que uma porosidade total menor ou igual a $0,54 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, se torna crítica ao desenvolvimento das plantas por expressar uma macroporosidade menor que $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Analisando a relação da

macroporosidade com a microporosidade, observa-se que a partir da microporosidade de $0,44 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a macroporosidade pode se tornar limitante, pois se encontra abaixo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

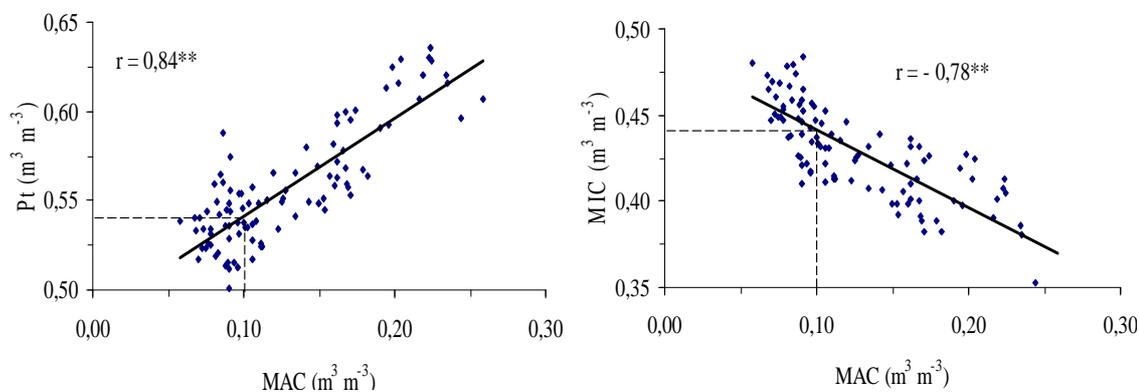


FIGURA 4. Porosidade total (Pt) e microporosidade (MIC) em função da macroporosidade do solo (MAC). **significativo pelo teste t, a 1% de probabilidade. n = 100 (camada de 0,0-0,20 m).

Os valores médios de resistência do solo à penetração, densidade do solo e macroporosidade, obtidos nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes estados de compactação do solo, nas camadas de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m de profundidade, estão apresentados no quadro 2.

QUADRO 2. Valores médios de resistência do solo à penetração, densidade do solo e macroporosidade nos tratamentos e profundidades em Latossolo Vermelho Distroférico de textura muito argilosa

Profundidade (m)	Tratamentos ⁽¹⁾				
	PD	PDc1	PDc2	PDc4	PDc6
Resistência do solo à penetração (MPa) ⁽²⁾					
0,0-0,10	0,49	0,51	0,55	0,72	0,73
0,10-0,20	0,68	0,72	0,75	0,80	0,82
Média (0,0-0,20)	0,59	0,62	0,65	0,76	0,78
Densidade do solo (Mg m^{-3})					
0,0-0,10	1,2	1,22	1,29	1,30	1,30
0,10-0,20	1,31	1,34	1,35	1,35	1,36
Média (0,0-0,20)	1,26	1,28	1,32	1,33	1,33
Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)					
0,0-0,10	0,20	0,19	0,16	0,13	0,13
0,10-0,20	0,11	0,10	0,09	0,09	0,09
Média (0,0-0,20)	0,16	0,15	0,13	0,11	0,11

⁽¹⁾PD – plantio direto sem compactação adicional; PDc1, PDc2, PDc4 e PDc6 – correspondem a plantio direto com compactação adicional por tráfego de trator de 5 Mg em uma, duas, quatro e seis passadas, respectivamente. ⁽²⁾Resistência do solo à penetração determinada com conteúdo de água retida em capacidade de campo (0,01 MPa).

A qualidade física do solo está representada na figura 5, pelo modelo gráfico comparativo para a resistência do solo à penetração, densidade do solo, macroporosidade e porosidade total com as alterações relativas de cada parâmetro em relação ao plantio direto (PD).

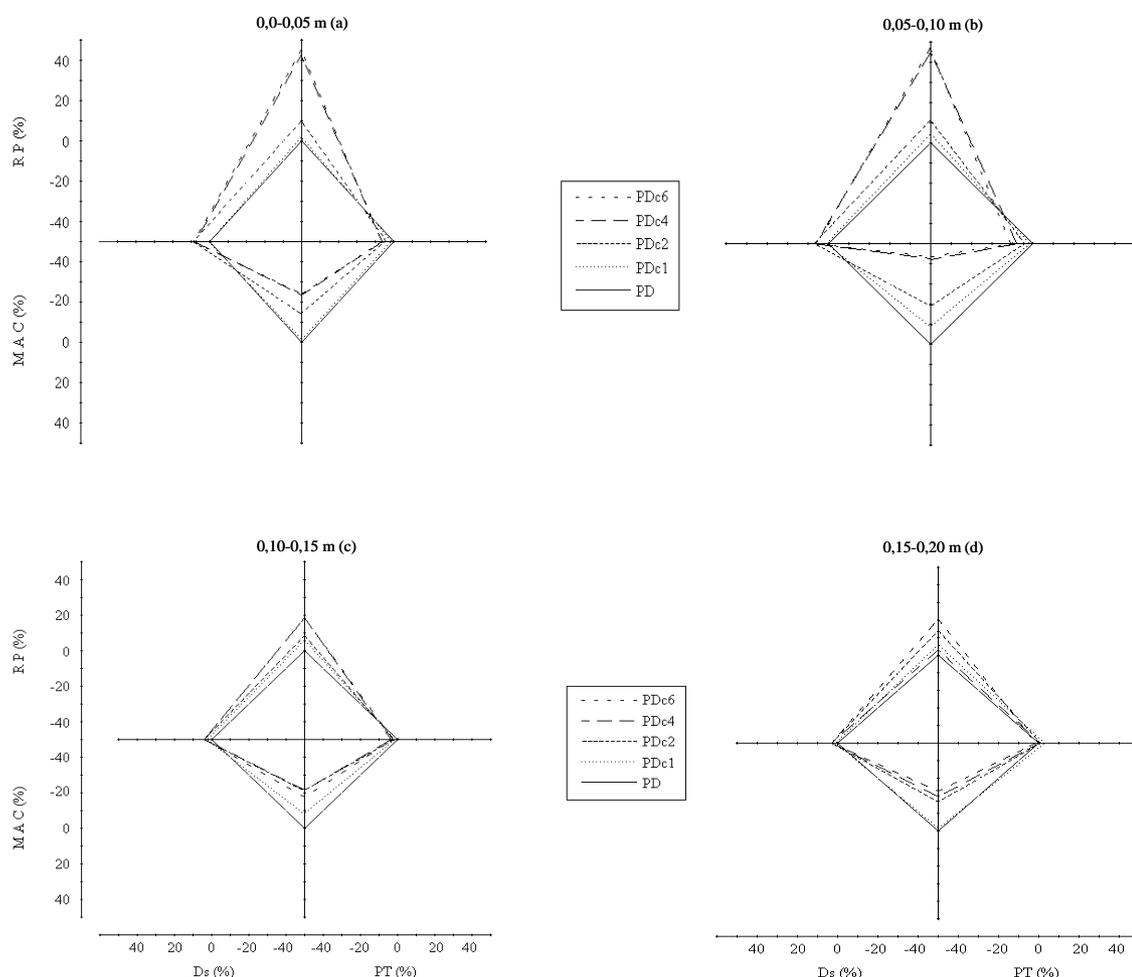


FIGURA 5. Modelo gráfico comparativo da qualidade física do solo em sistema plantio direto com compactação adicional, relativo ao sistema plantio direto (PD) que reflete a condição atual do solo sem compactação adicional, nas profundidades 0,0-0,5 m (a); 0,05-0,10 m (b); 0,10-0,15 m (c); e 0,15-0,20 m (d), considerando os valores relativos dos parâmetros resistência do solo à penetração (RP), macroporosidade (MAC), densidade do solo (Ds) e porosidade total (PT).

Foi verificado que os tratamentos PDC4 e PDC6 causaram as maiores alterações nos atributos físicos avaliados no sistema plantio direto (PD), sendo os resultados entre ambos muito semelhantes. Houve uma tendência de redução desses desvios com o aumento da profundidade, sendo observadas as maiores alterações na camada de 0,0-0,10 m de profundidade (Figura 5a e 5b). Isso se deve ao fato do sistema

plântio direto já ter sofrido durante oito anos o acúmulo de pressões na superfície do solo, promovendo uma condição estrutural que apresenta maior resistência à compactação, não atingindo as camadas mais profundas. Assim sendo, o tráfego de máquinas em sistema plântio direto provoca aumento expressivo da compactação somente na camada de 0,0-0,10 m de profundidade (SECCO et al., 2004; COLLARES et al., 2006; FREDDI et al., 2007a), não havendo significativa transferência da capacidade de compactação para camadas mais profundas.

A densidade do solo apresentou moderadas deformações pelo fato do plântio direto possuir uma estrutura mais resistente a compactação, porém sempre superior à densidade do solo observada no PD em todos os estados induzidos de compactação. A máxima deformação para este parâmetro ocorreu na camada de 0,0-0,05 m com aproximadamente 10% de incremento nos valores de densidade do solo nos tratamentos PDc4 e PDc6 (Figura 5a), sendo o efeito do aumento nos estados de compactação reduzido de forma gradativa com a profundidade. Para a porosidade total, foram observadas pequenas deformações, mesmo nas profundidades de 0,0-0,05 e 0,05-0,10 m. Sendo observado na camada de 0,0-0,05 m, uma redução de aproximadamente 8,7% na porosidade total do solo para os tratamentos PDc4 e PDc6 (Figura 5a). Analisando a qualidade física do solo, com os desvios relativos à densidade do solo e porosidade total em diferentes sistemas de manejo, Marchão et al. (2007) não encontraram substanciais alterações na porosidade total e densidade do solo, por sua vez, a camada de 0,0-0,05 m foi onde se obteve as maiores modificações para estes dois atributos físicos.

A resistência do solo à penetração e a macroporosidade foram os atributos que melhor representaram as alterações físicas ocorridas no sistema plântio direto com o aumento nos estados de compactação do solo (Figura 5). O eixo da resistência do solo à penetração foi o que apresentou maiores deformações até a profundidade de 0,0-0,15 m, sendo que na camada de 0,15-0,20 m o eixo da macroporosidade foi o que expressou as deformações mais elevadas, estando de acordo com Marchão et al. (2007), que observaram ser a resistência do solo à penetração e a macroporosidade, os atributos físicos de solo mais sensíveis às alterações no solo decorrentes dos sistemas de manejo.

Os aumentos da resistência do solo à penetração foram de aproximadamente 49%, 48%, 20% e 20% comparando o PD com PDc4 e PDc6, nas camadas de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m de profundidade, respectivamente. Já para a macroporosidade, comparando os mesmos tratamentos em suas respectivas camadas de

solo, se observam reduções de aproximadamente 26%, 44%, 17% e 30% na macroporosidade do solo.

O aumento no estado de compactação do solo, causada pelo tráfego do trator, restringiu o índice de velocidade de emergência, diâmetro do colmo e altura de plantas de milho (Quadro 3). Estes dados confirmam os resultados obtidos por Freddi et al. (2008) em Latossolo Vermelho Eutroférico de textura argilosa, que verificaram redução da altura de plantas e diâmetro do colmo do milho, com o aumento nos estados de compactação do solo induzidos pelo tráfego de máquinas.

QUADRO 3. Índice de velocidade de emergência (IVE), diâmetro de colmo (DColmo) e altura de plantas de milho (AltPl) nos tratamentos em estudo em Latossolo Vermelho Distroférico de textura muito argilosa

Tratamentos ⁽¹⁾	IVE	DColmo (cm)	AltPl (cm)
PD	10,33 a	21,04 a	2,26 a
PDc1	9,39 a	20,88 a	2,22 ab
PDc2	6,55 b	18,57 b	2,21 ab
PDc4	6,49 b	18,24 b	2,19 bc
PDc6	6,46 b	18,11 b	2,15 c
CV%	9,05	4,14	1,56

⁽¹⁾PD – plantio direto sem compactação adicional; PDc1, PDc2, PDc4 e PDc6 – correspondem a plantio direto com compactação adicional por tráfego de trator de 5 Mg em uma, duas, quatro e seis passadas, respectivamente. Médias na coluna seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

O tráfego de trator em até uma vez, não alterou o índice de velocidade de emergência e o diâmetro do colmo do milho, por sua vez, o acúmulo de pressões sobre o solo, exercidas por duas à seis passadas do trator, reduziram estes componentes da cultura, não sendo encontrado diferenças entre estes tratamentos (PDc2, PDc4 e PDc6). Foi verificado que no tratamento PDc6 a planta de milho apresentou a menor altura, mas este não diferiu do PDc4. Já os tratamentos PD, PDc1 e PDc2 apresentaram as maiores alturas, não sendo observadas diferenças entre ambos. Estes resultados podem ser explicados pelo aumento nos valores de resistência do solo à penetração induzida pelo tráfego de trator. Para Freddi et al. (2008) uma resistência do solo acima de 0,34 MPa, determinada na tensão de 0,01 MPa, causa restrições ao crescimento das plantas de milho.

O número de fileiras de grãos por espiga, número de grãos por fileira e comprimento de espiga de milho, não foram alterados pelos diferentes tratamentos. Já a massa de 100 grãos e a produtividade de grãos de milho foram negativamente

influenciadas pelo aumento nos estados de compactação do solo (Quadro 4), concordando com os resultados obtidos por Freddi et al. (2007b) em Latossolo Vermelho Distrófico de textura média submetido a compactação induzida, que verificaram redução da massa de 1000 grãos e produtividade do milho com o aumento nos estados de compactação do solo. O tratamento PDc6 apresentou a menor massa de 100 grãos, enquanto o PD obteve a maior massa, mas não diferindo do PDc1.

QUADRO 4. Número de fileiras de grãos por espiga (NFile), número de grãos por fileira (NGr), comprimento de espiga (CEsp), massa de 100 grãos (M100Gr) e produtividade de grãos (Prod) de milho para os tratamentos em estudo em Latossolo Vermelho Distroférico de textura muito argilosa

Tratamentos ⁽¹⁾	NFile	NGr	CEsp (cm)	M100Gr (g)	Prod (Mg ha ⁻¹)
PD	14 a	38,96 a	16,48 a	32,97 a	7,70 a
PDc1	14 a	37,60 a	15,90 a	32,22 ab	7,63 a
PDc2	14 a	37,20 a	15,63 a	31,98 b	7,62 a
PDc4	14 a	34,92 a	15,22 a	31,65 b	7,11 ab
PDc6	14 a	34,54 a	14,58 a	30,77 c	6,95 b
CV%	3,82	7,16	6,12	1,96	5,51

⁽¹⁾PD – plantio direto sem compactação adicional; PDc1, PDc2, PDc4 e PDc6 – correspondem a plantio direto com compactação adicional por tráfego de trator de 5 Mg em uma, duas, quatro e seis passadas, respectivamente. Médias na coluna seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

Observa-se uma tendência de maior produtividade do milho para os tratamentos que apresentaram menor compactação do solo (Quadro 4). O tratamento PDc6 foi o que apresentou a menor produtividade de milho, mas não diferindo do PDc4. Os tratamentos PD, PDc1, PDc2 e PDc4 não apresentaram diferenças significativas entre si, sendo os tratamentos que resultaram nas maiores produtividades para a cultura do milho. Resultados semelhantes foram obtidos por Seixas et al. (2005), estudando o tráfego intensivo de um trator agrícola de 4 Mg, onde estes autores verificaram que a compactação causada pelo trator resultou nas menores produtividades de milho em relação aos tratamentos sem compactação adicional e subsolagem.

O estado de compactação criado por seis passadas do trator (PDc6) reduziu a produtividade do milho em aproximadamente 10%, ou seja, em 0,75 Mg ha⁻¹ se comparado ao plantio direto sem compactação adicional (PD). Freddi et al. (2008), estudando os efeitos da compactação proporcionada por um trator de 11 Mg verificaram reduções de 4%, 16% e 27% na produtividade de grãos de milho, respectivamente, para

os tratamentos com uma, duas e quatro passadas do trator, em relação ao tratamento sem tráfego.

Os aumentos nos estados de compactação alteraram os atributos físicos do solo e a produtividade da cultura do milho. Para analisarmos as relações destes atributos com a produtividade do milho, foram calculadas as correlações entre estes. Para isso foram utilizados valores médios do atributo físico do solo na camada de 0,0-0,10 m, pois nessa camada geralmente são observadas as maiores alterações físicas do solo pelo acúmulo de pressões e não revolvimento do solo em plantio direto (SECCO et al., 2004; COLLARES et al., 2006; FREDDI et al., 2007a). Assim, foram calculadas as correlações entre a produtividade do milho e a macroporosidade, microporosidade, porosidade total, resistência do solo à penetração, densidade do solo, diâmetro médio geométrico e diâmetro médio ponderado, tendo-se encontrado os valores de r iguais a 0,41; -0,25; 0,32; -0,42; -0,25; -0,51 e -0,53, respectivamente, sendo que somente a macroporosidade, a resistência do solo à penetração, o diâmetro médio geométrico e o diâmetro médio ponderado apresentaram correlação significativa (Figura 6).

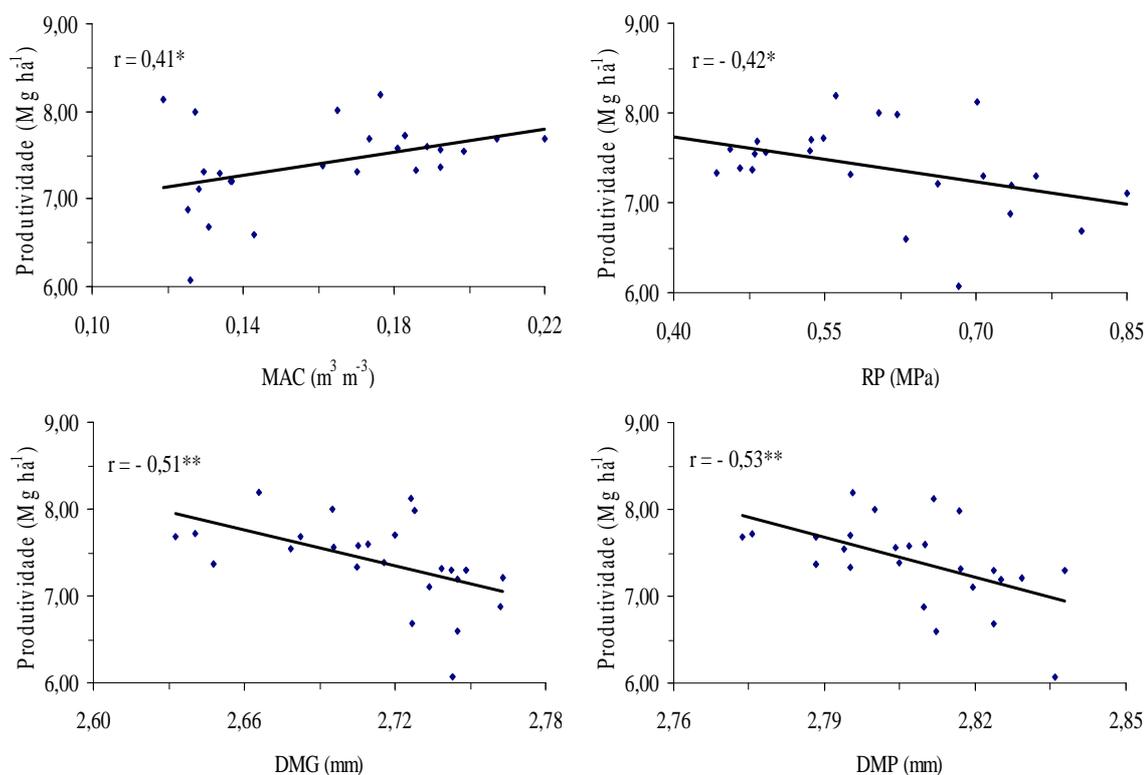


FIGURA 6. Produtividade de milho em função da macroporosidade (MAC), resistência do solo à penetração (RP), diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP). RP determinada com conteúdo de água retida em capacidade de campo (0,01 MPa).** e * significativo pelo teste t, a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente. $n = 25$ (camada de 0,0-0,10 m).

O aumento da resistência do solo à penetração, diâmetro médio geométrico e diâmetro médio ponderado restringiu linearmente a produtividade da cultura do milho, enquanto o aumento na macroporosidade beneficiou a produtividade de milho (Figura 6). Concordando com Freddi et al. (2008) trabalhando em Latossolo Vermelho Eutroférico argiloso, que verificaram redução linear da produtividade do milho com o aumento na resistência do solo à penetração acima de 0,34 MPa. Quanto à macroporosidade, Silva et al. (2004) encontraram relação positiva entre este atributo e o crescimento de plantas de milho.

CONCLUSÕES

1. Aumento na macroporosidade do solo, e redução da resistência do solo à penetração e diâmetro médio de agregados favorecem a produtividade do milho.
2. O índice de velocidade de emergência, diâmetro do colmo, altura de plantas, massa de grãos e produtividade de grãos de milho são reduzidos com o aumento do número de passadas do trator.
3. Os atributos físicos avaliados, principalmente a resistência do solo à penetração e a macroporosidade, revelam o estado de compactação do solo, dessa forma podem ser utilizados como indicadores primários da qualidade física do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, R.; GOEDERT, W.J.; LACERDA, M.P.C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.5, p.1099-1108, 2007.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P. Intervalo hídrico ótimo e a produção de soja e arroz em dois latossolos. **Irriga**, Botucatu, v.9, n.2, p.181-192, 2004.

BRADFORD, J.M. Penetrability. In: KLUTE, A. **Methods of soil analyses – physical and mineralogical methods**. 2 ed. Madison: ASA – SSSA, 1986. p.463-478.

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.11, p.1663-1674, 2006.

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.3, p.933-942, 2008.

COSTA, E.A.; GOEDERT, W.J.; SOUZA, D.M.G. de. Qualidade de solo submetido a sistemas de cultivo com preparo convencional e plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.7, p.1185-1191, 2006.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: 1997. 212 p.

FREDDI, O. da S.; CENTURION, J.F.; BEUTLER, A.N.; ARATANI, R.G.; LEONEL, C.L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.4, p.627-636, 2007a.

FREDDI, O. da S.; CENTURION, J.F.; BEUTLER, A.N.; ARATANI, R.G.; LEONEL, C.L.; SILVA, A.P da. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo no crescimento e na produtividade da cultura do milho. **Bragantia**, Campinas, v.66, n.3, p.477-486, 2007b.

FREDDI, O. da S.; CENTURION, J.F.; ARATANI, R.G.; BEUTLER, A.N. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo no crescimento da parte aérea e produtividade da cultura do milho. **Irriga**, Botucatu, v.13, n.2, p.272-287, 2008.

HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems – A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**, v.82, p.121-145, 2005.

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis - physical and mineralogical methods**. 2 ed. Madison: ASA – SSSA, 1986, p.425-441.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis - physical and mineralogical methods**. 2 ed. Madison: ASA – SSSA, 1986, p.635-662.

LLANILLO, R.F.; RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; GUIMARÃES, M. de F.; FERREIRA, R.R.M. Evolução de propriedades físicas do solo em função dos sistemas de manejo em culturas anuais. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.27, n.2, p.205-220, 2006.

LIMA, C.G. da R.; CARVALHO, M. de P.; MELLO, L.M.M. de.; LIMA, R.C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de forragem, porosidade total e a densidade do solo de Pereira Barreto (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.6, p.1233-1244, 2007.

MARCHÃO, R.L.; BALBINO, L.C.; SILVA, E.M. da.; SANTOS JÚNIOR, J.D.G. dos.; SÁ, M.A.C de.; VILELA, L.; BECQUER, T. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.6, p.873-882, 2007.

MULLER, M.M.L.; GUIMARÃES, M. de F; DESJARDINS, T.; MARTINS, P.F. da S. Degradação de pastagens na Região Amazônica: propriedades físicas do solo e crescimento de raízes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.11, p.1409-1418, 2001.

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 medium power. **Soil & Tillage Research**, v.73, n.1-2, p.119-129, 2003.

RAPER, R.L. Agricultural traffic impacts on soil. **Journal of Terramechanics**, v.42, n.3-4, 259-280, 2005.

RIBEIRO JÚNIOR, J.I. **Análises estatísticas no SAEG**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2001. 301 p.

RIBON, A.A.; TAVARES FILHO, J. Models for the Estimation of the Physical Quality of a Yellow Red Latosol (Oxisol) Under Pasture. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v.47, n.1, p.25-31, 2004.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O.R.; LLANILLO, R.F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.26, n.3, p.321-344, 2005.

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, n.5, p.797-804, 2004.

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

SERAFIM, M.E. **Desenvolvimento de um penetrógrafo de bancada visando a determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO) em diferentes sistemas de produção.** 2007. 79 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados-MS.

SERAFIM, M.E.; VITORINO, A.C.T.; SOUZA, C.M.A.; PRADO, E.D.; VENTURIN, J.C.; YAMAMOTO, N.T. Desenvolvimento de um penetrógrafo eletromecânico de bancada. **Revista Ciências Técnicas Agropecuarias**, Havana, v.17, n.1, p.61-65, 2008.

SERVADIO, P.; MARSILI, A.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S.; PAGLIAI, M. Effects on some soil qualities in central Italy following the passage of four wheel drive tractor fitted with single and dual tires. **Soil & Tillage Research**, v.84, p.87–100, 2005.

SILVA, A.P. da.; IMHOFF, S.; KAY, B. Plant response to mechanical resistance and air-filled porosity of soils under conventional e no-tillage system. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.61, n.4, p.451-456, 2004.

SILVA, G.J.; MAIA, J.C.S.; BIANCHINI, A. Crescimento da parte aérea de plantas cultivadas em vaso, submetidas a irrigação subsuperficial e a diferentes graus de compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v.30, n.1, p.31-40, 2006a.

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

SMITH, C.W.; JOHNSTON, M.A.; LORENTZ, S. The effect of soil compaction and soil physical properties on the mechanical resistance of South African forestry soils. **Geoderma**, v.78, p.93-111, 1997.

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

SUZUKI, L.E.A.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; LIMA, C.L.R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.8, p.1159-1167, 2007.

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

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

ARTIGO 3

ESTRUTURA ANATÔMICA DE RAÍZES DE MILHO CULTIVADO EM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRICO COM COMPACTAÇÃO INDUZIDA PELO TRÁFEGO DE TRATOR

RESUMO

A compactação dos solos agrícolas pode causar modificações morfológicas, fisiológicas e anatômicas nas raízes das plantas. Assim, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a estrutura anatômica das raízes de milho e sua relação com os atributos físicos em Latossolo Vermelho Distroférico de textura muito argilosa, em função de diferentes estados de compactação induzidos pelo tráfego de um trator. O estudo foi realizado a campo, na área da Fazenda Experimental de Ciências Agrárias da UFGD, no município de Dourados, MS. O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados com cinco repetições. Os tratamentos foram constituídos por estados induzidos de compactação, sendo: PD – condição atual que reflete o histórico de oito anos de plantio direto; plantio direto com compactação adicional por tráfego de trator em uma (PDc1); duas (PDc2), quatro (PDc4) e seis passadas (PDc6). Houve aumento na razão entre o córtex e o cilindro vascular da raiz com o aumento na compactação do solo. Essa razão correlacionou-se de modo significativo e negativo com a macroporosidade e, positivo com a densidade do solo e resistência do solo à penetração. A compactação adicional afeta a anatomia das raízes de milho, sendo a macroporosidade o melhor indicador físico do solo para expressar este efeito.

Palavras-chave: anatomia de raiz, atributos físicos, *Zea mays* L.

ANATOMIC STRUCTURE OF THE ROOTS OF MAIZE GROWN IN RED LATOSOL WITH COMPACTION INDUCED BY TRAFFIC OF TRACTOR

ABSTRACT

Compaction of agricultural soils can cause morphologic changes, physiologic and anatomic roots of plants. The present study aimed at evaluating the effect of soil compaction on the root anatomy of maize and its relation to the physical attributes in Red Latosol, with different states of compaction induced by traffic of a tractor. The study was conducted in the field, in the Experimental Farm of Agricultural Sciences, Federal University of Grande Dourados, in Dourados, MS. The experimental design was randomized blocks with five replications. The treatments consisted of induced states of compaction, with: PD - current condition that reflects the history of eight years of no-tillage system, no-tillage with additional compaction by tractor traffic in one (PDc1), two (PDc2), four (PDc4) and six passes (PDC6). It was observed a increase in the ratio between the cortex and vascular cylinder of the root with the increase in soil compaction. This ratio showed a negative correlation with the macroporosity and positive, with the soil resistance to penetration and soil density. The additional compaction affects the anatomy of roots of maize, being the macroporosity the best physical indicator of ground to express this.

Index terms: anatomy of root, physical attributes, *Zea mays* L.

INTRODUÇÃO

O milho é um importante cereal na agricultura brasileira, apresentando a segunda maior produção de grãos, com cerca de 58,6 milhões de toneladas, em uma área de aproximadamente 15 milhões de hectares (CONAB, 2009), onde grande parte desta produção é originada de cultivos realizados sob o sistema de plantio direto. No entanto, a produtividade de grande parte destes cultivos poderia ser aumentada não fossem limitações de ordem física a que estão submetidas essas lavouras.

Com a utilização intensiva do solo nos sistemas atuais de produção agrícola utilizados, a compactação do solo assume crescente relevância em face à mecanização nas diversas fases do processo produtivo, fato agravado pela intensificação dos cultivos (safra e safrinha), e o não revolvimento do solo no sistema plantio direto (GONÇALVES et al., 2006). A compactação do solo influi negativamente sobre a qualidade física do solo, limitando a produtividade das culturas (HAMZA e ANDERSON, 2005; COLLARES et al., 2008), principalmente em solos argilosos (COLLARES et al., 2006). Para Hamza e Anderson (2005) a principal causa desta compactação é a intensificação da agricultura, o que tem sido feito com elevado tráfego de máquinas cada vez mais robustas, aumentando a quantidade de áreas compactadas e degradando a qualidade física do solo.

A compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas, acarreta aumento da massa de sólidos por unidade de volume, elevando os valores de densidade do solo e resistência do solo à penetração, com redução da porosidade total e da macroporosidade, enquanto que os microporos permanecem praticamente inalterados (STONE et al., 2002; STRECK et al., 2004).

As conseqüências desta compactação se manifestam no solo e na planta. A estrutura do solo é alterada em função da compactação, tornando-o mais denso e, acarretando no empocamento de água, erosão hídrica, poluição e assoreamento dos mananciais de água (BEUTLER et al., 2004b). Essa estrutura mais densa pode impedir o crescimento de raízes e diminuir o volume de solo explorado pelo sistema radicular (FOLONI et al., 2003; BEUTLER e CETURION, 2004; FOLONI et al., 2006), alterando também a penetração, ramificação e distribuição destas no solo (CARDOSO et al., 2006; COLLARES et al., 2008).

Entre os atributos físicos do solo, a resistência à penetração tem sido o mais adotado como indicativo da compactação do solo (STONE et al., 2002), apresentando relações diretas com o crescimento das raízes e com o tráfego de máquinas no solo (CARDOSO et al., 2006; FREDDI et al., 2007; COLLARES et al., 2008), sendo eficiente na identificação de estados de compactação. Entretanto, não tem sido possível estabelecer relações funcionais desse atributo com o crescimento do sistema radicular, pois estas são influenciadas por complexas interações entre ar-água-sólido, dificultando a obtenção de valores críticos ao crescimento e desenvolvimento das raízes das plantas (BEUTLER et al., 2004a).

As pesquisas realizadas para obter respostas das plantas em diferentes estados de compactação, normalmente, têm sido realizadas em vasos, e podem não representar realmente as condições impostas pelo ambiente a campo ao desenvolvimento das plantas. Rosolem et al. (1999), constataram que a resistência do solo à penetração de 1,30 MPa, determinada com o penetrômetro de bolso, em Latossolo Vermelho e Latossolo Roxo, diminuiu o crescimento das raízes seminais adventícias de milho. Para Foloni et al. (2003) o crescimento radicular do milho em Latossolo Vermelho Distroférico de textura média, foi prejudicado em 50% quando a resistência do solo à penetração foi igual a 0,75 MPa e foi totalmente inibido quando esta chegou a 1,4 MPa. O limite crítico de resistência do solo à penetração proposto por Taylor et al. (1966) de 2 MPa tem sido usado por autores como Tormena et al. (1998), Beutler et al. (2004) e Serafim (2007).

Em decorrência das alterações nos atributos físicos do solo, ocasionadas pelo aumento nos estados de compactação, as raízes sofrem modificações morfológicas (COLLARES et al., 2008), fisiológicas (SILVA et al., 2004) e anatômicas (QUEIROZ-VOLTAN et al., 1998), visando se adaptarem às condições adversas impostas pelo ambiente.

As práticas agrícolas exigem uma atenção especial na relação das diferentes culturas com os diversos manejos, pois a anatomia da planta está dinamicamente relacionada com essas práticas (SILVA et al., 2005). Jaramilho et al. (1992) analisando a anatomia de raízes de feijoeiro, observaram aumento na quantidade de vasos de metaxilema com o aumento da densidade do solo, não encontrando diferenças entre o diâmetro desses vasos. Queiroz-Voltan et al. (2000) não verificaram diferenças no espessamento das paredes celulares dos elementos de vaso do xilema de soja, com aumento na densidade do solo de um Latossolo Roxo. Estes autores também verificaram

que o cultivo de soja em solo com densidade máxima de $1,5 \text{ kg dm}^{-3}$ não alterou a razão entre o raio interno e externo ao câmbio vascular das raízes de soja. Dantas et al. (2001) observaram que as raízes de milho em condições de hipoxia, apresentavam grande parte da área do seu córtex ocupada por aerênquimas.

Queiroz-Voltan et al. (1998) analisando a anatomia de raízes de cana-de-açúcar em um Latossolo Roxo argiloso com densidade do solo variando de 0,94 a $1,23 \text{ kg dm}^{-3}$, encontraram uma tendência da razão entre as medidas da espessura do córtex e do cilindro vascular de raízes ser menor em áreas menos compactadas. Para Beutler et al. (2004a) é difícil generalizar conclusões, pois a influência da compactação do solo sobre o sistema radicular está em função de diversos fatores.

Mesmo com as adaptações que a planta se submete para sobreviver em condições adversas, estas podem alcançar situações críticas ao seu pleno crescimento e desenvolvimento. Neste contexto, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a estrutura anatômica das raízes de milho, e sua relação com os atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférrico de textura muito argilosa, em função de diferentes estados de compactação induzidos pelo tráfego de um trator.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na área da Fazenda Experimental de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), no município de Dourados, MS, no ano agrícola de 2007/2008. O local situa-se em latitude 22°14'08"S, longitude de 54°59'13"W e altitude de 434 m. O clima é do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen. As precipitações pluviiais e temperatura média do ar obtidas durante o ciclo da cultura do milho são apresentadas na figura 1.

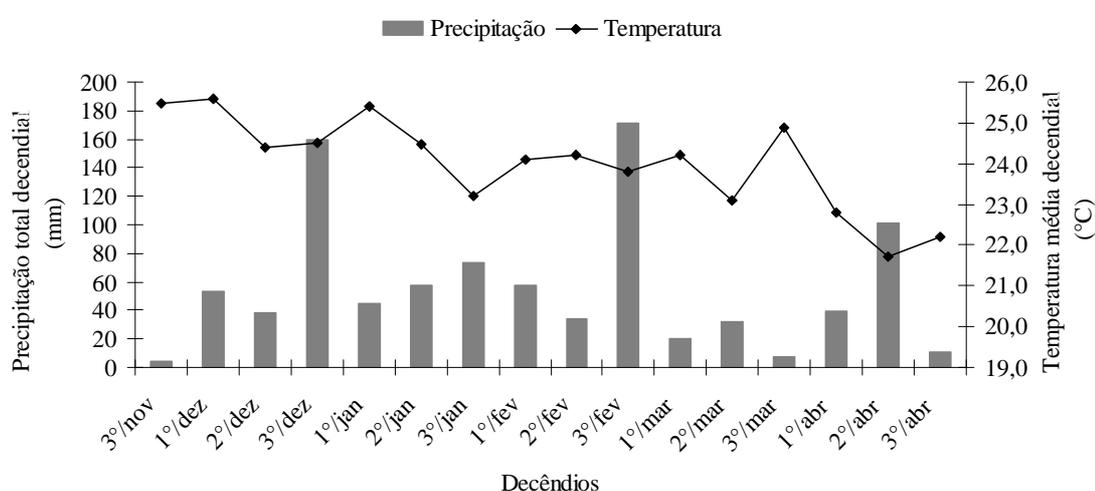


FIGURA 1. Precipitação pluviométrica total e temperatura média do ar em cada decêndio na área experimental, no período de novembro de 2007 a abril de 2008.

O solo foi um Latossolo Vermelho Distroférrico, cuja composição granulométrica, determinada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997) foi 644 g kg⁻¹ de argila, 203 g kg⁻¹ de silte e 153 g kg⁻¹ de areia nos primeiros 0,20 m. As características químicas foram: pH (H₂O) = 5,7; Ca²⁺ = 69,2 mmol_c dm⁻³; Mg²⁺ = 31,0 mmol_c dm⁻³; Al³⁺ = 0,0 mmol_c dm⁻³; H+Al³⁺ = 58,0 mmol_c dm⁻³; P = 7,0 mg dm⁻³; K = 5,1 mmol_c dm⁻³ e MO = 37 g kg⁻¹ (EMBRAPA, 1997).

O delineamento experimental foi de blocos casualizados com cinco repetições, e os tratamentos foram cinco estados de compactação: PD – Plantio direto sobre a condição atual que reflete o histórico do manejo de oito anos de plantio direto; PDc1, PDc2, PDc4 e PDc6 - Plantio direto com compactação adicional por tráfego de

trator em uma, duas, quatro e seis passadas, respectivamente. As parcelas mediram 5 m de comprimento e 3,6 m de largura, possuindo uma área total de 18 m².

A indução a compactação do solo foi realizada no dia 13 de novembro de 2007, dois dias após intensa precipitação pluvial, quando o solo possuía um conteúdo de água próximo à capacidade de campo de 0,28 kg kg⁻¹ na camada de 0,0-0,20 m de profundidade, determinado conforme proposto em Embrapa (1997). Foi utilizado um trator agrícola MF 292 (105 cv), com rodado de pneus diagonais e massa total de 5 Mg, com pressão de inflação de 96 kPa nos pneus dianteiros (14.9 – 24 R1) e 110 kPa nos pneus traseiros (18.4 – 34 R1), sendo 39% da massa do trator distribuída no eixo dianteiro e 61% no eixo traseiro. A compactação foi realizada por meio da passagem dos rodados deste trator, perfazendo toda a superfície da parcela de forma que os pneus comprimissem áreas paralelas entre si. O número de vezes que o trator trafegou, variou conforme o tratamento, sendo que o tráfego foi sobreposto ao anterior de forma que toda área de cada parcela fosse trafegada com número igual de vezes.

A resistência do solo à penetração foi determinada no dia 22 de novembro de 2007, com o uso do penetrógrafo de campo Soilcontrol, modelo SC 60, seguindo a norma da ASABE S313-2 (ASABE, 2006). A amostragem, utilizando dez leituras para representar uma repetição, foi feita à profundidade de 0,0 a 0,50 m. Os dados foram analisados em intervalos de 0,05 m. No local onde se realizou as amostragens de resistência do solo à penetração foram coletadas, com o uso do trado holandês, amostras de solo nas profundidades de 0,0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,50 m para determinar a umidade gravimétrica do solo (EMBRAPA, 1997).

A semeadura do milho (cv. BRS 3150) foi efetuada no dia 22 de novembro de 2007, utilizando-se uma semeadora-adubadora de plantio direto com quatro linhas. O mecanismo sulcador do solo da semeadora foi retirado para não eliminar os possíveis efeitos negativos da compactação, sendo utilizado somente o disco de corte do dosador de sementes. A densidade de semeadura foi de oito sementes por metro linear, com espaçamento entrelinhas de 0,90 m. Adubação consistiu de 0,4 Mg ha⁻¹ da fórmula 10–30–10, para obtenção da produtividade esperada de 6 a 8 Mg ha⁻¹. Decorridos 10 dias da emergência das plântulas, foi realizado o desbaste para cinco plantas por metro. A adubação de cobertura foi realizada 30 dias após a emergência das plântulas, utilizando-se 0,1 Mg ha⁻¹ de N na forma de sulfato de amônio, e 0,04 Mg ha⁻¹ de K₂O na forma de cloreto de potássio. Cada unidade experimental possuiu quatro linhas de milho de cinco metros de comprimento.

Para estudar a estrutura radicular nos diferentes estados de compactação, foi selecionada a camada de 0,0-0,05 m de profundidade, em função do pronunciado efeito dos tratamentos nesta camada, observado pelos valores de resistência do solo à penetração. As determinações da anatomia radicular foram realizadas quando as plantas de milho estavam no estágio fenológico R1 (Florescimento e Polinização). Em cada parcela foi aberta uma trincheira, onde foram coletadas amostras de raízes a partir de três plantas escolhidas aleatoriamente.

As raízes foram lavadas para separação da massa de solo e em seguida cortadas em fragmentos de 0,5 cm, fixados em formalina-acetato-álcool etílico 50% (F.A.A. 50%) e armazenadas em geladeira até o início do processo de desidratação (DAYKIN e HUSSEY, 1985). A desidratação foi realizada em série alcoólica, sendo incluídos em parafina e posteriormente em paraplast. Foram feitos cortes transversais de 12 µm de espessura, em micrótomo rotativo, submetendo-os à coloração com safranina orange G - fast green FCF (HAGQUIST, 1974). Depois de serem montadas as lâminas permanentes, foram obtidas as imagens usando um microscópio de ocular micrométrica, sendo realizadas as medidas da espessura do córtex e do cilindro vascular. A espessura do cilindro vascular foi obtida até o centro da medula. Foram feitas quatro medidas por planta, totalizando doze medidas por parcela. Assim foi estimada a razão entre o córtex e o cilindro vascular. Com essa razão, raízes em várias fases de desenvolvimento puderam ser comparadas.

Para as determinações da macroporosidade e densidade do solo foram coletadas amostras com estrutura preservada em cilindros metálicos com 5,57 cm de diâmetro e 4,1 cm de altura na mesma profundidade em que se realizou a análise de raízes. As amostras foram retiradas nas entrelinhas da cultura do milho. Em cada parcela foram coletadas três sub-amostras, sendo utilizado o valor médio como representativo.

Após o preparo das amostras, essas foram saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água até atingir cerca de 2/3 da altura do anel e realizado o procedimento para obtenção da macroporosidade pelo método da mesa de tensão, conforme descrito em Embrapa (1997). Posteriormente as amostras foram levadas à estufa a 105-110 °C por 48 horas, para determinar a densidade do solo pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997).

Os resultados foram submetidos à análise de variância, e quando significativa foi aplicado o teste de Duncan, a 5% de probabilidade, para a comparação

de médias. Também, foram realizadas as correlações lineares simples para as combinações duas a duas, dos atributos físicos do solo estudados com a razão entre o córtex e cilindro vascular das raízes de milho. Para isso foi utilizado o aplicativo computacional SAEG (RIBEIRO JÚNIOR, 2001).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O tráfego de trator alterou os atributos físicos do solo (Quadros 1 e 2), evidenciando que em sistema plantio direto, o tráfego de máquinas provoca aumento expressivo da compactação na camada superficial do solo. Resultados semelhantes foram obtidos por Secco et al. (2004); Collares et al. (2006) e Freddi et al. (2007).

QUADRO 1. Resistência do solo à penetração e umidade gravimétrica nos tratamentos e profundidades em Latossolo Vermelho Distroférrico de textura muito argilosa

Profundidades (m)	Tratamentos ⁽¹⁾					CV (%)
	PD	PDc1	PDc2	PDc4	PDc6	
..... Resistência do solo à penetração (MPa)						
0,0-0,05	1,06c	1,13c	1,26b	1,41a	1,43a	5,46
0,05-0,10	1,03b	1,05b	1,11b	1,27a	1,27a	6,60
0,10-0,15	1,02a	1,04a	1,10a	1,11a	1,11a	11,19
0,15-0,20	0,95a	0,97a	0,99a	0,99a	1,00a	17,68
0,20-0,25	0,85a	0,84a	0,85a	0,86a	0,86a	17,89
0,25-0,30	0,75a	0,75a	0,79a	0,81a	0,81a	19,15
0,30-0,35	0,68a	0,70a	0,73a	0,74a	0,74a	19,61
0,35-0,40	0,66a	0,66a	0,68a	0,69a	0,69a	21,85
0,40-0,45	0,65a	0,65a	0,66a	0,66a	0,68a	24,07
0,45-0,50	0,64a	0,66a	0,67a	0,67a	0,68a	21,04
..... Umidade gravimétrica no solo (kg kg ⁻¹) ⁽²⁾						
0,0-0,10	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	
0,10-0,20	0,32	0,31	0,30	0,31	0,32	
0,20-0,40	0,36	0,33	0,34	0,35	0,35	
0,40-0,50	0,36	0,34	0,35	0,36	0,35	

⁽¹⁾PD - plantio direto sem compactação adicional; PDc1, PDc2, PDc4 e PDc6 – correspondem a plantio direto com compactação adicional por tráfego de trator de 5 Mg em uma, duas, quatro e seis passadas, respectivamente. ⁽²⁾Umidade do solo no momento da coleta dos dados de resistência à penetração. Médias na linha seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

Com o aumento na profundidade do solo observa-se uma tendência de redução nos valores de resistência do solo à penetração (RP) e aumento no conteúdo de água no solo (Quadro 1). Os valores de RP nas profundidades 0,0-0,05 e 0,05-0,10 m aumentaram com o tráfego do trator. Sendo os maiores valores de RP observados e suas maiores variações entre os tratamentos na primeira camada avaliada. Resultados semelhantes foram obtidos por Streck et al. (2004), trabalhando com Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico trafegado por uma máquina de 10 Mg. Esses autores

verificaram que o tráfego aumentou a RP. Os valores de RP encontrados no experimento foram inferiores ao valor de 2 MPa, que tem sido considerado como limite crítico (Taylor et al., 1966), mas para Beutler et al. (2004) e Serafim (2007), este valor é questionável.

A densidade do solo (Ds) aumentou a partir da pressão aplicada no solo no tratamento que considerou o tráfego com duas passadas do trator (PDc2) em relação ao tratamento sem compactação adicional (PD), onde o tráfego em quatro (PDc4) e seis passadas (PDc6) não aumentaram a Ds comparando-os ao PDc2 (Quadro 2).

QUADRO 2. Valores médios de densidade do solo e macroporosidade nos tratamentos em Latossolo Vermelho Distroférico de textura muito argilosa na profundidade de 0,0-0,05 m

Tratamentos ⁽¹⁾	Densidade do solo	Macroporosidade
Mg m ⁻³m ³ m ⁻³
PD	1,12b	0,23a
PDc1	1,13b	0,23a
PDc2	1,21a	0,19b
PDc4	1,22a	0,17b
PDc6	1,23a	0,17b
CV%	3,61	9,18

⁽¹⁾PD – plantio direto sem compactação adicional; PDc1, PDc2, PDc4 e PDc6 – correspondem a plantio direto com compactação adicional por tráfego de trator de 5 Mg em uma, duas, quatro e seis passadas, respectivamente. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

Estes resultados estão de acordo com Streck et al. (2004) que utilizando quatro passadas de uma máquina de 10 Mg encontraram aumento na Ds comparado com o sistema de plantio direto sem compactação adicional. Freddi et al. (2007) em Latossolo Vermelho Distrófico de textura média também obtiveram aumento na Ds ocasionada pelo tráfego de tratores de 4 Mg. Observa-se que a Ds entre o PD e PDc1 não foi diferente, mostrando que o solo suportou as pressões aplicadas por uma passagem da máquina sem aumentar sua Ds. Considerando o valor de Ds de 1,2 Mg m⁻³ obtido por De Maria et al. (1999) em Latossolo Vermelho Distrófico argiloso como limitante ao desenvolvimento das plantas, observa-se que o PDc2, PDc4 e PDc6 podem restringir o desenvolvimento das plantas. Enquanto os demais tratamentos estariam com Ds abaixo da considerada crítica (Quadro 2). Ocorreu um incremento de aproximadamente 10% nos valores de Ds, comparando os tratamentos PD e PDc6.

No PD e PDc1 foram encontrados os maiores valores de macroporosidade do solo (Quadro 2). A aplicação de maiores pressões na superfície do solo pelas passadas de trator, acarretou na redução da macroporosidade, sendo os tratamentos PDc2, PDc4 e PDc6 os que apresentaram os menores valores. Comparando o tratamento PD com o PDc6, verifica-se uma redução na macroporosidade de 26%. Freddi et al. (2007) analisando a camada de 0,0-0,10 m de profundidade em Latossolo Vermelho Distrófico de textura média submetido a compactação induzida por um trator de 11 Mg, verificaram que a macroporosidade foi reduzida em 80% no tratamento com seis passadas do trator, comparado ao não trafegado.

Em todos os tratamentos os valores de macroporosidade foram superiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, que é dado como limite crítico ao desenvolvimento das plantas (PAGLIAI et al., 2003). Mas Feng et al. (2002) citam que esse valor para solos argilosos já causa inibição ao suprimento adequado de oxigênio às raízes, sendo necessários valores mais altos que $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de porosidade de aeração.

Com relação à estrutura anatômica das raízes de milho, observa-se que essas apresentam epiderme constituída por uma camada de células que circunda a raiz, e logo abaixo desta, nota-se a exoderme, formada por camadas compactas de células. Abaixo da exoderme em direção ao cilindro vascular, há a zona cortical ou córtex, constituído por células parenquimatosas, que com amadurecimento da raiz se degeneram, formando grandes espaços intercelulares, sendo denominados aerênquima (Figura 2A). O córtex é limitado internamente pela endoderme, que é formada por uma única camada de células com espessamento em “U” (Figura 2B). Ferrer et al. (2004) estudando o efeito da hipoxia, descreveram às características anatômicas de raízes de milho de forma semelhante às encontradas neste trabalho.

O cilindro vascular é revestido pelo periciclo, que possui uma camada de células contínua e lignificada. No interior deste se encontra os feixes de xilema e de floema, e nas raízes bem desenvolvidas, observa-se a medula na zona central da estrutura (Figura 2B) como relatado por Ferrer et al. (2004). No sistema vascular ficam evidentes as células do protoxilema e protofloema mais na extremidade do cilindro, e as células do metaxilema e metafloema na zona mais interna. Visualiza-se a formação de raiz lateral, desenvolvida a partir de células do periciclo (Figura 2C).

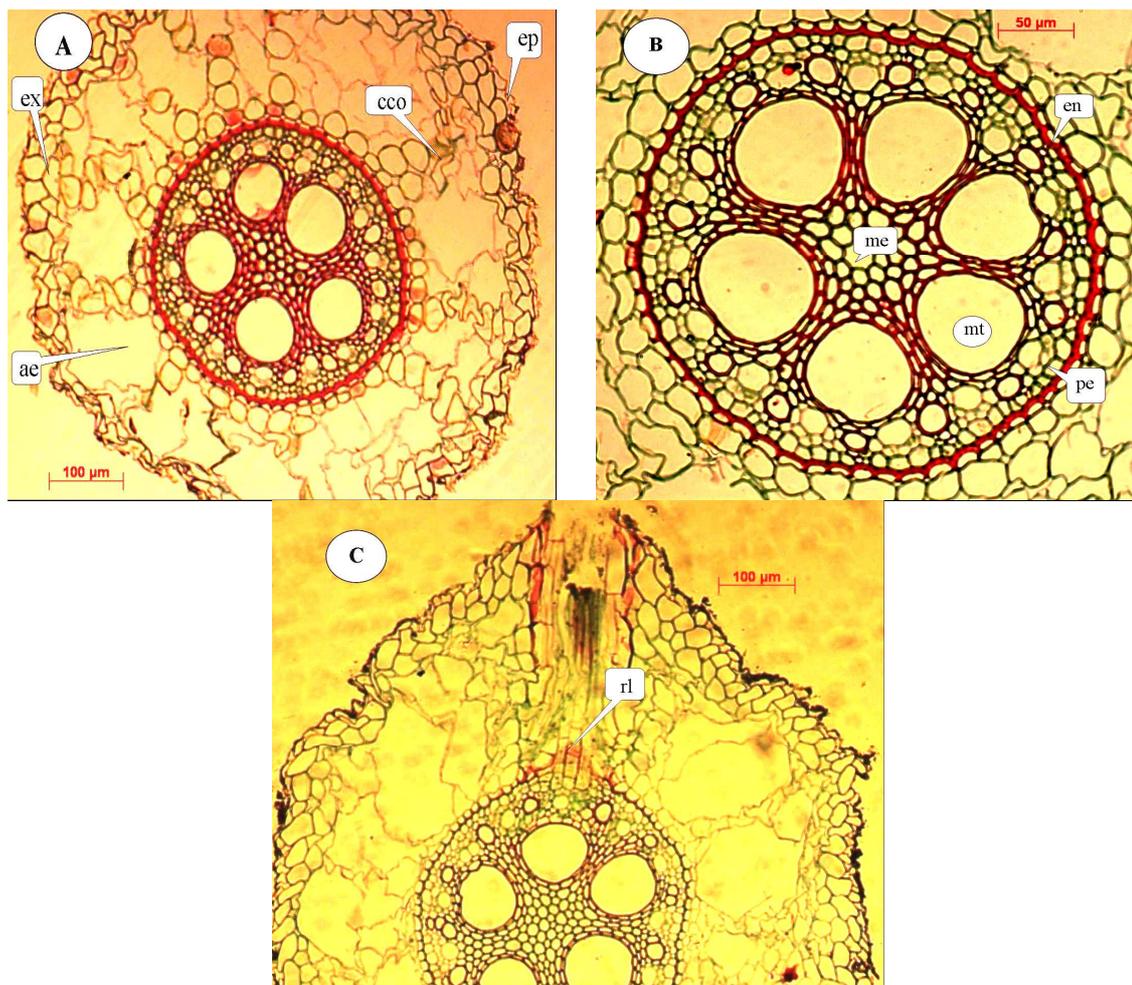


FIGURA 2. Cortes transversais de raízes de milho. A e B - raízes providas do tratamento PD; C - raiz do PDc1. ep = epiderme; ex = exoderme; ae = aerênquima; cco = células do córtex; en = endoderme; pe = periciclo; mt = metaxilema; me = medula e rl = raiz lateral.

As diferenças quanto à razão entre o córtex (CO) e cilindro vascular (CV) das raízes de milho foram significativas (Quadro 3). Na figura 3 são apresentadas às imagens da anatomia destas raízes em cada tratamento.

QUADRO 3. Médias da razão entre as medidas da espessura do córtex e do cilindro vascular (CO/CV) de raízes de milho nos tratamentos em Latossolo Vermelho Distroférico de textura muito argilosa

		Tratamentos ⁽¹⁾		
PD	PDc1	PDc2	PDc4	PDc6
0,96d	1,06c	1,58b	1,86a	1,86a
CV% 3,52				

⁽¹⁾PD – plantio direto sem compactação adicional; PDc1, PDc2, PDc4 e PDc6 – correspondem a plantio direto com compactação adicional por tráfego de trator de 5 Mg em uma, duas, quatro e seis passadas, respectivamente. Médias na linha seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

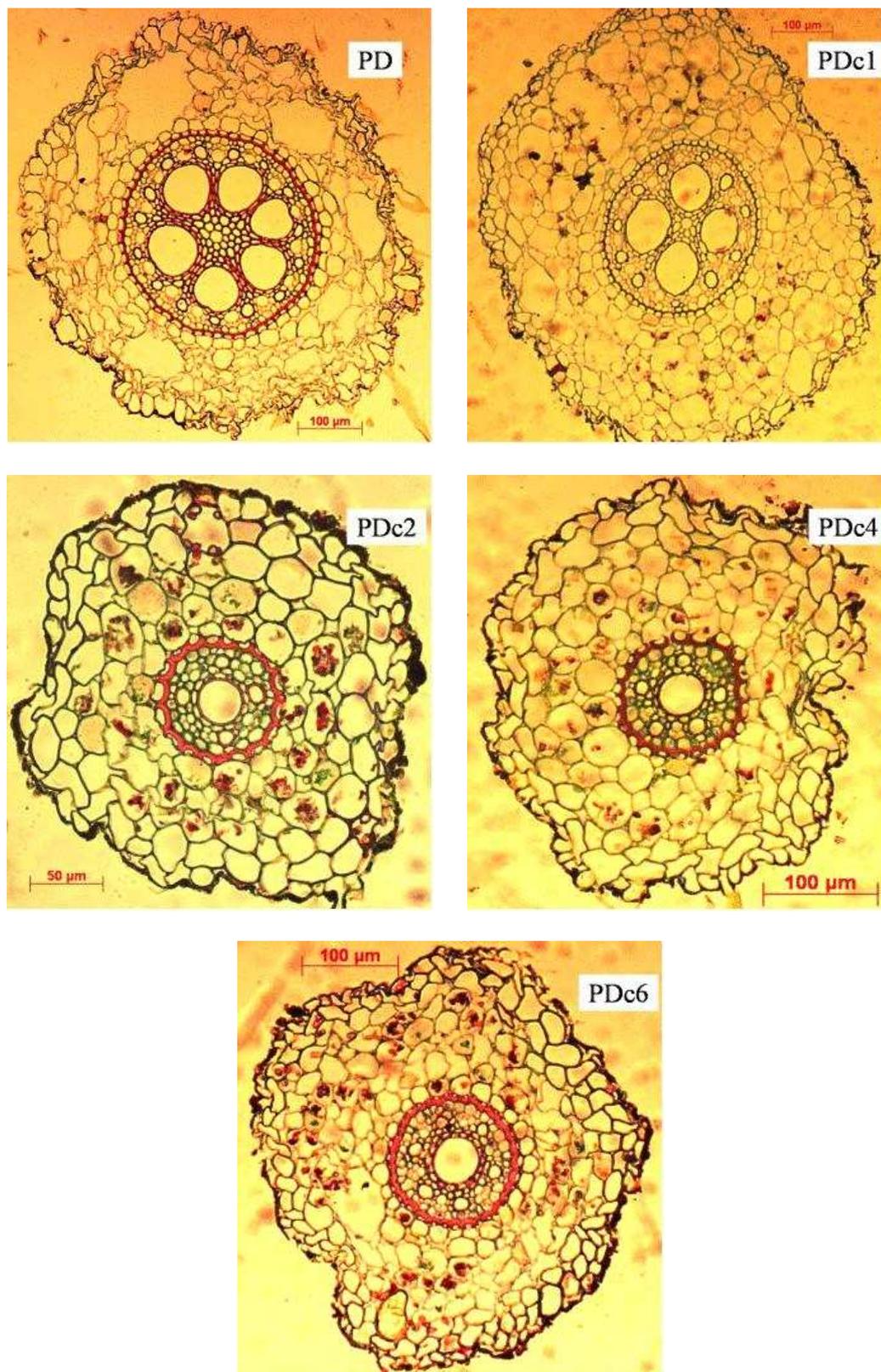


FIGURA 3. Cortes transversais de raízes de milho provindas dos tratamentos plantio direto sem compactação adicional (PD), plantio direto com compactação adicional por tráfego de trator de 5 Mg em uma (PDc1), duas (PDc2), quatro (PDc4) e seis passadas (PDc6).

Foi observado, aumento na razão CO/CV com o aumento nos estados de compactação do solo induzidos pelo tráfego de trator. Os tratamentos PDc4 e PDc6 não foram diferentes entre si, verificando os maiores valores desta relação. Enquanto o menor valor foi encontrado no PD, que diferiu dos demais tratamentos. Ferrer et al. (2004) também observaram diferenças no desenvolvimento de raízes de milho, submetido à aeração deficiente.

O aumento da razão CO/CV com aumento nos estados de compactação do solo tanto pode ter ocorrido por um aumento na espessura do córtex como por uma redução na espessura do cilindro vascular. Neste estudo não se pode afirmar qual destas estruturas da raiz foi alterada, pois estas raízes não foram obtidas na mesma posição em relação ao ápice da planta, diferindo assim, o estágio de desenvolvimento entre estas raízes. No entanto, alguns trabalhos têm mostrado que o córtex é uma das estruturas anatômica da raiz mais sensível as mudanças no ambiente, enquanto o cilindro vascular praticamente não sofre mudanças (FERRER et al., 2004; PEREIRA, 2008).

Com o córtex mais amplo há uma melhor absorção de água e nutrientes, que irá ajudar a planta a superar um possível estresse nutricional em solos compactados (LIPIEC et al., 2003). Ferrer et al. (2004) analisando as características anatômicas de raízes de milho em ambiente alagado, observaram que a espessura do córtex das raízes aumenta quando esta é cultivada em ambiente alagado, comparado com o cultivo que recebeu uma irrigação normal, enquanto a espessura do cilindro vascular não foi alterada. Isto mostra que as raízes obtidas no experimento, nos estados de compactação mais elevados, podem estar sofrendo algum tipo de restrição à aeração, fazendo com que estas viessem a apresentar um córtex mais espesso, podendo favorecer-lhes a aeração. Para Queiroz-Voltan et al. (1998), solos com densidade do solo mais alta, estimulam o aumento na espessura do córtex de raízes de cana-de-açúcar, melhorando a aeração.

A razão CO/CV correlacionou-se de modo significativo ($p < 0,01$) e negativo com a macroporosidade ($r = -0,83$) e, positivo com a densidade do solo ($r = 0,73$) (Figura 4) e resistência do solo à penetração ($r = 0,93$).

Analisando-se a figura 4, pode-se observar a importância da resistência do solo à penetração sobre o desenvolvimento do sistema radicular do milho comparado com os demais atributos físicos do solo estudados. Evidenciando que as raízes de milho aumentam a razão entre CO/CV com o aumento da resistência do solo à penetração. Já com o aumento da macroporosidade do solo ocorre redução da razão CO/CV.

Constatando que as raízes de milho crescem pelos espaços dos macroporos, e são influenciadas por este atributo físico do solo, corroborando com os resultados obtidos por Abreu et al. (2004) e Servadio et al. (2005).

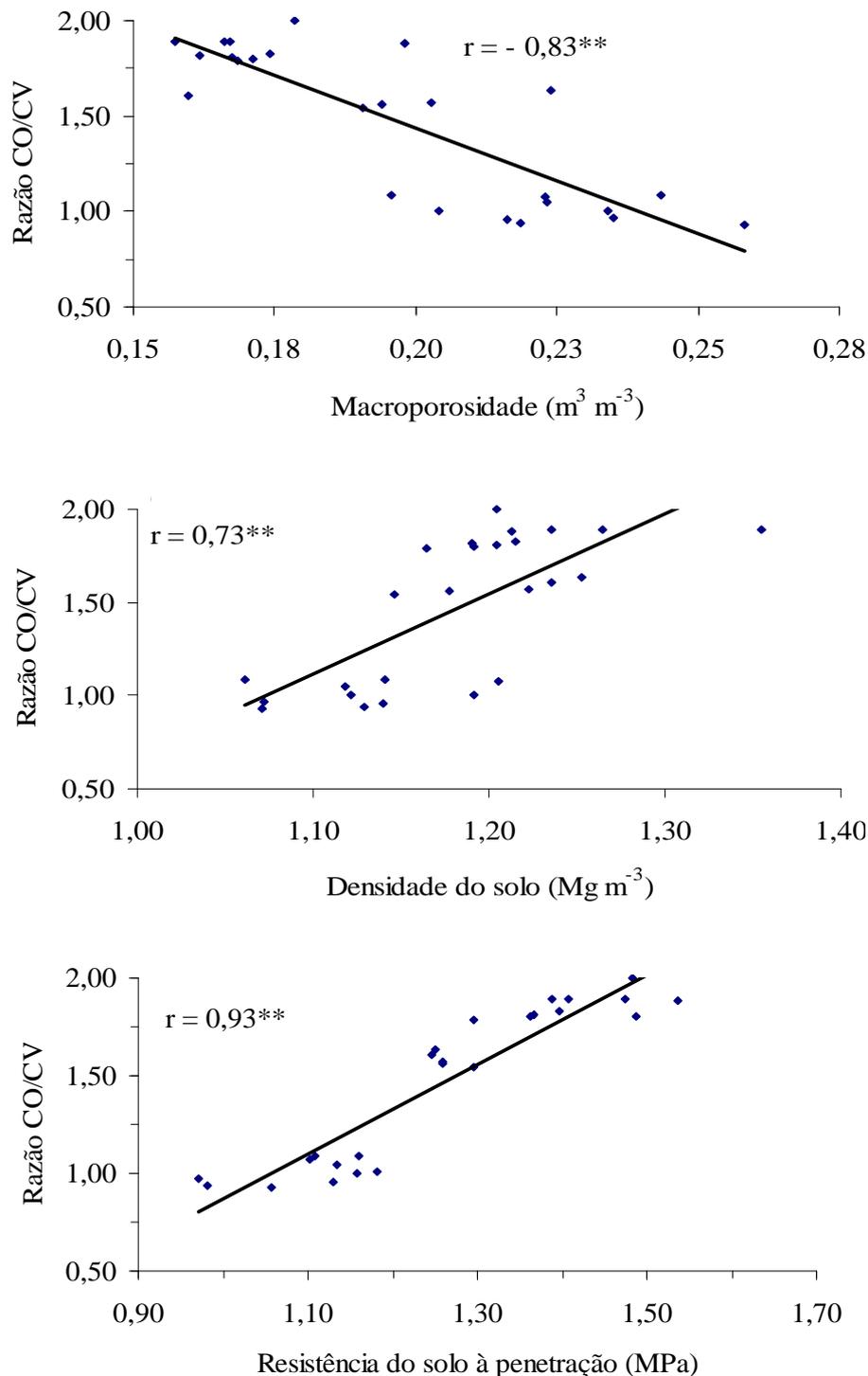


FIGURA 4. Razão entre o córtex e o cilindro vascular (CO/CV) de raízes de milho de acordo com a macroporosidade, densidade do solo e resistência do solo à penetração em Latossolo Vermelho Distroférico de textura muito argilosa. (n=25). **Significativo pelo teste t, a 1% de probabilidade.

O aumento da D_s causou aumento linear da razão CO/CV (Figura 4). Queiroz-Voltan et al. (1998) observaram que, a razão CO/CV de raízes de cana-de-açúcar desenvolvidas em diferentes densidades de compactação, tende a ser menor em áreas menos compactadas. Já analisando a razão entre o raio externo e o raio interno ao câmbio vascular de raízes de soja, Queiroz-Voltan et al. (2000) não verificaram efeito significativo do aumento da densidade do solo sobre a espessura da raiz.

CONCLUSÕES

1. As raízes de milho desenvolvidas em solos mais compactados apresentam a razão entre o córtex e o cilindro vascular mais elevada.

2. A compactação adicional afeta a estrutura anatômica das raízes de milho, e a razão entre o córtex e o cilindro vascular, possui correlação com a resistência do solo à penetração, macroporosidade e densidade do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ASABE – American Society of Agricultural and Biological Engineers. Soil cone penetrometer. In: **ASABE Standard S313.2**. St. Joseph, p.903-904, 2006.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.6, p.581-588, 2004.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P. Intervalo hídrico ótimo e a produção de soja e arroz em dois latossolos. **Irriga**, Botucatu, v.9, n.2, p.181-192, 2004a.

BEUTLET, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P. da; 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, 2004b.

CARDOSO, E.G.; ZOTARELLI, L.; PICCININ, J.L.; TORRES, E.; SARAIVA, O.F. & GUIMARÃES, M.F. Sistema radicular da soja em função da compactação do solo no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.3, p.493-501, 2006.

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.11, p.1663-1674, 2006.

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.3, p.933-942, 2008.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Avaliação da safra agrícola de grãos 2008/2009: quarto levantamento**. Brasília, 2009. 39p. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/4_levantamento_jan2009.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2009.

DANTAS, B.F.; ARAGÃO, C.A.; ALVES, J.D. Cálcio e o desenvolvimento de aerênquimas e atividade de celulase em plântulas de milho submetidas a hipoxia. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.58, n.2, p.251-257, 2001.

DAYKIN, M. E.; HUSSEY, R. S. Staining and histopathological techniques in nematology. In: **An advanced treatise on Meloidogyne**. BARKER, K. R.; CARTER, C. C.; SASSER, J. N. (Eds). Raleigh, North Carolina State University Graphics, 1985, p.39-48.

DE MARIA, I.C.; CASTRO, O.M.; SOUZA DIAS, H. Atributos físicos e desenvolvimento radicular de soja em Latossolo argiloso sob diferentes métodos de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.3, p.703-709, 1999.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: 1997. 212 p.

FENG, G.; WU, L. & LETEY, J. Evaluating aeration criteria by simultaneous measurement of oxygen diffusion rate and soil-water regime. **Soil Science**, v.167, n.8, p.495-503, 2002.

FERRER, J.L.R.; CASTRO, E.M. de; ALVES, J.D.; ALEANCAR, M.A.; SILVA, S. da; VIEIRA, C.V.; MAGALHÃES, P.C. Efeito do cálcio sobre as características anatômicas de raízes de milho (*Zea mays* L.) "Saracura" BRS-4154 submetido ao alagamento em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.3, n.2, p.172-181, 2004.

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

FOLONI, J.S.S.; LIMA, S.L. de; BULL, T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.1, p.49-57, 2006.

FREDDI, O. da S.; CENTURION, J.F.; BEUTLER, A.N.; ARATANI, R.G.; LEONEL, C.L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.4, p.627-636, 2007.

GONÇALVES, W.G.; JIMENEZ, R.L.; ARAÚJO FILHO, J.V. de; ASSIS, R.L. de; SILVA, G.P.; PIRES, F.R. Sistema radicular de plantas de cobertura sob compactação do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.1, p.67-75, 2006.

HAGQUIST, C. W. Preparation and care of microscope slides. **Am. Biol. Teacher**, v.36, p.414-417, 1974.

HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems – A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**, v.82, p.121-145, 2005.

JARAMILHO, G.; WHITE, J. W.; CRUZ, G. de la. The effect of soil compaction on differentiation of late metaxylem in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Annals of Botany**, London, v.70, p. 105-110, 1992.

LIPIEC, J.; MEDVEDEV, V.V.; BIRKAS, M.; DUMITRU, E.; LYNDINA, T.E.; ROUSSEVA, S.; FULAJTÁR, E. Effect of soil compaction on root growth and crop yield in Central and Eastern Europe. **International Agrophysics**, v.17, p.61-69, 2003.

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 medium power. **Soil & Tillage Research**, v.73, n.1-2, p.119–129, 2003.

PEREIRA, F.J. **Caracterização das modificações morfo-anatômicas e bioquímicas, em ciclos de seleção do milho saracura, para tolerância ao encharcamento do solo.** 2008. 91f. Dissertação (Mestrado em Agronomia-Fisiologia Vegetal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG.

QUEIROZ-VOLTAN, R.B.; PRADO, H. do; MORETTI, F.C. Aspectos estruturais de raízes de cana-de-açúcar sob efeito da compactação do solo. **Bragantia**, Campinas, v.57, n.1, p.49-55, 1998.

QUEIROZ-VOLTAN, R.B.; NOGUEIRA, S.S.S.; MIRANDA, M.A.C. de. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.5, p.929-938, 2000.

RIBEIRO JÚNIOR, J.I. **Análises estatísticas no SAEG.** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2001. 301 p.

ROSOLEM, C.A.; FERNANDEZ, E.M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C.A.C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.5, p.821-828, 1999.

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, n.5, p.797-804, 2004.

SERAFIM, M.E. **Desenvolvimento de um penetrógrafo de bancada visando a determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO) em diferentes sistemas de produção.** 2007. 79 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados-MS.

SERVADIO, P.; MARSILI, A.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S.; PAGLIAI, M. Effects on some soil qualities in central Italy following the passage of four wheel drive tractor fitted with single and dual tires. **Soil & Tillage Research**, v.84, p.87–100, 2005.

SILVA, A.P. da; IMHOFF, S.; KAY, B. Plant response to mechanical resistance and air-filled porosity of soils under conventional and no-tillage system. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.61, n.4, p.451-456, 2004.

SILVA, L.M.; ALQUINI, Y.; CAVALLET, V.J. Inter-relações entre a anatomia vegetal e a produção vegetal. **Acta Botanica Brasilica**, São Paulo, v.19, n.1, p.183-194, 2005.

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

STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.3, p.755-760, 2004.

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

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

CONCLUSÕES GERAIS

1. O aumento da compactação do solo promove aumento da densidade do solo, resistência do solo à penetração e; diminuição da macroporosidade e porosidade total, de maneira mais efetiva até 0,10 m de profundidade, afetando o crescimento e a estrutura anatômica das raízes, refletindo em redução do diâmetro do colmo, altura de plantas, massa de grãos e produtividade de milho.

2. A macroporosidade é um bom indicador da qualidade do solo para análises de comprimento e superfície radicular. Uma redução em seu volume ocasiona diminuição no comprimento do sistema radicular e diâmetro de raízes.

3. Os atributos físicos avaliados, principalmente a resistência do solo à penetração e a macroporosidade, revelam o estado de compactação do solo, dessa forma podem ser utilizados como indicadores primários da qualidade física do solo, e possuem correlação com a razão entre a espessura do córtex e do cilindro vascular das raízes de milho.