

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA
FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**COMPORTAMENTO DE VARIEDADES DE SOJA EM
CONDIÇÕES DE SOLO COMPACTADO E NÍVEIS DE
IRRIGAÇÃO**

Paula Regina de Oliveira
Engenheira Agrônoma

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL
2011

Oliveira, Paula Regina
O48c Comportamento de variedades de soja em condições de solo compactado e níveis de irrigação / Paula Regina de Oliveira. -- Jaboticabal, 2011
x, 81 f. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2011
Orientador: José Frederico Centurion
Co-orientadora: Maria Aparecida Pessôa da Cruz Centurion
Banca examinadora: José Renato Zanini, Alberto Carvalho Filho
Bibliografia

1. Latossolo. 2. Atributos Físicos. 3. Conteúdo de água.
4. Produtividade. I. Título. II. Jaboticabal - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.431.7:633.34

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA
FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**COMPORTAMENTO DE VARIEDADES DE SOJA EM CONDIÇÕES
DE SOLO COMPACTADO E NÍVEIS DE IRRIGAÇÃO**

Paula Regina de Oliveira

**Orientador: Prof. Dr. José Frederico Centurion
Co-orientadora: Profa. Dra. Maria Aparecida Pessôa da Cruz
Centurion**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo).

**JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL
Julho de 2011**

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

PAULA REGINA DE OLIVEIRA – Nascida a 13 de setembro de 1976, em Ipameri – GO. Concluiu o ensino básico na Escola Estadual Professor Eduardo Mancini, em 1990; o ensino médio na Escola Normal Prof. César Augusto Ceva e Técnico em Contabilidade em 1991. Em julho de 2001, ingressou no curso de Graduação em Agronomia pela Universidade Estadual de Goiás, Goiás – GO, e em fevereiro de 2006, obteve o título de Engenheira Agrônoma. Iniciou em agosto de 2009 o curso de Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo) pela Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal – SP. No dia 22 de julho de 2011, submeteu-se à banca para a defesa da dissertação e obteve o título de Mestre em Agronomia.

*“Se teus projetos são para um ano, semeia o grão.
Se são para dez anos, planta uma árvore.
Se são para cem anos, instrua o povo.
Semeando uma árvore, colherás dez vezes;
Instruindo o povo, colherás cem vezes;
Se deres um peixe a um homem, ele comerá uma vez;
Se o ensinares a pescar, ele comerá a vida inteira.”*

Kuan-Tzu

(sábio chinês, século VII a.C.)

Aos meus pais, Alcino e Zélia,
pelo exemplo e dedicação, aos meus irmãos
e sobrinhos por todo amor, apoio e incentivo

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que sempre me ilumina e me fortalece em toda trajetória da minha vida.

À Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (UNESP/FCAV), ao Departamento de Solos e Adubos e à Fazenda de Ensino e Pesquisa, pela oportunidade de realização do curso de Mestrado.

Ao Professor Dr. José Frederico Centurion, pela orientação, compreensão, amizade e pela oportunidade de aperfeiçoamento na minha formação profissional.

À minha co-orientadora Professora Dra. Maria Aparecida Pessoa da Cruz Centurion, pela amizade e apoio recebido.

Aos professores que constituíram a banca examinadora, pelas orientações e correções criteriosas deste trabalho.

À minha família, pelo apoio, incentivo, confiança e solidariedade, que tanto ajudaram a alcançar meu objetivo.

Aos meus cunhados, Aurino e Valessa, e ao querido amigo Vitor Barretto pela amizade e incentivo.

Aos meus sobrinhos Murilo, Amanda e Thiago por fazerem parte da minha vida.

Às queridas amigas Fabiana Pereira, Fabiana Gomes, Juliana, Sísara, Amanda e Karina, por todo carinho, apoio e companheirismo.

Aos amigos da pós-graduação Saulo, Marcela, Joana, Adriana, Manoel, Ana Paula, Eurico, Ronny, Thiago, Fábio Lucas, Valdeci e Thiago Batista, pelo apoio e amizade.

Aos amigos Helena, Laerte e Lucas pela contribuição do trabalho em equipe e funcionários da Produção Vegetal pelo apoio recebido.

A todos os professores da pós-graduação pelo conhecimento transmitido.

Aos funcionários do Departamento de Solos e Adubos, Célia Regina Muniz, Anderson Silva, Cristiano Barbalho, Orivaldo Gomes, Dejair Silva, Maria Inês Bueno,

Cláudia Cirilo, Luis Souza, Ademir Silva, Mauro Alves, pela amizade, paciência e presteza na realização dos trabalhos e no convívio diário.

À professora Dra. Durvalina Maria Mathias dos Santos pelo empréstimo do scanner para avaliação de raízes e à Sônia pelo carinho e amizade.

Aos funcionários da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Produção, pela prestatividade na realização dos trabalhos de campo e atenção recebida.

Aos funcionários da seção de Pós-Graduação pelo atendimento e auxílio e aos funcionários da Biblioteca pela presteza na utilização do acervo bibliográfico.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pelo suporte financeiro na concessão de bolsa e auxílio pesquisa.

E finalmente a todos professores, funcionários e colegas que conheci, pelo apoio, sugestões e amizade.

MUITO OBRIGADA!!!

SUMÁRIO

	<i>Página</i>
RESUMO	ix
SUMMARY	x
CAPÍTULO 1. Considerações Gerais	01
CAPÍTULO 2. Qualidade física de um LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico cultivado com soja submetido a níveis de compactação e de irrigação.....	11
CAPÍTULO 3. Qualidade física de um LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico submetido à compactação.....	38
CAPÍTULO 4. Relação entre a compactação do solo e o sistema radicular na produtividade da soja.....	52
REFERÊNCIAS	64

COMPORTAMENTO DE VARIEDADES DE SOJA EM CONDIÇÕES DE SOLO COMPACTADO E NÍVEIS DE IRRIGAÇÃO

RESUMO – O objetivo do vigente trabalho foi avaliar a qualidade física de um LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico, textura argilosa, cultivado com as variedades de soja (CAC-1 e FT-Cristalina), submetidos aos efeitos da compactação e da irrigação, utilizando os atributos físicos do solo e associá-los ao crescimento radicular e à produtividade da cultura da soja, em experimentos conduzidos em campo e em casa de vegetação (vasos). O experimento de campo constou de parcelas subdivididas, com quatro repetições cujos tratamentos principais foram constituídos por quatro níveis de compactação, proporcionados pelo tráfego controlado de tratores, três níveis de irrigação e duas camadas de solo (Capítulos 2 e 3). Foram coletadas amostras indeformadas do solo nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, para determinação dos atributos físicos. A produtividade máxima da soja foi obtida com a resistência do solo à penetração de 0,71 e 1,88 MPa para as variedades CAC-1 e FT-Cristalina, respectivamente. Foi obtido o valor de “S” de 0,036 e redução nos níveis mais compactados para 0,026. O experimento de casa de vegetação apresentou parcelas subdivididas com três repetições cujas variedades CAC-1 e FT-Cristalina diminuíram o comprimento de raízes à medida que aumentou a compactação e conseqüentemente reduziu a área explorada pelas raízes (Capítulo 4).

Palavras chave – Latossolo, atributos físicos, conteúdo de água, produtividade.

PERFORMANCE OF SOYBEAN VARIETIES IN CONDITIONS OF SOIL COMPACTION AND LEVELS OF IRRIGATION

SUMMARY – The aim of the current study was to evaluate the physical quality of an Eustrtox, clayey texture, cultivated with soybean varieties (CAC-1 and FT-Cristalina), submitted to the effects of soil compaction and irrigation, using the physical attributes of soil and associates them to root growth and yield of soybean culture, in experiments conducted in field and greenhouse (vases). The field experiment consisted of split plots, with four replications, where the main treatments was consisted of four levels of compaction, induced by controlled tractors traffic, three levels of irrigation and two layers of soil (Chapters 2 and 3). Undisturbed samples of soil were collected in the layers of 0-0,10 and 0,10-0,20 m, to determine the physical attributes. The maximum yield of soybeans was obtained with the soil resistance to penetration of 0,71 and 1,88 MPa for the varieties CAC-1 and FT-Cristalina, respectively. It was obtained the "S " value of 0,036 and a reduction in the levels more compressed to 0,026. The greenhouse experiment showed a split plot design with three replications whose varieties CAC-1 and FT-Cristalina decreased the root length as increased the compaction and consequently reduced the area explored by the roots (Chapter 4).

Keywords – Eustrtox, physical attributes, water content, yield.

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

Aos poucos o Brasil vem-se consolidando como o maior produtor mundial de soja. Se a demanda mundial de soja mantiver o ritmo de crescimento dos últimos 5 anos, acima de 5% ao ano, o Brasil deverá passar para o primeiro lugar entre os maiores exportadores do mundo (AGRIANUAL, 2011). Para a produção de soja no Brasil, com a expansão das fronteiras agrícolas, foram introduzidas tecnologias avançadas em insumos e máquinas agrícolas para o seu cultivo. Assim, quando o preparo do solo é executado intensivamente e em solo com condições inadequadas de umidade, seu principal efeito é refletido na perda da qualidade da estrutura do solo, levando à sua compactação. Dessa forma, a compreensão e a quantificação do impacto do uso e manejo do solo na sua qualidade física são fundamentais no desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis.

A compactação é decorrência do tráfego de máquinas sobre o solo, principalmente quando este se encontra muito úmido, ocasionando a redução da produtividade, com destaque para os solos mais argilosos. Os conhecimentos científicos demonstram que a compactação do solo é praticamente inevitável na agricultura uma vez que se torna necessário estabelecer valores limitantes de compactação para proteger o solo do tráfego excessivo, bem como evitar perdas de produtividade e proteger o meio ambiente.

Segundo STONE et al. (2002) a compactação provoca a redução de massa por unidade de volume, acarretando maior densidade do solo e resistência do solo à penetração, com decréscimo da porosidade total e da permeabilidade com maior ênfase na redução dos poros de maior diâmetro. Neste contexto, para quantificar a compactação do solo são utilizados vários atributos físicos, entre os quais, a densidade do solo, a porosidade, a infiltração de água, a agregação, a textura, e a resistência do solo à penetração, a qual tem sido mais frequentemente utilizada por ser sensível ao manejo e ter relações diretas com o crescimento radicular e com a produtividade das plantas (LETEY, 1985); este atributo físico mantém relações intrínsecas com o

conteúdo de água, densidade do solo e composição granulométrica. Assim, o conteúdo de água disponível adequado ao crescimento das plantas está situado entre o conteúdo de água retida na capacidade de campo (0,01 MPa) (REICHARDT, 1988).

Os solos apresentam comportamentos físicos distintos de acordo com o teor de matéria orgânica, a umidade e segundo descrito por FERREIRA et al. (1999) com a composição granulométrica e a mineralogia.

A degradação da estrutura do solo altera a sua densidade e a porosidade que pode comprometer o desenvolvimento das plantas. TORRES & SARAIVA (1999) verificaram valores de densidade de 1,00 e 1,45 Mg m⁻³ para solos argilosos e 1,25 e 1,70 Mg m⁻³ para solos arenosos, respectivamente, em áreas com mata e compactadas. A porosidade total e a macroporosidade foram reduzidas à medida que a compactação do solo aumentou sua resistência à penetração (STONE et al., 2002); o menor tamanho dos poros para o fluxo de água também reduziu a condutividade hidráulica do solo. Um atributo que consiste no estabelecimento de uma relação entre a densidade atual no campo com uma densidade referência, máxima, é denominada densidade do solo relativa, a qual visa estabelecer um valor limitante de compactação à produtividade das culturas e, que seja similar para todos os solos minerais (CARTER, 1990; HÅKANSSON, 1990).

A formação de macroagregados estáveis é responsável pela estrutura do solo, entre outras propriedades emergentes, cujos atributos estão relacionados à qualidade do solo (MIELNICZUK et al., 2003). SALTON et al. (2008) reportam que os principais fatores envolvidos na formação e estabilidade de agregados do solo, são a fração mineral, a fauna do solo, os microrganismos, as raízes, os agentes inorgânicos e as variáveis ambientais.

Um novo parâmetro para avaliação da qualidade física do solo e de cálculo fácil é o índice "S", o qual representa a distribuição do tamanho de poros de maior frequência e torna possível a comparação direta dos efeitos de diferentes práticas de manejo e de diferentes solos em sua qualidade física (DEXTER, 2004 a); segundo esse autor, o limite entre solos com boa qualidade estrutural ocorre no valor próximo de 0,035.

Compactação do solo

Com a modernização da agricultura estudos relatam a frequência de alterações significativas nos atributos físicos do solo em decorrência do seu não revolvimento e do excesso de pressão exercida pelo tráfego contínuo de máquinas pesadas e equipamentos agrícolas em solo com a umidade elevada (BEUTLER et al., 2007; FREDDI et al., 2007; COLLARES et al., 2008), com efeitos mais pronunciados nas camadas de 0,075 a 0,17 m em Sistema de Plantio Direto (SILVA et al., 2000). Essas alterações acarretam em aumento da compactação e segundo SECCO et al. (2004) principalmente em solos com elevados teores de argila. A causa da compactação não se restringe a pressão estática, mas também forças dinâmicas provocadas pela vibração do trator arrastando equipamentos agrícolas e pelo patinamento (HORN & LEBERT, 1994).

A compactação, resultante da compressão do solo, causa alteração estrutural do solo devido à reorganização das partículas e de seus agregados, o que aumenta a densidade e resistência do solo à penetração e reduz a macroporosidade inibindo assim o crescimento e o desenvolvimento radicular das plantas (COLLARES et al., 2006). Em consequência, ocorre redução da infiltração e da redistribuição de água no solo, redução das trocas gasosas, disponibilidade de oxigênio na rizosfera e limitação na absorção de água e nutrientes pelas plantas (HÅKANSSON & VOORHEES, 1998).

A distribuição e a morfologia das raízes são afetadas, quando a qualidade física do solo é prejudicada pelo preparo, principalmente devido às altas densidades do solo e à resistência à penetração e à baixa porosidade (KLEPKER & ANGHINONI, 1995).

Definindo a função do solo como ambiente para a produção agrícola, a avaliação da qualidade do solo pode ser por meio de atributos relacionados à sua capacidade de fornecer nutrientes às plantas, em dar suporte ao crescimento e desenvolvimento de raízes e em propiciar adequada estabilidade estrutural para resistir à erosão e reter água para as plantas (NIERO et al., 2010).

Resistência do solo à penetração (RP)

SILVA et al. (2000) relatam que para a qualidade física, a resistência do solo à penetração é considerada a propriedade mais adequada para expressar o grau de compactação do solo e, conseqüentemente, a facilidade de penetração das raízes. No entanto, apresenta a desvantagem da forte relação de dependência entre a resistência do solo à penetração e o seu conteúdo de água (BAILEY et al., 1986), visto que, com a diminuição do conteúdo de água, há um aumento na resistência do solo à penetração (FREDDI et al., 2006), o que faz com que haja dependência dos resultados em relação ao teor de água e densidade do solo dificultando sua interpretação (BUSSCHER et al., 1997). Nesse contexto, com a compactação e com a redução da umidade do solo geralmente ocorre o aumento da resistência, podendo atingir valores limitantes para o crescimento e o desenvolvimento das raízes e das plantas (BENGOUGH & MULLINS, 1990). O valor de 2,0 MPa tem sido utilizado como limite crítico de RP (TAYLOR et al., 1966), porém há a necessidade de mais estudos, pois esse valor vem sendo questionado por outros autores (BEUTLER et al., 2004).

Em um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico textura média, valores acima de 0,85 MPa já causam danos à produtividade da soja (BEUTLER & CENTURION, 2004). VARQUEZ et al. (1989) analisando sistemas de manejo e compactação do solo, verificaram que a resistência do solo à penetração de 1,57 a 1,59 MPa, esteve associada com a produtividade máxima de soja. Em LATOSSOLO VERMELHO argiloso a produtividade de soja foi adequada até a resistência do solo à penetração de 1,80 MPa, segundo SILVA et al. (2000). Em geral, valores de RP entre 1,0 e 3,5 MPa restringem o crescimento das raízes (BENGOUGH & MULLINS, 1990; BEUTLER et al., 2004). O crescimento de raízes pode ser inibido com valores de resistência do solo à penetração inferiores a 1,0 MPa em solos secos, mas num conteúdo de água maior pode haver crescimento em valores variando entre 4,0 e 5,0 MPa (DEXTER, 1991).

A resistência do solo à penetração caracteriza o impedimento que o solo oferece ao crescimento das raízes.

Densidade e porosidade do solo

O preparo do solo, uma das principais operações de seu manejo, cria condições favoráveis ao crescimento e desenvolvimento das culturas, além de erradicar plantas daninhas e manejar resíduos culturais, aumentando a porosidade total na camada preparada (SOUZA & ALVES, 2003), contudo, apresenta o efeito de perda da qualidade estrutural do solo. O arranjo estrutural do solo, a porosidade total e o número de tamanho dos poros são afetados pela compactação, que, por consequência, podem afetar o crescimento radicular.

A estrutura do solo pode ser avaliada pela sua densidade, pois é a relação entre a massa de uma amostra de um solo seco (105°C) por 24 horas e o seu volume na condição natural, ocupado pela massa de solo, assim, pode-se caracterizar um solo bem estruturado quanto menor for sua densidade. O aumento da densidade, ocasionando problemas de compactação é mais sério nos solos argilosos, porque esses normalmente são formados por partículas pequenas, que possuem superfície de contato elevada. No entanto, os solos arenosos tendem a manter maior macroporosidade e, dependendo da continuidade desses poros, serem menos restritivos ao desenvolvimento do sistema radicular (TORRES & SARAIVA, 1999). Segundo esses autores, cada solo apresenta uma amplitude de densidade global, em função de suas características mineralógicas, com valores máximos e mínimos diferentes, visto que em condições de campo, as amplitudes de variação da densidade global para solos argilosos, variam desde 1,00 Mg m⁻³, sob condições naturais e ricos em matéria orgânica, a até 1,45 Mg m⁻³, nos solos compactados e mal manejados.

A porosidade total diz respeito ao volume de espaços ocupados por gases e líquidos no solo. Pesquisas demonstraram que a compactação reduz o volume de poros do solo (KLEIN & LIBARDI, 2002; STONE et al., 2002) e que nesse processo os macroporos são os primeiros a desaparecerem (PRIMAVESI, 1987). Uma das propriedades mais importantes em relação ao desempenho dos sistemas de manejo sobre a produtividade das culturas é a quantidade de macroporos ou de porosidade de

aeração. Assim, valores de macroporos inferiores a $0,10 \text{ m m}^{-3}$ constituem limitação ao crescimento radicular (VOMOCIL & FLOCKER, 1961).

Densidade relativa (Dsr)

O grau de compactação ou estado de compactação do solo, quantificado pela densidade do solo relativa (Dsr), visa estabelecer um valor limitante de compactação à produtividade das culturas e que seja similar para todos os tipos de solos (BEUTLER et al., 2008), cuja Dsr é menos influenciada pelas características dos minerais presentes no solo. Esse atributo consiste na divisão da densidade do solo atual por amostragem no campo e pela densidade máxima do solo (Densidade referência) que o solo pode atingir, obtida pelo ensaio de Proctor (CARTER, 1990). Esse teste permite determinar a umidade adequada para obter a máxima compactação do solo na construção de estradas, desenvolvido pela engenharia civil (VARGAS, 1977). No ensaio Proctor, compactando o solo em várias umidades, para uma mesma energia, e relacionando os valores de densidade obtidos com a umidade de compactação, obtém-se a curva de compactação do solo, cuja umidade crítica de compactação e a densidade máxima correspondente são calculadas (BRAIDA et al., 2006).

Verifica-se que valores de Dsr acima de 86% são considerados elevados e prejudiciais ao desenvolvimento das culturas, e valores inferiores de compactação relativa (< 80%) podem afetar negativamente a produção de alguns cereais, devido à redução da capacidade de armazenamento de água, causada pelo aumento excessivo da quantidade de macroporos em relação à de microporos (LINDSTRON & VOORHEES, 1994). HÅKANSSON (1990) verificou que a Dsr ótima esteve associada ao valor de 87%, trabalhando com cevada em solos com diferentes texturas e conteúdos de matéria orgânica, em torno de 100 experimentos de campo. Em condições de solo arenoso de clima temperado, apresentou produtividade máxima de trigo e cevada quando a Dsr esteve associada a 81% (CARTER, 1990). No Brasil, clima tropical, TORRES & SARAIVA (1999), verificaram em LATOSSOLO ROXO (LATOSSOLO VERMELHO Férrico) cultivado dois anos com soja, que a partir da Dsr

de 84 e 87%, ocorreu decréscimo da produtividade. Já em LATOSSOLO VERMELHO de textura média, BEUTLER et al. (2005) constataram o valor de Dsr de 80% como limitante para a soja. Segundo esses mesmos autores, em casa de vegetação, com o mesmo tipo de solo, foram obtidos valores limitantes menores de Dsr, cujo decréscimo de produtividade de soja foram a partir da Dsr de 75% e, a partir de 84% para um LATOSSOLO VERMELHO de textura argilosa, cultivado com conteúdo de água equivalente a retida na capacidade de campo (tensão de 100 hPa).

Condutividade Hidráulica Saturada

Para garantir altas produtividades agrícolas, a condição primordial, é garantir a manutenção de um bom estado de agregação e estabilidade e, sobretudo de uma boa estrutura do solo (CORRÊA, 2002). Quando a condutividade hidráulica depende principalmente da estrutura do solo, a “estabilidade da estrutura” é essencial para maior condutividade, assim, solos argilosos podem depender completamente do desenvolvimento de estrutura para adquirirem a condutividade hidráulica (CHILDS, 1967).

Sendo o solo um meio heterogêneo, com ampla variabilidade espacial, apresentando características que sofrem alterações, e por ser um processo físico de extrema complexidade, FREIRE (1979) relatou que as variações na velocidade de infiltração estão relacionadas com os atributos densidade do solo, macroporosidade e microporosidade. Para CARVALHO (2002) a condutividade hidráulica do solo na condição saturada depende mais da estrutura do que da textura do solo, uma vez que, o efeito da estrutura, em especial dos poros grandes, torna possível que um solo argiloso possa exibir valores de condutividade similares aos solos arenosos.

SHARMA & UEHARA (1968) estudaram dois Latossolos do Havaí com composições semelhantes, porém com diferentes índices de agregação, e constataram que o Latossolo de maior estabilidade apresentou maior condutividade hidráulica, e que a maior velocidade de infiltração de água ocorreu entre as superfícies dos agregados

estruturalmente estáveis, reafirmando a importância da estabilidade dos agregados na condutividade hidráulica.

Agregação do solo

Uma das propriedades que podem ser utilizadas para avaliar a qualidade do solo é a agregação, uma vez que a manutenção de sua estrutura facilita a aeração e a infiltração de água e reduz a erodibilidade, visto que, a estabilidade de agregados foi reduzida quando o solo passou da vegetação de floresta para culturas, segundo NEVES et al. (2006). Os macroagregados estáveis são um dos principais atributos do solo responsáveis pela estrutura do solo, entre outras propriedades (MIELNICZUK et al., 2003).

A agregação pode ser definida como a união de partículas (argila-íon-matéria orgânica, areia e silte) na unidade estrutural do solo, onde sua estabilidade é caracterizada como a resistência a uma ação mecânica degradante, particularmente da água (CHAVES & CALEGARI, 2001). Os movimentos internos de água, ar e calor e o crescimento de raízes são controlados pela agregação do solo, sendo que a entrada de ar e a drenagem de água são favorecidas pelos resíduos orgânicos que diminuem a densidade do solo e criam poros de diâmetro grande, entretanto, a contribuição da matéria orgânica na agregação do solo é um processo dinâmico, visto que seu acréscimo contínuo é necessário para manter a estrutura necessária ao desenvolvimento das plantas (VASCONCELOS et al., 2010).

NIERO et al. (2010) reportam resultados do estado de agregação do solo, avaliado pela quantidade de agregados estáveis em água, por classes de tamanho e também pelos índices diâmetro médio ponderado (DMP) e geométrico (DMG), cujos resultados obtidos apresentaram maiores valores para DMP e para porcentagem de agregados maiores nos manejos com menor revolvimento do solo. Tais resultados indicam relação entre a intensidade de mobilização do solo e a estabilidade de agregado. Resultados semelhantes também foram encontrados por WENDLING et al.

(2005), em que verificaram que entre diferentes manejos, a mata nativa aumenta os índices de agregação em água, comparado aos valores posteriores ao cultivo do solo.

Curva de retenção de água e índice “S”

O índice “S” definido como a inclinação da curva de retenção de água no ponto de inflexão, apresenta importante contribuição para a avaliação da qualidade física do solo, além de ser facilmente medido, usando equipamentos e equações utilizados rotineiramente nos laboratórios de física do solo (DEXTER, 2004 b); para esse autor, valores de “S” > 0,035 indicam adequada distribuição de tamanho de poros e qualidade física do solo, independente do tipo de solo, em clima temperado, sendo favorável para o crescimento das raízes e igual ou inferior a 0,020 é limitante para um solo extremamente degradado, provavelmente devido à redução da porosidade estrutural e ao aumento da densidade do solo. As análises das curvas de retenção de água sugerem que a degradação física do solo conduz a mudança no formato das curvas, visto que, pequena inclinação indica solo desestruturado e, portanto, elevada inclinação, solo estruturado e que possui muitos poros (DEXTER, 2004 a), para esse autor a maior declividade “S” no ponto de inflexão é resultante, principalmente, da maior porosidade estrutural, que compreende as microfendas, fendas, bioporos e macroestruturas produzidos pelo preparo do solo.

Em um LATOSSOLO VERMELHO, TORMENA et al. (2008), avaliaram o índice “S” , na linha e na entrelinha da cultura do milho sob sistemas de plantio direto e preparo convencional, onde observaram maiores valores desse índice sob plantio direto e na linha de plantio; tais pesquisadores concluíram que o valor do parâmetro “S” diminuiu com o aumento da densidade do solo, indicando a redução da sua qualidade física, associada à sua compactação.

Irrigação

O maior usuário de água é o setor agrícola, que na média mundial consome cerca de 70,2% de toda água doce originada de rios, lagos e aquíferos, sendo 20,3% consumidos pela indústria e 9,5% de uso doméstico (CHRISTOFIDIS, 2008). Segundo esse autor 18% da área agricultável de todo o mundo é irrigada, a qual é responsável pela produção de 44% de todo o alimento consumido no mundo.

Na região noroeste do Estado de São Paulo, ocorrem oito meses de déficits hídricos e a maior evapotranspiração, o que leva os agricultores a adotarem sistemas de irrigação (HERNANDEZ et al., 2003). Assim, o uso indiscriminado dos recursos hídricos pela irrigação pode causar impactos ambientais, como a diminuição da vazão do curso d'água, o rebaixamento do lençol freático, salinização do solo e a disseminação de doenças de veiculação hídrica, interferindo na quantidade e qualidade desse recurso (TELLES & DOMINGUES, 2006).

Um aspecto importante na agricultura irrigada é o conhecimento da quantidade de água requerida pelas culturas, para que haja uma adequada programação de manejo e irrigação, contudo, devem ser fornecidas técnicas simples e precisas, ao agricultor, para possibilitarem a determinação do momento e da quantidade de água a ser aplicada (LOPES et al., 2004). Assim, o equipamento mais utilizado e recomendado, em condições de campo para a determinação do potencial mátrico, é o tensiômetro, que apresenta como ferramenta em sistemas de produção, alta tecnologia e determinação do momento exato de iniciar a irrigação, sem desperdício de água e energia (KLEIN, 2001).

Este estudo objetivou avaliar o efeito da compactação do solo e da irrigação em um LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico, textura argilosa, cultivado com duas variedades de soja.

CAPÍTULO 2 - QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO EUTROFÉRRICO CULTIVADO COM SOJA SUBMETIDO A NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO E DE IRRIGAÇÃO

RESUMO - Manter boa qualidade física do solo é importante para conservar o meio ambiente, além de maximizar a produtividade das culturas. Um solo compactado poderá interferir na densidade do solo, na porosidade do solo e na resistência do solo à penetração, influenciando no crescimento radicular. A presente pesquisa objetivou avaliar a qualidade física de um LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico, textura argilosa, com as variedades de soja (CAC-1 e FT-Cristalina), submetido a quatro níveis de compactação e três níveis de irrigação, utilizando os atributos físicos do solo, assim como as relações da densidade relativa e da resistência do solo à penetração com a produtividade da cultura. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com parcelas subdivididas, com quatro repetições. Os níveis de compactação foram: $C_0= 0$; $C_2= 2$; $C_4= 4$ e $C_6= 6$ passadas, no mesmo local, de um trator de 11 t. Foram coletadas amostras indeformadas de solo, nas entrelinhas da cultura da soja, para a determinação dos atributos físicos, nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m. A produtividade máxima da soja foi obtida com a densidade relativa de 0,77 e 0,90 e resistência do solo à penetração de 0,71 e 1,88 MPa para as variedades CAC-1 e FT-Cristalina, respectivamente.

Termos para indexação: produtividade, densidade relativa, resistência do solo à penetração.

INTRODUÇÃO

A cada ano a soja brasileira amplia sua participação no comércio internacional da oleaginosa. O Brasil deverá exportar mais de 30 milhões de toneladas, sendo mais de 21 milhões (68%) para a China, dado, superior ao ano agrícola 2009/10 cuja exportação foi de 65%, estimando-se que a cultura ocupe aproximadamente 24 milhões de hectares, cifra ligeiramente superior à da safra passada (AGRIANUAL, 2011).

Manter boa qualidade física do solo é imprescindível para o sucesso no cultivo das culturas, a fim de maximizar a produtividade e manter a sustentabilidade. No entanto, o solo, por ser o suporte da produção agrícola, sofre alterações significativas em seus atributos físicos como consequência pelo tráfego excessivo realizado indiscriminadamente sob variadas condições de umidade do solo, ocasionando a compactação.

A compactação é um processo decorrente da prática agrícola, ocasionando degradação dos solos, e se expressa por alteração estrutural que causa reorganização das partículas e de seus agregados, promovendo concomitante aumento da densidade do solo e redução de sua porosidade total e de sua macroporosidade (STONE et al., 2002) que podem alterar a disponibilidade de nutrientes e água às raízes das plantas, bem como reduzir a penetração de raízes. Em consequência, ocorre alteração no funcionamento bioquímico da planta, restringindo, entre outros fatores, o crescimento da parte aérea (TURNER, 1997), a produção da cultura, além do aumento da erosão e da energia necessária para o preparo do solo. Assim, o solo ideal para a produção agrícola deve apresentar porosidade total próxima a $0,50 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ e 34% para macroporos e 66% para microporos (KIEHL, 1979).

Vários atributos físicos do solo são utilizados para avaliar seu grau de compactação, entre os quais, a densidade, a porosidade do solo e a resistência do solo à penetração. A densidade (D_s) tem sido um atributo muito utilizado, por ser uma medida quantitativa com razoável sensibilidade e de fácil determinação (CAMARGO & ALLEONI, 1997). Entretanto, de acordo com SILVA et al. (2006), a densidade do solo compactado, capaz de inibir o crescimento das plantas, varia conforme a classe de

solo, espécie plantada, bem como das condições de umidade do solo. Assim, para um mesmo valor de D_s , um solo argiloso pode estar muito compactado, enquanto para outro tipo de solo com textura grossa, esse valor pode indicar solo solto (BEUTLER et al., 2008). Segundo esses autores, estabeleceu-se o grau ou estado de compactação do solo, quantificado pela densidade do solo relativa (D_{sr}), visando a estabelecer um valor limitante de compactação à produtividade das culturas e que seja similar para todos os solos minerais.

De acordo com SILVA et al. (1997), o que auxilia na caracterização da compactação e na resposta das culturas em diferentes tipos de solo é a relação entre sua densidade atual e alguma densidade de referência ou de compactação máxima. Uma alternativa para determinar este processo é através do teste de Proctor, que consiste na divisão da densidade do solo atual pela sua densidade máxima (CARTER, 1990). Assim, a utilização da D_{sr} é uma forma de evitar as diferenças entre solos, permitindo compará-los quantitativamente, sendo este um teste de fácil execução e baixo custo.

Segundo BEUTLER et al. (2008), na obtenção da D_s referência, utilizando o teste de Proctor, verifica-se que valores de D_{sr} acima de 0,86 são considerados elevados e prejudiciais ao desenvolvimento das culturas. Entretanto, valores inferiores a 0,80 podem afetar negativamente a produtividade de alguns cereais em consequência da grande quantidade de macroporos em relação à de microporos, os quais reduzem a capacidade de armazenamento de água (LINDSTRON & VOORHEES, 1994). No Brasil, um estudo utilizando o LATOSSOLO ROXO (LATOSSOLO VERMELHO Férrico), cultivado por dois anos com soja, TORRES & SARAIVA (1999) verificaram a ocorrência do decréscimo da produtividade a partir da D_{sr} de 0,84 e 0,87, com distribuição irregular da precipitação pluvial, com menores prejuízos em anos chuvosos. Já em LATOSSOLO VERMELHO de textura média, BEUTLER et al. (2005) encontraram o valor de D_{sr} de 0,80 como limitante para a soja. Em geral, na D_{sr} de 0,86, são obtidas maiores produtividades, oscilando com as condições climáticas e as culturas, apresentando resultados similares para os diferentes solos (ARVIDSSON & HÅKANSSON, 1991).

A resistência do solo à penetração (RP) tem sido mais frequentemente utilizada para avaliar a compactação do solo, por apresentar melhores correlações e ter relações diretas com o crescimento radicular e com a produtividade das plantas (LETEY, 1985). Para KOOISTRA et al. (1992), um solo com pequenas compactações apresenta benefícios por aumentar a área de contato solo/raiz, proporcionando adequado suprimento de água e nutrientes à parte aérea e por sua vez, solos muito porosos são prejudiciais, devido ao menor contato solo/raiz.

VARQUEZ et al. (1989), analisando sistemas de manejo e compactação do solo, verificaram que a resistência do solo à penetração, de 1,57 a 1,59 MPa (camada de 0,05-0,35 m), esteve associada com a produtividade máxima de soja, visto que a mesma decresce com o aumento da resistência do solo à penetração. Em LATOSSOLO VERMELHO argiloso, a produtividade de soja foi adequada até a resistência do solo à penetração de 1,80 MPa, segundo SILVA et al. (2000). Conforme DEXTER (1987), a compactação em solo seco é mais prejudicial, visto que, pode haver crescimento radicular em condições de maior umidade do solo, com valores de resistência à penetração superiores a 4,0 MPa. Entretanto, para obter alta produtividade de soja, o valor crítico de resistência do solo à penetração varia com a variedade e a classe de solo.

Segundo ALBUQUERQUE et al. (1999) o impacto constante da água de irrigação sobre o solo provoca dispersão das partículas e, devido a evaporação, forma-se na superfície uma camada endurecida, denominado encrostamento. Essas crostas dificultam ou impedem a emergência das plântulas e a infiltração da água (HILLEL, 1980).

Assim, neste contexto, a presente pesquisa objetivou avaliar a qualidade física de um LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico, para duas variedades de soja, submetido a quatro níveis de compactação e três níveis de irrigação, utilizando atributos do solo tradicionais, como a densidade do solo, a porosidade, a resistência do solo à penetração e à densidade relativa, assim como relações da Dsr e RP com a produtividade da cultura.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido na área experimental da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Produção da Universidade Estadual Paulista (UNESP/FCAV), Jaboticabal (SP), com coordenadas geográficas de 21°15'29" de latitude sul e 48°16'47" de longitude oeste de Greenwich, com altitude média de 600 m. O clima da região, de acordo com a classificação climática de Köppen, é do tipo Cwa, com verão quente e inverno seco, precipitação média anual de 1.428 mm e temperatura média de 21 °C (CENTURION, 1998). O solo foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico típico, textura argilosa, A moderado, caulínítico-oxídico (LVef) (ANDRIOLI & CENTURION, 1999).

A composição granulométrica do solo foi determinada, na camada de 0-0,20 m, por meio da dispersão com NaOH (0,1 mol L⁻¹) e agitação lenta, durante 16 horas, sendo o conteúdo de argila obtido pelo método da pipeta (GEE & BAUDER, 1986). Os resultados destas análises estão apresentados nas Tabelas 1.1 e 1.2.

Tabela 1.1. Análise química da amostra de terra da área experimental.

pH em CaCl ₂	M.O. g/dm ³	P resina mg/dm ³	K	Ca	Mg	H+Al	SB	T	V%
5,3	23	56	4,6	38	16	28	58,6	86,6	68

Tabela 1.2. Análise física da amostra de terra da área experimental.

-----g kg ⁻¹ -----			
Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa
550	240	110	100

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com parcelas subdivididas, sendo cada unidade experimental constituída de quatro linhas de 4,0 m, espaçadas em 0,5 m, considerando-se como área útil as duas linhas centrais, desprezando-se 0,5 m

de cada extremidade, com quatro níveis de compactação (C_0 = solo não trafegado e C_2 , C_4 e C_6 corresponderam a 2, 4 e 6 passadas de um trator de 11 Mg, respectivamente); três níveis de irrigação, cujas tensões utilizadas na determinação dos conteúdos de água foram: 0,001 MPa, 0,01 MPa e 0,05 MPa e duas variedades (CAC-1 e FT-Cristalina), com quatro repetições, perfazendo um total de 96 parcelas.

Antes da instalação do experimento, toda a área foi escarificada cerca de 0,30 m de profundidade, seguida de aplicação de trifluralina e de uma gradagem niveladora. Logo após, a área foi irrigada por aspersão até próximo à capacidade de campo (0,01 MPa), efetuando-se no dia seguinte a compactação. O trator (MF 620) trafegou por toda a parcela, na direção do declive da área, de forma que os quatro pneus de mesma largura (0,40 m) e pressão interna comprimissem áreas paralelas entre si.

A instalação desse ensaio ocorreu tardiamente, no mês de dezembro, devido às precipitações de 101,9 mm e 163,3 mm ocorridas nos meses de outubro e novembro de 2009, respectivamente, dificultando assim o uso de máquinas agrícolas para o preparo da área e, conseqüentemente, da sementeira.

No dia 15 de dezembro de 2009, foram semeadas as variedades de soja (CAC-1 e FT-Cristalina), utilizando-se de uma semeadora-adubadora regulada para sulcar a área perpendicularmente à compactação, com espaçamento entrelinhas de 0,45 m, e para distribuir 170 kg ha^{-1} de adubo formulado 2-20-20, para a obtenção da produtividade esperada de soja de 3,0 a $3,5 \text{ Mg ha}^{-1}$, de acordo com a recomendação de RAIJ et al. (1996). Após a sementeira, a área foi irrigada para garantir a emergência das plântulas. Foram instalados tensiômetros na área experimental e, através de leituras diárias, procedeu-se à irrigação por sistema de aspersão. Cerca de 30 dias após a emergência, realizou-se o desbaste de plantas para ajuste da população para 18 a 20 plantas/metro.

Trinta dias após a sementeira da soja, foram coletadas 64 amostras indeformadas de solo, na entrelinha, com cilindros de $53,16 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ (0,03 m de altura e 0,048 m de diâmetro), para a determinação dos atributos físicos: resistência do solo à penetração, densidade do solo e porosidade total, com 8 repetições nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m. Ainda nessas amostras, foram avaliadas a microporosidade do

solo, por secagem (tensão de 0,006 MPa), em câmaras de pressão de Richards, com placa porosa (KLUTE, 1986); a porosidade total, segundo DANIELSON & SUTHERLAND (1986), e a macroporosidade, obtida pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

As amostras foram saturadas, por ascensão capilar em uma bandeja, durante 24 h e, em seguida, submetidas às tensões de 0,001; 0,003; 0,006; 0,01; 0,033; 0,06; 0,1 e 0,3 MPa em câmaras de Richards com placa porosa (KLUTE, 1986). Ao atingir o equilíbrio, na tensão de 0,01 MPa, as amostras foram pesadas e submetidas à determinação da resistência do solo à penetração, com duas subdeterminações por amostra. A RP foi determinada com o penetrômetro eletrônico estático de laboratório, com velocidade constante de penetração de $0,01 \text{ m min}^{-1}$, registro de uma leitura por segundo, cone com semiângulo de 30° e área de $3,14 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, equipado com atuador linear e célula de carga de 20 kgf acoplada a um microcomputador para a aquisição dos dados, conforme descrito por TORMENA et al. (1998). Foram utilizadas 64 leituras, correspondentes ao centro geométrico de cada amostra, na profundidade de 1,0 a 2,0 cm, obtendo-se cada leitura, as quais foram utilizadas para a obtenção da resistência média à penetração em cada amostra e calculado o valor das 128 leituras (duas subdeterminações por amostra) para representar a RP da amostra. Os resultados foram transformados em MPa à partir da equação: média das leituras/0,046*0,098. Na sequência, as amostras foram secas em estufa a $\pm 105 \text{ }^\circ\text{C}$, durante 24 horas, visando à determinação da densidade do solo (BLAKE & HARTGE, 1986).

A densidade máxima do solo foi determinada em amostras deformadas, coletadas na camada de 0-0,10 m, e passadas em peneira de 4,0 mm. Para tal, utilizou-se o teste Proctor normal com reuso de material (NOGUEIRA, 1998). A determinação da densidade máxima consistiu-se na adição de água à amostra, homogeneização, adição de solo até 1/3 do cilindro de 1.000 cm^3 , que foi submetido a 25 golpes de um soquete de 2,5 kg, caindo da altura de 0,305 m, equivalente a uma pressão de 200 kPa. Em seguida, adicionou-se mais uma camada, até atingir 2/3, e depois outra, até atingir a superfície do cilindro, procedendo da mesma forma para compactação. Nos pontos seguintes, adicionou-se mais água, visando à redução da densidade do solo, sendo

obtida a D_s máxima. A densidade relativa do solo (D_{sr}) foi obtida pela divisão da densidade do solo pela densidade máxima do solo obtida no teste de Proctor.

Uma área de mata nativa (MN) adjacente foi empregada como referência visando determinar a densidade máxima pelo teste de proctor, por se tratar de um sistema em equilíbrio, sem ação antrópica.

Após o estágio de maturidade fisiológica dos grãos, em 10 plantas por parcela, foram avaliadas a altura das plantas, a altura de inserção da primeira vagem, o peso de 100 grãos e a produtividade, considerando a umidade padrão de 13% (EMBRAPA, 2007).

Os resultados obtidos do experimento foram submetidos à análise de variância, pelo teste F, e as médias, quando significativas, foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 verificou-se que a macroporosidade (0-0,10 m) foi maior no tratamento C_0 (sem compactação) em relação aos tratamentos onde o solo foi compactado. Contrariamente ao constatado para a macroporosidade, verificou-se menor valor para a microporosidade (0-0,10 m) no tratamento C_0 , cuja movimentação de máquinas e o cultivo do solo provavelmente foram responsáveis por reduzir o volume de macroporos e aumentar o de microporos nos tratamentos com compactação, confirmando os resultados de NIERO et al. (2010) em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico típico. A microporosidade na camada entre 0,10-0,20 m tendeu a reduzir com o aumento do número de passadas do trator.

No tratamento C_6 , constatou-se que, a camada de 0-0,10 m, apresentou o menor valor de macroporosidade, porém com menor redução em comparação aos resultados de FREDDI et al. (2007), os quais trabalhando com um LATOSSOLO VERMELHO textura média, verificaram redução de 80% no tratamento com seis passadas em relação ao solo não trafegado, contudo a menor redução na macroporosidade do

estudo vigente, provavelmente está associada a uma melhor estruturação do solo proporcionada pela textura mais argilosa. Na camada entre 0,10-0,20 m os tratamentos $C_0 = C_2 = C_4$, portanto, com seis passadas ocorreu aumento da macroporosidade e não diferiu da área C_0 , sugerindo que a escarificação seguida de gradagem tenha favorecido a formação de impedimentos físicos logo abaixo das camadas de solo movimentadas pelos implementos, como verificado por TAVARES FILHO et al. (2001).

PAGLIAI et al. (2003) consideram o valor de macroporosidade de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ como sendo crítico para o crescimento das plantas; no entanto, pelos resultados obtidos, apenas o solo sem compactação da macroporosidade não tem restrição ao crescimento das plantas, visto que os demais tratamentos para as duas camadas analisadas, indicam prováveis limitações ao arejamento do solo em épocas mais úmidas, como relatado por COLLARES et al. (2008). Para solos argilosos, o valor de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de porosidade de aeração, já causa inibição ao suprimento adequado de O_2 às raízes (FENG et al., 2002).

Para a área sem tráfego do trator a macroporosidade reduziu com a profundidade, provavelmente devido à maior mobilização na camada superior e ao efeito da compressão dos discos da grade na camada entre 0,10-0,20 m. Com o aumento do número de passadas do trator sobre o solo preparado, ocorreu à redução da macroporosidade na camada superior e o inverso, ocorreu para a microporosidade.

Tabela 2. Atributos físicos do LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico nos quatro níveis de compactação.

Níveis de Compactação				
Camadas (m)	C ₀ ⁽²⁾	C ₂	C ₄	C ₆
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)				
0-0,10	0,142 Aa ⁽¹⁾	0,077 Ba	0,059 Cb	0,015 Db
0,10-0,20	0,079 ABb	0,066 Ba	0,076 Ba	0,092 Aa
<i>CV (%) Parcela</i>	8,59	<i>CV (%) Subparcela</i>	15,89	
Microporosidade (m ³ m ⁻³)				
0-0,10	0,391 Bb	0,419 Aa	0,422 Aa	0,424 Aa
0,10-0,20	0,422 Aa	0,413 ABa	0,402 Cb	0,408 BCb
<i>CV (%) Parcela</i>	1,78	<i>CV (%) Subparcela</i>	1,60	
Densidade do solo (Mg m ⁻³)				
0-0,10	1,199 Bb	1,338 Aa	1,358 Aa	1,357Aa
0,10-0,20	1,318 Ba	1,367 Aa	1,368 Aa	1,329 Ba
<i>CV (%) Parcela</i>	1,37	<i>CV (%) Subparcela</i>	2,00	
Resistência do solo à penetração (MPa)				
0-0,10	0,707 Bb	1,489 Aa	1,884 Aa	1,569 Aa
0,10-0,20	1,243 Ba	1,606 ABa	1,862 Aa	1,659 ABa
<i>CV (%) Parcela</i>	24,12	<i>CV (%) Subparcela</i>	13,98	

⁽¹⁾Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na linha, e minúscula, na coluna, não diferem pelo teste de Tukey (p < 0,05).

⁽²⁾C₀ = solo não trafegado; C₂ = duas passadas; C₄ = quatro passadas e C₆ = seis passadas de trator de 11 Mg.

Os valores de densidade do solo apresentados na Tabela 2 estão abaixo do preconizado por CAMARGO & ALLEONI (1997) que verificaram que o valor da densidade 1,55 Mg m⁻³ é considerado crítico para solos franco-argilosos a argilosos. Observa-se aumento dos valores de densidade do solo (camada de 0-0,10 m), bem como diferença estatística dos níveis compactados em relação ao solo não trafegado, conforme já observado por BERGAMIN et al. (2010) que trabalhando com LATOSSOLO VERMELHO Distroférico obtiveram aumento da densidade a partir do tratamento com duas passadas de trator. A pressão feita pelos pneus do trator, provavelmente, não atingiu a subsuperfície (0,10-0,20 m), assim, o tráfego de trator em até seis passadas não alterou as estruturas do solo, uma vez que o solo nestas condições proporciona

maior capacidade de carga. Resultados semelhantes também foram constatados por BERGAMIN et al. (2010).

A RP, na camada de 0-0,10 m, aumentou com o tráfego do trator, e os tratamentos C₂, C₄ e C₆ apresentaram os maiores valores, não diferindo entre si (Tabela 2). Por sua vez, BERGAMIN et al. (2010), trabalhando em LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico, muito argiloso, constataram aumento da RP nessa mesma profundidade a partir de quatro passadas do trator, diferindo dos tratamentos com duas e sem tráfego.

Os valores de RP encontrados na presente pesquisa estão abaixo do preconizado como crítico, de 2,0 MPa (TAYLOR et al., 1966).

BEUTLER (2003) observou, quando a RP passou de 0,85 a 2,00 MPa, que a produtividade da soja cultivar Embrapa 48 decresceu acentuadamente a partir desse valor. Já para DEXTER (1987), os valores de resistência do solo à penetração, inferiores a 1,0 MPa em solos secos, podem inibir o crescimento das raízes; porém, com a umidade suficiente, com resistência do solo à penetração variando entre 4,0 e 5,0 MPa, pode haver crescimento.

Segundo BARBER (1994), a produtividade de soja decresceu a partir da resistência do solo à penetração de 2,0 a 3,0 MPa, apresentando menores valores para anos com maior precipitação pluvial, em consequência de deficiência de aeração no solo compactado, além de menor drenagem interna. Conforme descrito, a cultura da soja é sensível à compactação do solo pelo tráfego de máquinas.

No que se refere à compactação máxima do solo, verificou-se que a densidade máxima do solo ($D_{s_{máx}}$) foi semelhante entre os tratamentos (Figura 1), confirmando os resultados obtidos por CAMARA & KLEIN (2005).

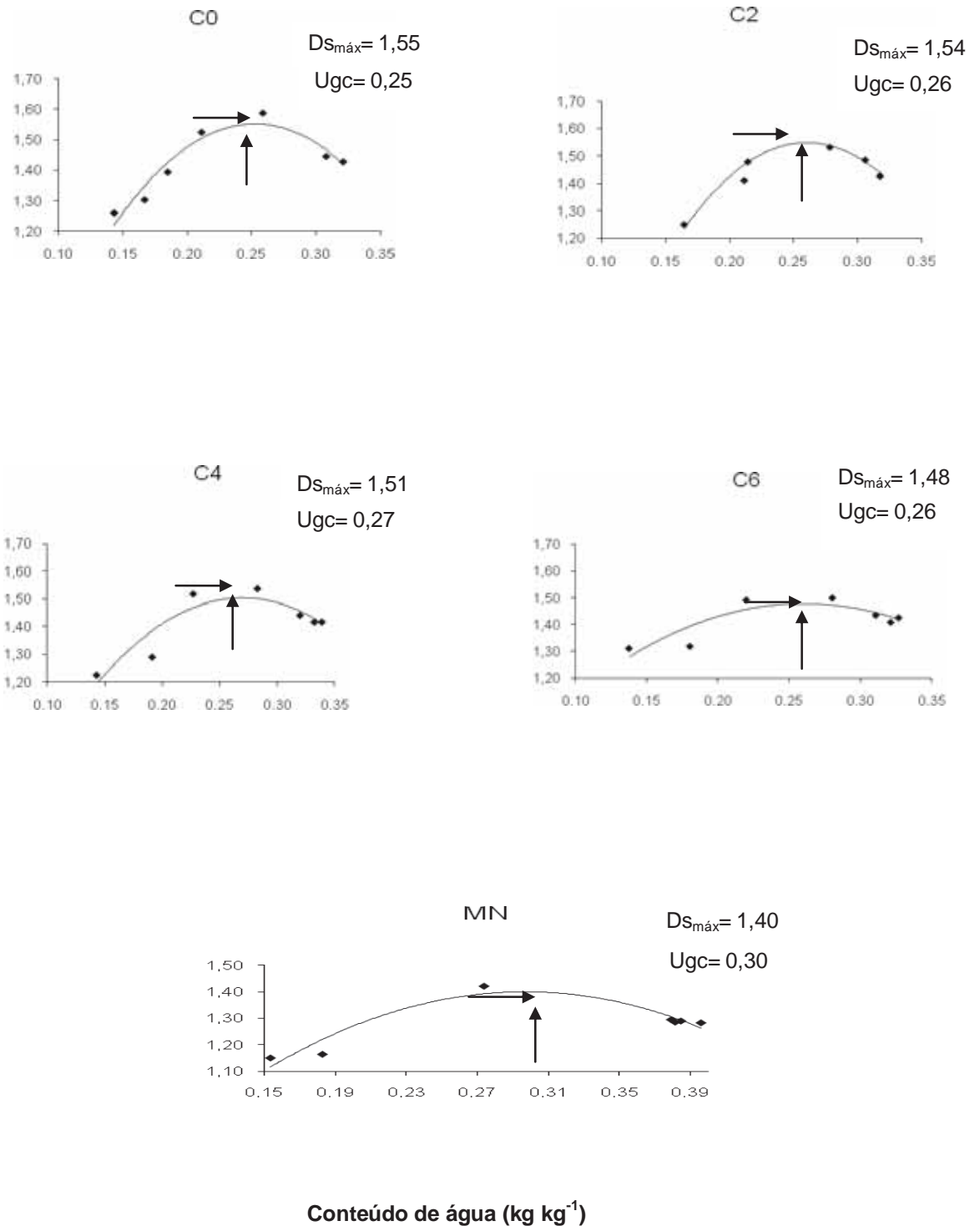
Densidade do solo (Mg m^{-3})


Figura 1. Densidade máxima ($D_{s_{\text{máx}}}$) e Umidade gravimétrica crítica (U_{gc}) de LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico determinada pelo ensaio de Proctor, na camada de 0-0,10 m. C0= 0 passada; C2= duas passadas; C4= quatro passadas; C6= seis passadas de trator de 11 Mg e MN= mata nativa.

A $D_{s_{m\acute{a}x}}$ foi menor na MN, possivelmente pelo efeito do maior teor de matéria orgânica (MO) (Tabela 1.1) (CAMARA & KLEIN, 2005); visto que, quanto maior o teor de MO do solo, menor é a $D_{s_{m\acute{a}x}}$ devido ao efeito positivo na estabilidade estrutural do solo (KLEIN, 2008). De acordo com BRAIDA et al. (2006), o acúmulo de MO reduz a $D_{s_{m\acute{a}x}}$, indicando que este solo se tornou mais resistente à compactação; entretanto, a importância desse efeito depende da granulometria do solo.

A $D_{s_{m\acute{a}x}}$ foi obtida no conteúdo de água entre 25% e 30% (Tabela 3); entretanto, nessas condições, deve-se evitar o tráfego de máquinas sobre o solo. Para NOGUEIRA (1998), obtém-se solo com menor grau de compactação em condições de menor conteúdo de água no solo, cujas partículas se aglutinam por forças de coesão, formando microagregados mais resistentes, que impedem o deslocamento das partículas e seu rearranjo e conseqüente compactação.

Tabela 3. Densidade máxima ($D_{s_{m\acute{a}x}}$), densidade do solo (D_s) e densidade relativa (D_{sr}) de um LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico em sua umidade máxima ($U_{m\acute{a}x}$), nos diferentes tratamentos e mata nativa (MN).

	MN	C ₀	C ₂	C ₄	C ₆
$U_{m\acute{a}x}$ (%)	30,0	25,0	26,0	27,0	26,0
$D_{s_{m\acute{a}x}}$ (Mg m ⁻³)	1,40	1,55	1,54	1,51	1,48
D_s (Mg m ⁻³)	0,84	1,20	1,34	1,36	1,36
D_{sr}	0,60	0,77	0,87	0,90	0,92

A D_s (Tabela 3) apresentou maiores valores nos tratamentos com compactação. De acordo com TAVARES-FILHO et al. (2006) avaliando os efeitos da escarificação nas propriedades físicas de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico sob plantio direto por mais de vinte anos, verificaram que os maiores valores de densidade do solo foram no tratamento sob sistema plantio direto, em relação aos tratamentos com escarificação do solo. A D_{sr} apresentou menor valor na MN e aumento gradativo nos tratamentos compactados. No Brasil, clima tropical, em LATOSSOLO ROXO (LATOSSOLO VERMELHO Férrico) cultivado dois anos com soja, observou-se que, a D_{sr} de 0,84 e

0,87, a produtividade em anos com distribuição irregular da precipitação pluvial decresceu, com menores prejuízos em anos chuvosos (TORRES & SARAIVA, 1999).

Na Tabela 4, estão apresentados os resultados de altura de plantas (cm), altura de inserção da primeira vagem (cm), peso de 100 grãos (g) e produtividade (kg ha^{-1}), obtidos da variedade CAC-1 cultivada em diferentes ambientes (combinação de quatro níveis de compactação do solo e três níveis de irrigação). Para altura de plantas, houve diferenças estatísticas dentro de compactação do solo e irrigação, tendo os níveis menos compactados (C_0 e C_2) e menos irrigados (0,05 e 0,01 MPa) apresentado maior altura de plantas, confirmando os resultados apresentados na Tabela 2, correspondente à macroporosidade, onde, nos níveis mais compactados, obtiveram-se valores abaixo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, mas PAGLIAI et al. (2003), constataram que este valor é inadequado ao crescimento das plantas. TAYLOR & BRAR (1991) relatam que o decréscimo da porosidade e da macroporosidade ocorre em solos compactados com alteração da estrutura, além da baixa disponibilidade de água e nutrientes, e da difusão de gases no solo. Já para altura de inserção da primeira vagem, não houve diferença significativa pelo teste F dentro de compactação do solo.

Tabela 4. Altura de plantas (cm), altura de inserção da primeira vagem (cm), peso de 100 grãos (g) e produtividade da soja (kg ha⁻¹), variedade CAC-1, em um LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico em função dos tratamentos aplicados.

Tratamentos	Altura de plantas (cm)	Altura de inserção de 1ª vagem (cm)	Peso 100 grãos (g)	Produtividade (kg ha ⁻¹)
Compactação (A)				
C ₀ ⁽²⁾	80,47 a ⁽¹⁾	11,60 a	13,15 a	816,86 a
C ₂	76,61 a	12,25 a	11,96 ab	636,86 b
C ₄	70,44 b	11,44 a	12,13 ab	591,11 b
C ₆	65,18 c	11,45 a	10,77 b	513,48 b
F	25,65**	0,32 ^{NS}	5,79**	7,91**
Irrigação (B)				
0,001 MPa	66,62 b	13,09 a	11,03 b	598,43 b
0,01 MPa	74,49 a	10,64 a	11,52 b	525,49 b
0,05 MPa	78,41 a	11,33 ab	13,46 a	794,81 a
F	27,13**	4,59*	13,42**	12,35**
Teste F (A x B)	2,88*	0,38 ^{NS}	0,95 ^{NS}	6,53**
CV (%)	6,30	20,15	11,67	24,78

⁽¹⁾Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey (p < 0,05) de probabilidade. ⁽²⁾C₀= solo não trafegado; C₂= duas passadas; C₄= quatro passadas e C₆= seis passadas de trator de 11 Mg.

BEUTLER & CENTURION (2004) mencionaram que a compactação pode impedir o crescimento de raízes e diminuir o volume de solo explorado pelo sistema radicular e, conseqüentemente, reduzir a altura de plantas. Isso diminui a taxa de uso de água pelas raízes, que apresenta uma correlação linear com o peso de matéria seca da parte aérea das plantas (LIPIEC et al., 1993), visto que diminui a eficiência de absorção de nutrientes e a quantidade de nitrogênio fixado pela leguminosa.

Para peso de 100 grãos (Tabela 4), o maior valor obtido foi na irrigação de 0,05 MPa, e a compactação C₀ diferiu estatisticamente da C₆, cujo valor foi inferior. A produtividade foi maior no tratamento menos compactado e no menos irrigado, provavelmente pela melhor estrutura do solo. Segundo STIRZAKER et al. (1996) e RIBEIRO (1999), a tolerância das plantas à compactação do solo está diretamente relacionada ao teor de água do solo, assim, constataram que o valor de resistência que impediu o crescimento radicular, é superior em maiores teores de água em relação a

solos mais secos e verificaram que em solos com menor teor de água, o crescimento de cevada foi superior no menor nível de compactação.

De acordo com os resultados obtidos, os níveis compactados afetaram a produtividade. Segundo BENGOUGH & MULLINS (1990) o menor crescimento radicular em solos compactados ocorre por causa da menor taxa de alongação celular em razão da diminuição na taxa de divisão celular do meristema.

Na interação compactação dentro de irrigação (Tabela 5) obteve-se maior altura de plantas entre os níveis menos compactados e menos irrigados, entretanto, na compactação C₂ com o maior nível de irrigação, 0,001 MPa, apresentou altura de plantas semelhante a C₄ e C₆, maiores níveis de compactação.

Tabela 5. Altura de plantas (cm) da variedade CAC-1, na interação de compactação dentro de irrigação.

Compactação (A)	Irrigação (B)			F
	0,001 MPa	0,01 MPa	0,05 MPa	
C ₀ ⁽²⁾	74,55 Ab ⁽¹⁾	83,00 Aa	83,85 Aa	4,97*
C ₂	63,98 Bb	81,98 Aa	83,88 Aa	22,68**
C ₄	66,50 ABb	68,88 Bab	75,95 ABa	4,54*
C ₆	61,45 Bb	64,10 Bab	69,98 Ba	3,58*
F	6,06**	16,79**	8,57*	

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ⁽²⁾C₀= solo não trafegado; C₂= duas passadas; C₄= quatro passadas e C₆= seis passadas de trator de 11 Mg.

Na Tabela 6, está a interação de compactação dentro de irrigação para o fator produtividade. No maior nível de irrigação (0,001 MPa) e no menor nível de compactação (C₀) obteve-se maior produtividade, a qual diferiu estatisticamente dos demais níveis de compactação e de irrigação. Enquanto no menor nível de irrigação (0,05 MPa) com a compactação C₂ apresentou diferença estatística dos demais níveis de irrigação e da compactação C₆. No entanto, BARBER (1994) constatou que a produtividade de soja, cultivar IAC 8, apresentou menor decréscimo para anos com maior precipitação pluvial, no solo compactado.

Tabela 6. Produtividade (kg ha^{-1}) da variedade CAC-1, na interação de compactação dentro de irrigação.

Compactação (A)	Irrigação (B)			F
	0,001 MPa	0,01 MPa	0,05 MPa	
C ₀ ⁽²⁾	1060,01 Aa ⁽¹⁾	675,28 Ab	715,29 ABb	7,12**
C ₂	495,30 Bb	420,19 Ab	995,08 Aa	15,55**
C ₄	449,58 Bb	496,82 Ab	826,94 ABa	6,73**
C ₆	388,84 Ba	509,67 Aa	641,91 Ba	2,55 ^{NS}
F	15,38**	1,84 ^{NS}	3,76*	

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ⁽²⁾C₀= solo não trafegado; C₂= duas passadas; C₄= quatro passadas e C₆= seis passadas de trator de 11 Mg.

Para o fator altura de plantas (variedade FT-Cristalina) (Tabela 7), houve diferenças significativas apenas dentro de irrigação, tendo os níveis correspondentes às tensões, 0,05 e 0,01 MPa, apresentado maior altura de plantas. Para altura de inserção da 1ª vagem, não houve diferença significativa entre os tratamentos compactados, apresentando diferença apenas para irrigação, onde o nível 0,001 MPa obteve maior valor. Para peso de 100 grãos, houve diferença estatística entre os níveis 0,001 MPa e 0,05 MPa, tendo este, resultado superior. Em relação aos dados de componentes da produtividade, não houve influência da compactação nos tratamentos, e o nível correspondente à tensão 0,05 MPa obteve maior produtividade em relação à tensão 0,01 MPa. Corroborando com os resultados de LINDEMANN et al. (1982) que, observaram que a produtividade de soja aumentou quando o solo foi trafegado com um trator de 3,6 Mg em ano com menor precipitação pluvial.

Tabela 7- Altura de plantas (cm), altura de inserção da primeira vagem (cm), peso de 100 grãos (g) e produtividade da soja (kg ha⁻¹), variedade FT-Cristalina, em um LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico em função dos tratamentos aplicados.

Tratamentos	Altura de plantas (cm)	Altura de inserção de 1ª vagem (cm)	Peso 100 grãos (g)	Produtividade (kg ha ⁻¹)
Compactação (A)				
C ₀ ⁽²⁾	76,06 a ⁽¹⁾	16,63 a	8,77 a	493,85 a
C ₂	73,33 a	20,13 a	8,49 a	491,92 a
C ₄	75,58 a	20,23 a	8,52 a	534,05 a
C ₆	71,97 a	18,68 a	8,58 a	500,21 a
F	1,37 ^{NS}	1,47 ^{NS}	0,29 ^{NS}	0,53 ^{NS}
Irrigação (B)				
0,001 MPa	66,08 b	21,81 a	8,13 b	501,09 ab
0,01 MPa	77,36 a	17,62 b	8,61 ab	438,98 b
0,05 MPa	79,27 a	17,32 b	9,03 a	574,95 a
F	25,10**	4,37*	4,96*	8,41**
Teste F (A x B)	6,19**	0,90 ^{NS}	1,11 ^{NS}	5,10**
CV (%)	7,67	25,38	9,40	18,59

⁽¹⁾Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey (p < 0,05) de probabilidade. ⁽²⁾C₀= solo não trafegado; C₂= duas passadas; C₄= quatro passadas e C₆= seis passadas de trator de 11 Mg.

As interações significativas para altura de plantas e produtividade da variedade FT-Cristalina estão desdobradas nas Tabelas 8 e 9.

Com relação aos dados da produtividade o nível de irrigação 0,001 MPa obteve maior produtividade o qual diferiu estatisticamente dos menores níveis de irrigação, e apenas da compactação C₂. Já no menor nível de irrigação (0,05 MPa) apresentou maiores produtividade nos níveis compactados.

Tabela 8. Altura de plantas (cm) da variedade FT-Cristalina, na interação de compactação dentro de irrigação.

Compactação (A)	Irrigação (B)			F
	0,001 MPa	0,01 MPa	0,05 MPa	
C ₀ ⁽²⁾	66,80 ABb ⁽¹⁾	84,25 Aa	77,13 Aa	9,50**
C ₂	56,13 Bb	83,08 Aa	80,78 Aa	27,55**
C ₄	72,43 Aa	74,13 ABa	80,20 Aa	2,06 ^{NS}
C ₆	68,95 Ab	68,00 Bb	78,98 Aa	4,57*
F	6,09**	7,33**	0,32 ^{NS}	

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ⁽²⁾C₀= solo não trafegado; C₂= duas passadas; C₄= quatro passadas e C₆= seis passadas de trator de 11 Mg.

Tabela 9. Produtividade (kg ha^{-1}) da variedade FT-Cristalina, na interação de compactação dentro de irrigação.

Compactação (A)	Irrigação (B)			F
	0,001 MPa	0,01 MPa	0,05 MPa	
C ₀ ⁽²⁾	623,10 Aa ⁽¹⁾	408,94 Ab	449,50 Bb	5,87**
C ₂	411,69 Ba	521,44 Aa	542,63 ABa	2,24 ^{NS}
C ₄	481,03 ABa	479,36 Aa	641,75 Aa	3,95*
C ₆	488,54 ABb	346,18 Ab	665,90 Aa	11,64**
F	3,55*	2,71 ^{NS}	4,46**	

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ⁽²⁾C₀= solo não trafegado; C₂= duas passadas; C₄= quatro passadas e C₆= seis passadas de trator de 11 Mg.

Observa-se também que, com relação aos efeitos da produtividade, nas duas variedades testadas, analisados em função da densidade relativa (Dsr) (Tabelas 3 e 4), salienta-se que a variedade CAC-1 obteve produtividade máxima com a Dsr de 0,77 (C₀), havendo um decréscimo a partir deste valor, sendo que, para a variedade FT-Cristalina, ocorreu decréscimo de produtividade a partir do valor da Dsr de 0,90 (C₄), confirmando os resultados obtidos na Tabela 3, onde os valores de Dsr ótimo foram entre os níveis menos compactados. Esse efeito de pouca compactação no aumento de produtividade também foi demonstrado por HÅKANSSON & MEDVEDEV (1995).

A produtividade das variedades de soja foi aquém do esperado (3,0 a 3,5 t ha⁻¹). Isso provavelmente ocorreu porque o período de dezembro a abril de 2009/2010 foi bastante chuvoso, com o registro de precipitações de 1.053,6 mm, com a ocorrência de vários dias nublados que, associados com a semeadura tardia efetuada (dezembro) e a ocorrência de níveis altos da ferrugem asiática, apesar do controle químico efetuada, provavelmente, foram os responsáveis pela baixa produtividade.

Na Tabela 10 estão apresentados os resultados de imagens do sistema radicular retirado de amostras indeformadas de solo, na camada de 0-0,10 m, da variedade CAC-1, digitalizadas em “scanner” de leitura ótica, na resolução de 400 dpi, que forneceram a área (mm^2), o diâmetro médio (mm) e o comprimento das raízes (mm) pelo software “Delta-T Scan”, e foi determinada a densidade radicular. Ainda neste quadro estão os dados de massa seca de raízes e sua densidade.

Com relação à área, o comprimento, densidade de comprimento radicular, massa seca e densidade de massa seca radicular da variedade CAC-1 (0-0,10 m), pode-se observar que as compactações e irrigações não interferiram nestes fatores. O diâmetro

radicular foi maior no nível de compactação do solo C₄, o qual diferiu significativamente da menor compactação (C₀), os níveis C₂ e C₆ não apresentaram efeitos dos tratamentos. No nível de irrigação a 0,001 MPa o diâmetro radicular diferiu significativamente do menor nível de irrigação (0,05 MPa) e o nível 0,01 MPa não apresentou efeitos dos tratamentos.

Não houve diferença estatística entre as camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m para a variável diâmetro radicular, resultados semelhantes foram encontrados por FREDDI et al. (2009) que trabalhando com o mesmo solo em estudo, com a cultura do milho, encontrou menor diâmetro radicular apenas na camada de 0-0,05 m e não houve diferença estatística entre as camadas (0,05-0,10; 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m).

Tabela 10. Área (mm²), diâmetro (mm), comprimento (mm) e densidade (cm cm⁻³) de comprimento de raízes, massa seca de raízes (mg) e densidade de massa seca de raiz (mg cm⁻³), na camada de 0-0,10 m, da variedade de soja CAC-1 cultivada sob diferentes manejos.

Tratamentos	Área (mm ²) ⁽¹⁾	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Densidade de comprimento radicular (cm cm ⁻³)	Massa seca (mg)	Densidade de massa seca de raiz (mg cm ⁻³)
Compactação (A)						
C ₀ ⁽³⁾	973,51 a ⁽²⁾	0,33 b	294,19 a	0,66 a	49,74 a	0,11 a
C ₂	966,54 a	0,37 ab	258,61 a	0,58 a	50,87 a	0,11 a
C ₄	1040,52 a	0,39 a	254,71 a	0,57 a	58,78 a	0,13 a
C ₆	884,96 a	0,35 ab	247,53 a	0,55 a	38,83 a	0,09 a
F	0,24 ^{NS}	3,33*	0,59 ^{NS}	0,60 ^{NS}	0,78 ^{NS}	0,83 ^{NS}
Irrigação (B)						
0,001 MPa	990,94 a	0,39 a	250,93 a	0,56 a	51,76 a	0,11 a
0,01 MPa	1125,61 a	0,36 ab	309,17 a	0,69 a	58,74 a	0,13 a
0,05 MPa	782,58 a	0,33 b	231,18 a	0,51 a	38,16 a	0,08 a
F	2,33 ^{NS}	4,23*	2,99 ^{NS}	3,02 ^{NS}	1,70 ^{NS}	1,64 ^{NS}
Teste F (A x B)	0,55 ^{NS}	1,82 ^{NS}	0,52 ^{NS}	0,53 ^{NS}	0,46 ^{NS}	0,50 ^{NS}
CV (%)	46,88	15,38	35,58	35,70	64,84	65,36

⁽¹⁾Leituras das raízes realizadas em "scanner" Delta T de amostras indeformadas de raízes retiradas de cada parcela próxima a planta de soja com trado de volume = 448,31 ml.

⁽²⁾Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

⁽³⁾ C₀= solo não trafegado; C₂= duas passadas; C₄= quatro passadas e C₆= seis passadas de trator de 11 Mg.

Os resultados de imagens do sistema radicular coletadas na profundidade de 0,10-0,20 m, da variedade de soja CAC-1 estão apresentados na Tabela 11. Não houve diferenças estatísticas significativas entre as diferentes intensidades de compactação

para os fatores radiculares avaliados, área, comprimento e densidade de comprimento radicular. O diâmetro, a massa seca e a densidade de massa seca de raiz foram maiores no nível C₄ de compactação do solo, diferindo significativamente do menos compactado (C₀) e os níveis C₂ e C₆ não apresentaram efeitos dos tratamentos. Dentro dos três níveis de irrigação bem como a interação compactação x irrigação não houve diferenças estatísticas para todas as variáveis do sistema radicular da soja. Em estudo realizado com raízes de milho verificou-se maior superfície, densidade e diâmetro radicular, assim como o aumento da massa seca, com a elevação da resistência mecânica à penetração do solo, restringindo o crescimento radicular em profundidade (FREDDI, 2007).

Tabela 11. Área (mm²), diâmetro (mm), comprimento (mm) e densidade (cm cm⁻³) de comprimento de raízes, massa seca de raízes (mg) e densidade de massa seca de raiz (mg cm⁻³), na camada de 0,10-0,20 m, da variedade de soja CAC-1 cultivada sob diferentes manejos.

Tratamentos	Área (mm ²) ⁽¹⁾	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Densidade de comprimento radicular (cm cm ⁻³)	Massa seca (mg)	Densidade de massa seca de raiz (mg cm ⁻³)
Compactação (A)						
C ₀ ⁽³⁾	499,00 a ⁽²⁾	0,31 b	158,21 a	0,35 a	21,91 b	0,05 b
C ₂	530,22 a	0,34 ab	154,80 a	0,34 a	29,93 ab	0,07 ab
C ₄	842,87 a	0,39 a	205,41 a	0,46 a	55,80 a	0,13 a
C ₆	630,43 a	0,35 ab	177,42 a	0,40 a	36,99 ab	0,08 ab
F	2,29 ^{NS}	3,03*	0,93 ^{NS}	0,93 ^{NS}	2,74*	2,87*
Irrigação (B)						
0,001 MPa	585,80 a	0,34 a	162,25 a	0,36 a	28,25 a	0,06 a
0,01 MPa	687,26 a	0,35 a	192,62 a	0,43 a	39,60 a	0,09 a
0,05 MPa	603,83 a	0,35 a	167,01 a	0,37 a	40,63 a	0,09 a
F	0,37 ^{NS}	0,11 ^{NS}	0,61 ^{NS}	0,65 ^{NS}	0,82 ^{NS}	0,82 ^{NS}
Teste F (A x B)	0,52 ^{NS}	0,67 ^{NS}	0,42 ^{NS}	0,43 ^{NS}	0,34 ^{NS}	0,37 ^{NS}
CV (%)	56,77	18,95	48,04	48,00	83,80	83,36

⁽¹⁾Leituras das raízes realizadas em "scanner" Delta T de amostras indeformadas de raízes retiradas de cada parcela próxima a planta de soja com trado de volume = 448,31 ml.

⁽²⁾Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

⁽³⁾C₀= solo não trafegado; C₂= duas passadas; C₄= quatro passadas e C₆= seis passadas de trator de 11 Mg.

Verificou-se para a massa de matéria seca das raízes que os menores valores foram obtidos na camada de 0,10-0,20 m (Tabela 11), resultados semelhantes foram encontrados por FREDDI et al. (2009) quando foram efetuadas duas passadas do trator

de 11 Mg. De acordo com BASSOI et al. (1994) a maior concentração de raízes na superfície e a menor exploração do solo em profundidade prejudicam a absorção de água, pois normalmente raízes mais profundas podem retirar água com maior facilidade do que aquelas próximas à superfície do solo, devido ao fato de serem mais jovens, menos comprimidas e, frequentemente, localizadas em solo mais úmido. Os maiores benefícios no aumento da profundidade de subsolagem foram observados em anos de menor precipitação, cujas raízes que penetram a maiores profundidades explorando maior volume de solo extraem mais água e nutrientes, reduzindo as condições desfavoráveis para o desenvolvimento da cultura, resultando em maiores produtividades (VARSA et al., 1997).

Na Tabela 12 estão apresentados os resultados de imagens do sistema radicular retirado de amostras indeformadas de solo, na profundidade de 0-0,10 m, da variedade FT-Cristalina. As compactações não interferiram no sistema radicular em estudo. No menor nível de irrigação (0,05 MPa), observou-se maiores valores para área radicular, massa seca e densidade de massa seca, os quais diferiram da irrigação intermediária (0,01MPa). Não houve diferença estatística para o diâmetro radicular. Os fatores comprimento e densidade de comprimento radicular foram maiores na irrigação 0,05 MPa diferindo significativamente dos níveis 0,01 e 0,001 MPa. Os valores da interação do teste F (compactação x irrigação) para comprimento e densidade radicular são os mesmos, pois a densidade é o comprimento/volume (volume do trado amostrador = $448,31\text{cm}^3$), e o volume é uma constante.

Tabela 12. Área (mm²), diâmetro (mm), comprimento (mm) e densidade (cm cm⁻³) de comprimento de raízes, massa seca de raízes (mg) e densidade de massa seca de raiz (mg cm⁻³), na camada de 0-0,10 m, da variedade de soja FT-Cristalina cultivada sob diferentes manejos.

Tratamentos	Área (mm ²) ⁽¹⁾	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Densidade de comprimento radicular (cm cm ⁻³)	Massa seca (mg)	Densidade de massa seca de raiz (mg cm ⁻³)
Compactação (A)						
C ₀ ⁽³⁾	604,86 a ⁽²⁾	0,33 a	185,28 a	0,41 a	28,64 a	0,06 a
C ₂	728,00 a	0,36 a	201,09 a	0,45 a	42,94 a	0,10 a
C ₄	688,73 a	0,33 a	204,28 a	0,45 a	31,13 a	0,07 a
C ₆	646,80 a	0,36 a	190,21 a	0,42 a	34,37 a	0,08 a
F	0,40 ^{NS}	1,48 ^{NS}	0,18 ^{NS}	0,17 ^{NS}	0,90 ^{NS}	0,99 ^{NS}
Irrigação (B)						
0,001 MPa	649,92 ab	0,37 a	176,25 b	0,39 b	36,41 ab	0,08 ab
0,01 MPa	513,77 b	0,34 a	153,08 b	0,34 b	21,36 b	0,05 b
0,05 MPa	837,61 a	0,33 a	256,32 a	0,57 a	45,03 a	0,10 a
F	4,95**	3,23*	8,89**	8,91**	4,41*	4,22*
Teste F (A x B)	1,42 ^{NS}	2,53*	2,81*	2,81*	0,76 ^{NS}	0,81 ^{NS}
CV (%)	43,80	14,68	37,22	37,37	66,62	66,95

⁽¹⁾Leituras das raízes realizadas em "scanner" Delta T de amostras indeformadas de raízes retiradas de cada parcela próxima a planta de soja com trado de volume = 448,31 ml.

⁽²⁾Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

⁽³⁾C₀= solo não trafegado; C₂= duas passadas; C₄= quatro passadas e C₆= seis passadas de trator de 11 Mg.

A interação compactação dentro de irrigação para o diâmetro radicular na profundidade de 0-0,10 m da variedade FT-Cristalina (Tabela13) apresentou diferença estatística entre a C₂ e os níveis 0,001 e 0,01 MPa enquanto que a C₆ apresentou semelhança entre os maiores níveis de irrigação diferindo do nível 0,05 MPa. Segundo FOLONI et al. (2003) em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico o diâmetro médio das raízes das plantas de milho aumentou significativamente com a compactação do solo, e algumas espécies com o engrossamento das raízes na camada compactada provavelmente, apresentam pouco potencial para estabelecer o seu sistema radicular em solos compactados.

Tabela 13. Diâmetro na camada de 0-0,10 m, da variedade FT-Cristalina, na interação de compactação dentro de irrigação.

Compactação (A)	Irrigação (B)			F
	0,001 MPa	0,01 MPa	0,05 MPa	
C ₀ ⁽²⁾	0,33 Aa ⁽¹⁾	0,31 Aa	0,35 Aa	0,63 ^{NS}
C ₂	0,41 Aa	0,32 Ab	0,35 Aab	3,25*
C ₄	0,34 Aa	0,34 Aa	0,33 Aa	0,10 ^{NS}
C ₆	0,41 Aa	0,39 Aa	0,29 Ab	6,86**
F	2,99*	2,19 ^{NS}	1,36 ^{NS}	

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ⁽²⁾C₀= solo não trafegado; C₂= duas passadas; C₄= quatro passadas e C₆= seis passadas de trator de 11 Mg.

As Tabelas 14 e 15 mostram as interações compactação dentro de irrigação para o comprimento radicular e a densidade de comprimento de raízes, camada 0-0,10 m, variedade FT-Cristalina, cujas variáveis foram maiores na C₂ com o nível 0,05 MPa os quais diferiram do solo sem tráfego de máquinas (C₀) e dos níveis mais irrigados (0,001 e 0,01 MPa) para ambas variáveis. A restrição ao crescimento das plantas depende das condições de umidade do solo, distribuição pluviométrica, em solo compactado, com alta resistência à penetração (BOONE et al., 1987).

Tabela 14. Comprimento de raízes na camada de 0-0,10 m, da variedade FT-Cristalina, na interação de compactação dentro de irrigação.

Compactação (A)	Irrigação (B)			F
	0,001 MPa	0,01 MPa	0,05 MPa	
C ₀ ⁽²⁾	200,84 Aa ⁽¹⁾	181,71 Aa	173,28 Ba	0,15 ^{NS}
C ₂	108,92 Ab	165,82 Ab	328,54 Aa	9,84**
C ₄	225,07 Aa	147,51 Aa	240,26 ABa	1,88 ^{NS}
C ₆	170,17 Aab	117,27 Ab	283,18 ABa	5,44**
F	1,91 ^{NS}	0,58 ^{NS}	3,31*	

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ⁽²⁾C₀= solo não trafegado; C₂= duas passadas; C₄= quatro passadas e C₆= seis passadas de trator de 11 Mg.

Tabela 15. Densidade de comprimento de raízes na camada de 0-0,10 m, da variedade FT-Cristalina, na interação de compactação dentro de irrigação.

Compactação (A)	Irrigação (B)			F
	0,001 MPa	0,01 MPa	0,05 MPa	
C ₀ ⁽²⁾	0,45 Aa ⁽¹⁾	0,41 Aa	0,39 Ba	0,14 ^{NS}
C ₂	0,24 Ab	0,37 Ab	0,73 Aa	9,78**
C ₄	0,50 Aa	0,33 Aa	0,53 ABa	1,86 ^{NS}
C ₆	0,38 Aab	0,26 Ab	0,64 ABa	5,57**
F	1,91 ^{NS}	0,59 ^{NS}	3,30*	

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ⁽²⁾C₀= solo não trafegado; C₂= duas passadas; C₄= quatro passadas e C₆= seis passadas de trator de 11 Mg.

Os resultados de imagens do sistema radicular coletados na profundidade de 0,10-0,20 m, da variedade de soja FT-Cristalina estão apresentados na Tabela 16. Não houve diferenças estatísticas significativas entre os quatro níveis de compactação e de irrigação para os fatores radiculares avaliados, área, comprimento e densidade do comprimento radicular. Para o diâmetro, massa seca e densidade de massa seca de raiz o nível de irrigação 0,001 Mpa apresentou maior valor, o qual foi semelhante estatisticamente do menor nível de irrigação e diferiu da irrigação intermediária, 0,01 MPa.

Tabela 16. Área (mm²), diâmetro (mm), comprimento (mm) e densidade (cm cm⁻³) de comprimento de raízes, massa seca de raízes (mg) e densidade de massa seca de raiz (mg cm⁻³), na camada de 0,10-0,20 m, da variedade de soja FT-Cristalina cultivada sob diferentes manejos.

Tratamentos	Área (mm ²) ⁽¹⁾	Diâmetro (mm)	Comprimento (cm)	Densidade de comprimento radicular (cm cm ⁻³)	Massa seca (mg)	Densidade de massa seca de raiz (mg cm ⁻³)
Compactação (A)						
C ₀ ⁽³⁾	492,22 a ⁽²⁾	0,33 a	141,65 a	0,32 a	26,42 a	0,06 a
C ₂	461,54 a	0,37 a	120,91 a	0,27 a	25,40 a	0,06 a
C ₄	456,23 a	0,39 a	112,58 a	0,25 a	27,50 a	0,06 a
C ₆	654,27 a	0,41 a	153,02 a	0,34 a	49,39 a	0,11 a
F	1,48 ^{NS}	2,04 ^{NS}	1,86 ^{NS}	1,78 ^{NS}	1,68 ^{NS}	1,70 ^{NS}
Irrigação (B)						
0,001 MPa	611,00 a	0,42 a	140,37 a	0,31 a	43,36 a	0,10 a
0,01 MPa	387,86 a	0,34 b	113,19 a	0,25 a	16,24 b	0,04 b
0,05 MPa	549,34 a	0,37 ab	142,56 a	0,32 a	36,93 ab	0,08 ab
F	2,99 ^{NS}	3,95*	1,92 ^{NS}	1,88 ^{NS}	3,40*	3,42*
Teste F (A x B)	0,62 ^{NS}	1,11 ^{NS}	0,69 ^{NS}	0,67 ^{NS}	0,33 ^{NS}	0,32 ^{NS}
CV (%)	51,66	21,13	35,75	35,85	95,59	97,06

⁽¹⁾Leituras das raízes realizadas em "scanner" Delta T de amostras indeformadas de raízes retiradas de cada parcela próxima a planta de soja com trado de volume = 448,31 ml.

⁽²⁾Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

⁽³⁾C₀= solo não trafegado; C₂= duas passadas; C₄= quatro passadas e C₆= seis passadas de trator de 11 Mg.

Pela matriz de correlação da variedade de soja CAC-1 (Tabela 17) verifica-se que todas as características do sistema radicular, avaliadas na camada de 0-0,10 m, correlacionaram-se diretamente. A produtividade da soja correlacionou-se diretamente apenas com o comprimento de raízes e a densidade de comprimento de raízes, porém, não foi significativo. Corroborando com os resultados de FREDDI et al. (2009), cujo

trabalho com a cultura do milho encontrou correlação significativa da produtividade apenas com o diâmetro radicular, segundo esse autor, a variabilidade espacial e temporal da estrutura do solo é um dos fatores que dificultam quantificar as propriedades físicas do solo, pois as mesmas variam conjuntamente. A influência da compactação do solo sobre o crescimento radicular depende de uma série de fatores, dentre estes as características genéticas das plantas e do seu estágio de desenvolvimento, bem como das condições ambientais (BENNIE, 1996).

Tabela 17. Matriz de correlações entre os coeficientes da área (A), diâmetro (D), comprimento (C), densidade de comprimento de raízes (Ds), massa seca de raízes (Ms), densidade de massa seca de raiz (DMs) e produtividade (Prod) da variedade de soja CAC-1 submetido a diferentes intensidades de compactação.

Características	A	D	C	Ds	Ms	DMs
D	0,67**	-	-	-	-	-
C	0,90**	0,30*	-	-	-	-
Ds	0,90**	0,30*	1,00**	-	-	-
Ms	0,91**	0,70**	0,77**	0,77**	-	-
DMs	0,92**	0,70**	0,77**	0,78**	1,00**	-
Prod	-0,07 ^{NS}	-0,23 ^{NS}	0,03 ^{NS}	0,03 ^{NS}	-0,05 ^{NS}	-0,05 ^{NS}

** , * Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, ^{NS} não significativo.

Para a variedade de soja FT-Cristalina (Tabela 18), através da correlação, verificou-se que o diâmetro entre comprimento e densidade de comprimento de raízes, avaliados na camada de 0-0,10 m, correlacionaram-se inversamente e a área entre diâmetro não foi significativa, apresentando as demais características do sistema radicular correlação direta. A produtividade da soja correlacionou-se inversamente apenas com o diâmetro, contudo, a massa seca de raiz e a densidade de massa seca não foram significativas. Reduções na massa da matéria seca e densidade do comprimento radicular de plantas de milho na camada de solo compactada, também foram verificados por FOLONI et al. (2003) em LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico. Para BERGAMIN et al. (2010) a redução no diâmetro radicular pode ser uma adaptação das plantas às condições restritivas impostas pela compactação, a fim de as raízes

penetrarem no espaço poroso do solo de menor diâmetro, para obter água e nutrientes para o seu crescimento e desenvolvimento.

Tabela 18. Matriz de correlações entre os coeficientes da área (A), diâmetro (D), comprimento (C), densidade de comprimento de raízes (Ds), massa seca de raízes (Ms), densidade de massa seca de raiz (DMs) e produtividade (Prod) da variedade de soja FT-Cristalina submetido a diferentes intensidades de compactação.

Características	A	D	C	Ds	Ms	DMs
D	0,24 ^{NS}	-	-	-	-	-
C	0,94 ^{**}	-0,07 ^{NS}	-	-	-	-
Ds	0,94 ^{**}	-0,07 ^{NS}	1,00 ^{**}	-	-	-
Ms	0,82 ^{**}	0,54 ^{**}	0,64 ^{**}	0,64 ^{**}	-	-
DMs	0,81 ^{**}	0,55 ^{**}	0,63 ^{**}	0,63 ^{**}	1,00 ^{**}	-
Prod	0,34 [*]	-0,21 ^{NS}	0,43 ^{**}	0,43 ^{**}	0,24 ^{NS}	0,24 ^{NS}

^{**}, ^{*} Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, ^{NS} não significativo.

CONCLUSÕES

1. O desenvolvimento da planta foi influenciado pela compactação do solo e pelos conteúdos de água no solo. Níveis mais altos de compactação e de água no solo provocaram redução de altura de plantas e da produtividade na variedade CAC-1, e a redução na variedade FT-Cristalina foi influenciada apenas pela irrigação.
2. A produtividade máxima foi obtida com a densidade do solo relativa de 0,77 e de 0,90 e resistência do solo à penetração de 0,71 e 1,88 MPa, para as variedades CAC-1 e FT-Cristalina, respectivamente.
3. O diâmetro radicular foi maior na compactação C₄, para a variedade CAC-1 nas duas camadas, entretanto, com o aumento da compactação, há o aumento do diâmetro, inibindo o crescimento e o desenvolvimento do sistema radicular em solos compactados.

CAPÍTULO 3 - QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO EUTROFÉRICO SUBMETIDO À COMPACTAÇÃO

RESUMO - A modificação estrutural do solo provocada pela sua compactação é fator limitante ao crescimento e desenvolvimento das plantas. Assim, o objetivo desta pesquisa foi avaliar, em um LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico no município de Jaboticabal, SP, os parâmetros físicos do solo sobre a estabilidade de agregados, a condutividade hidráulica e o índice "S". O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado com parcelas subdivididas (quatro níveis de compactação e duas camadas), com quatro repetições e uma área de mata nativa (MN) como testemunha. Os tratamentos de compactação foram: C₀= 0; C₂= 2; C₄= 4 e C₆= 6 passadas de um trator de 11 Mg. Verificou-se que a MN apresentou elevada relação dos índices DMG (Diâmetro médio geométrico) e DMP (Diâmetro médio ponderado) que constou agregados maiores e mais estáveis em comparação aos demais tratamentos estudados. Foi obtido o valor de "S" de 0,036 e redução nos níveis mais compactados para 0,026, visto que a compactação reduziu o valor de "S", o qual atingiu o valor limitante (< 0,035) apesar da mineralogia oxídica do solo analisado.

Termos para indexação: física do solo, agregação, retenção de água.

INTRODUÇÃO

Comumente com o avanço da tecnologia no intuito de obter produção em quantidade e qualidade, o tráfego contínuo de máquinas agrícolas em um solo de alta umidade, contribui para alterações significativas nos atributos físicos do solo e na sua qualidade estrutural deixando mais propenso à compactação. Em solos com umidade elevada, a compactação tem sido indicada como a principal causa da degradação física dos solos pela redução de seu espaço poroso (RAPER, 2005), uma vez que se verifica aumentos expressivos e prejudiciais da compactação para as plantas, principalmente até 0,20 m de profundidade (CARDOSO et al., 2006), apesar de o maior estado de compactação ser verificado próximo a 0,10 m de profundidade (GENRO JUNIOR et al., 2004).

Em consequência da compactação, há alteração estrutural do solo devido à reorganização das partículas e de seus agregados, o que aumenta a densidade e resistência do solo à penetração e reduz os macroporos, inibindo o crescimento e o desenvolvimento radicular das plantas (COLLARES et al., 2006). A condição primordial para garantir altas produtividades das culturas é a manutenção de bom estado de agregação e estabilidade e, conseqüentemente, de boa estrutura (CORRÊA, 2002). Entretanto, a fim de quantificar os impactos do uso e manejo na qualidade física do solo, são utilizadas diferentes propriedades físicas relacionadas com sua forma e com sua estabilidade estrutural, como a porosidade do solo e a estabilidade de agregados (ARATANI et al., 2009). NIERO et al. (2010) definem o solo como um ambiente para a produção agrícola, podendo a qualidade do solo ser avaliada por meio de atributos relacionados à sua capacidade de fornecer nutrientes às plantas, e dar suporte ao crescimento e desenvolvimento de raízes e propiciar adequada estabilidade estrutural para resistir à erosão e reter água para as plantas.

SALTON et al. (2008) realizaram estudos sobre as relações entre os agregados do solo e a matéria orgânica, identificando, além da fração mineral, a fauna do solo, microrganismos, raízes, agentes inorgânicos e variáveis ambientais como os principais fatores envolvidos na formação e estabilidade de agregados do solo. Segundo esses

autores em uma fase preliminar, a formação de microagregados (diâmetro inferior a 0,25 mm) está relacionada à interação da matéria mineral entre si e com compostos orgânicos, e posteriormente, o crescimento de raízes e hifas de fungos, juntamente com resíduos de vegetais, insetos e outros organismos, estimula a formação de estruturas mais complexas e diversificadas, como macroagregados estáveis, com tamanho superior a 0,25 mm, visto que essas estruturas correspondem a um nível de organização mais elevado.

A agregação do solo controla os movimentos internos de água, ar e calor, bem como o crescimento de raízes, e os resíduos orgânicos diminuem a densidade do solo, além de criar poros de diâmetro grande, que favorecem a entrada de ar e a drenagem de água (VASCONCELOS et al., 2010).

O efeito das práticas de cultivo sobre a qualidade do solo deve ser monitorado e segundo FREDDI et al. (2009) principalmente aquelas relacionadas com a estrutura, a distribuição do tamanho dos poros e as propriedades hídricas do solo, como os fluxos e a disponibilidade de água às plantas e para isso, têm sido empregados indicadores de qualidade do solo, como, o índice “S”.

O índice “S” (S de “slope” = declividade) introduzido no Brasil por SILVA (2004), e apresentado em uma série de artigos por DEXTER (2004 a, b, c), é estabelecido pela declividade da curva de retenção de água do solo em seu ponto de inflexão e apresenta importante contribuição nos estudos da qualidade física do solo para a produtividade das culturas, principalmente pelo grande potencial para ser usado em avaliações da interação entre o manejo e a qualidade física do solo e por ser facilmente medido, com equipamentos e equações utilizados rotineiramente nos laboratórios de física do solo.

Utilizando resultados experimentais, o índice “S” $> 0,035$ foi estabelecido como favorável para o crescimento das raízes, o qual indica adequada distribuição de tamanho de poros e qualidade física do solo, independentemente do tipo de solo, em clima temperado, e por sua vez valores de “S” $< 0,020$ estão claramente associados às más condições físicas do solo, pois pequena inclinação indica um solo desestruturado e, portanto, elevada inclinação, um solo estruturado apresentando muitos poros (DEXTER, 2004 a). Segundo esse autor o índice “S” avalia a porosidade estrutural que

corresponde aos poros inter-partículas, fendas, bioporos e poros macroestruturais resultantes do uso e manejo.

Um atributo do solo que exerce importante papel na resolução de problemas que envolvem irrigação, drenagem, conservação de recarga do lençol freático, poluição, infiltração e controle de enxurrada é a condutividade hidráulica (STONE & SILVEIRA, 1978).

A presente pesquisa objetivou avaliar os efeitos de quatro níveis de compactação de um LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico relacionado à sua agregação e à condutividade hidráulica, tendo como testemunha a mata nativa, bem como caracterizar a compactação do solo a partir do índice "S".

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido na área experimental da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Produção da Universidade Estadual Paulista (UNESP/FCAV) Jaboticabal (SP), com coordenadas geográficas aproximadas de 21°15'29" de latitude sul e 48°16'47" de longitude oeste de Greenwich, com altitude média de 600 m. O clima da região, de acordo com a classificação climática de Köppen, é do tipo Cwa, com verão quente e inverno seco, precipitação média anual de 1.428 mm e temperatura média de 21 °C (CENTURION, 1998). O solo foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico típico, textura argilosa, A moderado, caulínico-oxídico (LVef) (ANDRIOLI & CENTURION, 1999).

A composição granulométrica do solo foi determinada em amostras deformadas, na camada de 0-0,20 m, por meio da dispersão com NaOH (0,1 mol L⁻¹) e agitação lenta durante 16 horas, sendo o conteúdo de argila obtido pelo método da pipeta (GEE & BAUDER, 1986). A granulometria do solo apresentou valores médios de 550 g kg⁻¹ de argila, 240 g kg⁻¹ de silte, 110 g kg⁻¹ de areia fina e 100 g kg⁻¹ de areia grossa.

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, com parcelas subdivididas, sendo cada unidade experimental constituída de quatro linhas de 4,0 m, espaçadas em 0,5 m, considerando-se como área útil as duas linhas centrais, desprezando-se 0,5 m de cada extremidade, em esquema fatorial 4 x 2 (quatro níveis de compactação e duas camadas), com oito repetições e uma área de mata nativa (MN) adjacente foi empregada como referência, por se tratar de um sistema em equilíbrio, sem ação antrópica.

O solo foi adubado para obtenção da produtividade esperada de soja de 3,0-3,5 Mg ha⁻¹, segundo metodologia citada por RAIJ et al. (1996). Realizou-se aplicação de calcário, para elevação da saturação por bases a 60%, e uma gradagem aradora, para sua incorporação. Antes da instalação do experimento toda área foi escarificada a 0,30 m de profundidade, seguida de uma gradagem niveladora. Os tratamentos testados foram: C₀= 0; C₂= 2; C₄= 4 e C₆= 6 passadas, no mesmo local, de um trator de 11 Mg com dois eixos e quatro pneus de mesma largura (0,40 m) e pressão interna, uma ao lado da outra, na direção do declive da área, perfazendo toda a superfície. O conteúdo de água no solo durante a compactação esteve próximo à capacidade de campo (0,01 MPa).

No dia 15 de dezembro de 2009, foram semeadas as variedades de soja (FT-Cristalina e CAC-1), utilizando-se uma semeadora-adubadora regulada para sulcar a área perpendicularmente à compactação com espaçamento entrelinhas de 0,45 m e distribuir 0,17 Mg ha⁻¹ de adubo formulado 2-20-20.

As coletas de amostras indeformadas de solo, nas entrelinhas da cultura da soja para a estabilidade de agregados foram realizadas em janeiro de 2010, nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m com quatro repetições, com o auxílio de um enxadão. Os torrões foram secos ao ar, desmanchados manualmente tomando-se o cuidado para não destruir os agregados, e passados em peneira de 7,93 mm. Para cada amostra de 50 g foi determinada a distribuição de classes de agregados (7,93 – 4,0; 4,0 – 2,0; 2,0 – 1,0; 1,0 – 0,5; 0,5 – 0,25; <0,25 mm) analisadas por peneiramento a úmido, seguindo o método proposto por YOODER (1936), e agitação lenta por 15 minutos; transcorrido esse período, as porções retidas em cada peneira foram transferidas para latas de

alumínio com o auxílio de jatos de água, e secas em estufa a 105°C, por 24 h, para posterior pesagem. A partir dos valores dessas massas, foi calculada a porcentagem de agregados estáveis, o diâmetro médio ponderado (DMP) e o diâmetro médio geométrico (DMG) conforme o método descrito por KEMPER & CHEPIL (1965):

$$\text{DMP} = \sum (w_i * x_i)$$

$$\text{DMG} = \text{Exp} \left[\frac{\sum (w_i * \ln(x_i))}{\sum w_i} \right]$$

onde: w_i = massa de agregados da classe i , x_i = diâmetro médio da classe i e $\sum w_i$ = massa total de agregados.

As curvas de retenção de água foram ajustadas pelo modelo proposto por VAN GENUCHTEN (1980), a partir do qual foi determinada a declividade da reta tangente em seu ponto de inflexão, e conseqüentemente o índice “S”, como segue:

$$S = -n(\theta_{sat} - \theta_{res}) \left[1 + \frac{1}{m} \right]^{-(1+m)} \quad (1)$$

Onde n e m são parâmetros que governam o formato da curva; θ_{sat} e θ_{res} são a umidade na saturação e residual, respectivamente.

A determinação da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) do solo foi medida no campo empregando-se uma carga hidráulica (0,03 m de coluna de água), em maio de 2010, com cinco repetições, em local tomado aleatoriamente em cada tratamento, utilizando-se um permeâmetro tipo Guelph na profundidade de 0,20 m (REYNOLDS et al., 1992).

Os resultados obtidos do experimento foram submetidos à análise de variância pelo teste F, e as médias quando significativas foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com os resultados obtidos sobre a agregação do solo (Tabela 1), as variações na distribuição da massa de solo quanto ao diâmetro médio ponderado dos agregados estáveis em água (DMP) e o diâmetro médio geométrico (DMG) sob a mata nativa, esta, não apresentou diferença significativa no tratamento C₄, mostrando diferença estatística entre os demais sistemas de uso, camada 0-0,10 m, cuja MN não diferiu entre camadas. Esta relação entre a estabilidade de agregados e a intensidade de mobilização do solo gerada pelo sistema de manejo, condiz com os resultados de NIERO et al. (2010) que encontraram maiores valores para DMP nos manejos com menor revolvimento da superfície do solo. A área de mata nativa por se tratar de um sistema em equilíbrio sem ação antrópica influencia fortemente em maior agregação do solo, pois é resultante do acúmulo de matéria orgânica ao longo dos anos. Tais resultados corroboram com CAMPOS et al. (1995) que salientam o contínuo fornecimento de material orgânico, o qual serve como fonte de energia para a atividade microbiana, atua como agente de estabilização dos agregados e resultará na maior estabilidade dos agregados da mata nativa.

Verifica-se também o efeito físico das raízes das árvores nas áreas sob mata nativa que atuam na formação e no tamanho dos agregados do solo (SILVA et al., 1998). Os principais agentes responsáveis pela formação de agregados maiores são a matéria orgânica e o desenvolvimento de raízes, observados por BERTOL et al. (2000) e WOHLBERG et al. (2004) e que esta relação sempre ocorreram no campo natural e os menores valores de estabilidade de agregados no solo descoberto, devido ao intenso preparo do solo que reduziu o teor de matéria orgânica e aumentou a quantidade de agregados de menor tamanho. WENDLING et al. (2005) concluíram entre diferentes manejos, que a estabilidade de agregados em água é reduzida com o cultivo do solo, quando comparado aos valores anteriores ao desmatamento.

A estabilidade dos agregados está relacionada com a coesão entre as partículas do solo; assim, agregados maiores podem ser obtidos, em alguns casos, por ação de

forças de compressão e não pela ação biológica de raízes e microrganismos (CARPENEDO & MIELNICZUK, 1990).

Em relação aos tratamentos C₀, C₂ e C₆ os valores dos índices DMG e DMP foram semelhantes, os quais diferem do tratamento C₄ apenas na camada de 0-0,10 m. Entre profundidades, C₄ não apresentou diferenças estatisticamente, diferindo apenas na camada de 0-0,10 m em comparação aos demais tratamentos. Provavelmente a diferença observada na camada de 0-0,10 m no tratamento C₄ apresentou efeito da compactação, que causa compressão das partículas do solo, formando torrões, sem, entretanto, ocorrerem os mecanismos de formação e estabilização destes, que não apresentam qualidades positivas de um agregado (SILVA et al., 2000). A agregação mecânica que ocorre por efeito da tensão exercida pela compactação, levando à união de partículas sob alta umidade no solo, pode ser verificada pelo aumento na estabilidade de agregados; este processo foi detectado em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO argiloso, por SILVA et al. (2006).

No entanto, a MN apresentou elevados índices DMG e DMP que constaram agregados maiores e mais estáveis em comparação aos demais tratamentos, pois quanto maior for a percentagem de agregados grandes retidos nas peneiras com malhas maiores, maior é o DMP.

Tabela 1. Percentagem de agregados estáveis em água no LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico submetidos à mata nativa (MN), em quatro níveis de compactação e em duas camadas.

Camadas (m)	Classes de agregados (mm)						DMG	DMP
	7,93 a 4,00	4,00 a 2,00	2,00 a 1,00	1,00 a 0,50	0,05 a 0,25	< 0,25		
	(%)							
	<i>MN</i>							
0-0,10	98,99 Aa	0,28 Ca	0,15 Da	0,21 Ca	0,27 Ca	0,10 Da	5,85 Aa	5,92 Aa
0,10-0,20	95,74 Aa	1,81 Ba	0,87 Ca	0,69 Ba	0,62 Ba	0,29 Ba	5,59 Aa	5,79 Aa
	<i>C₀</i>							
0-0,10	25,35 Bb	14,66 Ba	16,54 Ca	20,03 Aa	15,79 Aa	7,62 Aa	1,44 Cb	2,42 Cb
0,10-0,20	43,94 Ba	17,45 Aa	16,08 ABa	10,79 Ab	8,14 Ab	3,61 Ab	2,42 Ba	3,50 Ba
	<i>C₂</i>							
0-0,10	23,42 Bb	17,04 Ba	19,64 Bca	19,84 Aa	14,07 Aa	6,00 ABa	1,51 Cb	2,42 Cb
0,10-0,20	36,30 Ba	17,60 Aa	19,55 Aa	13,00 Ab	9,35 Ab	4,21 Ab	2,08 Ba	3,13 Ba
	<i>C₄</i>							
0-0,10	31,95 Bb	21,47 Aa	20,17 ABa	14,11 Ba	8,75 Ba	3,56 Ca	2,08 Ba	3,00 Ba
0,10-0,20	40,22 Ba	15,85 Ab	17,12 ABb	12,63 Aa	9,84 Aa	4,35 Aa	2,15 Ba	3,27 Ba
	<i>C₆</i>							
0-0,10	23,40 Bb	21,84 Aa	23,53 Aa	17,43 ABa	9,98 Ba	3,83 BCa	1,74 BCb	2,58 BCb
0,10-0,20	47,46 Ba	15,66 Ab	15,11 Bb	11,05 Ab	7,57 Aa	3,15 Aa	2,54 Ba	3,64 Ba
<i>C.V. (%)</i> *	18,25	19,45	12,81	30,55	34,92	43,11	13,67	12,02
<i>C.V. (%)</i> **	16,37	22,3	19,72	25,52	28,58	43,74	11,31	10,44

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na linha, e minúscula, na coluna, não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). C_0 = solo não trafegado; C_2 = duas passadas; C_4 = quatro passadas e C_6 = seis passadas de trator de 11 Mg.

* nível de compactação e ** camadas.

Para a camada de 0,10-0,20 m não se obteve diferença entre os tratamentos compactados para o valor de DMP, conforme observado por BERGAMIN et al. (2010), visto que o maior estado de compactação seja verificado próximo a 0,10 m de profundidade (GENRO JUNIOR et al., 2004).

A análise de variância para efeito de tratamentos na condutividade hidráulica saturada na profundidade de 0,10 m revela que houve redução significativa do fluxo de água nos solos das áreas sob soja em relação à área sob mata natural (Figura 1). Verificou-se que a condutividade hidráulica não constatou diferença estatística entre os tratamentos compactados. Resultados semelhantes foram encontrados por SILVA (1996) e BEUTLER et al. (2003). Estes resultados podem ser consequência da redução da macroporosidade, por apresentar grande efeito sobre a velocidade de infiltração de água, bem como sobre o desenvolvimento radicular das plantas, por exibir ao solo

condições de baixa aeração, principalmente em solos argilosos (CINTRA et al., 1983); além da relação com o aumento da microporosidade causado pela destruição dos agregados nas áreas compactadas, segundo CARVALHO (2002), a condutividade hidráulica do solo na condição saturada é mais dependente da estrutura do que da textura do solo, onde o efeito da estrutura, torna possível que um solo argiloso possa expor valores de condutividade hidráulica semelhantes aos solos arenosos. O efeito da compactação, para STONE et al. (2002), na redução do tamanho dos poros, que efetivamente transportam água, explica a redução da condutividade hidráulica com o aumento da densidade do solo, por ser altamente relacionada com raio médio ponderado para o fluxo reduzindo o seu valor, de forma acentuada, com a redução do tamanho dos poros.

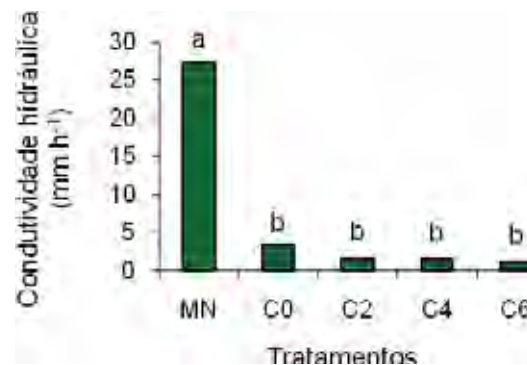


Figura 1. Condutividade hidráulica de um LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico submetido a quatro tratamentos e Mata Nativa até 0,10 m de profundidade. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) (CV= 64,25%).

A partir dos parâmetros estabelecidos pelas curvas de retenção de água (Figura 2), foram obtidos os valores de índice “S”.

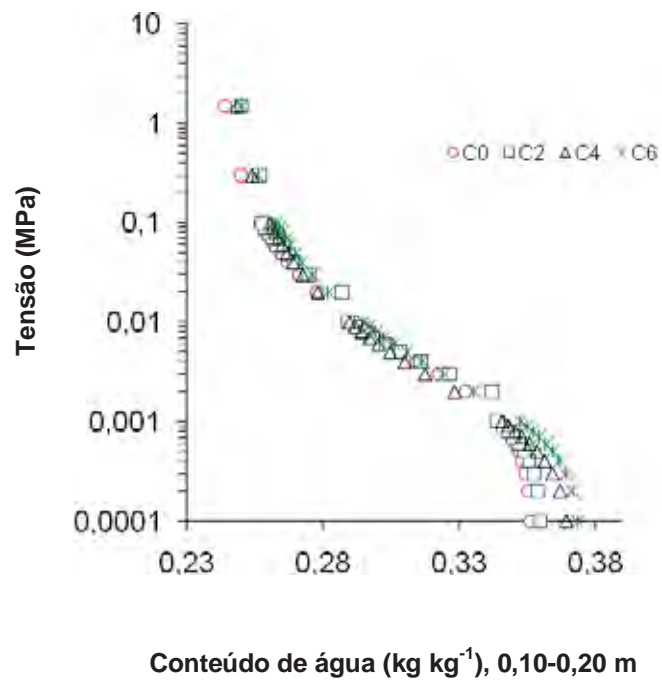
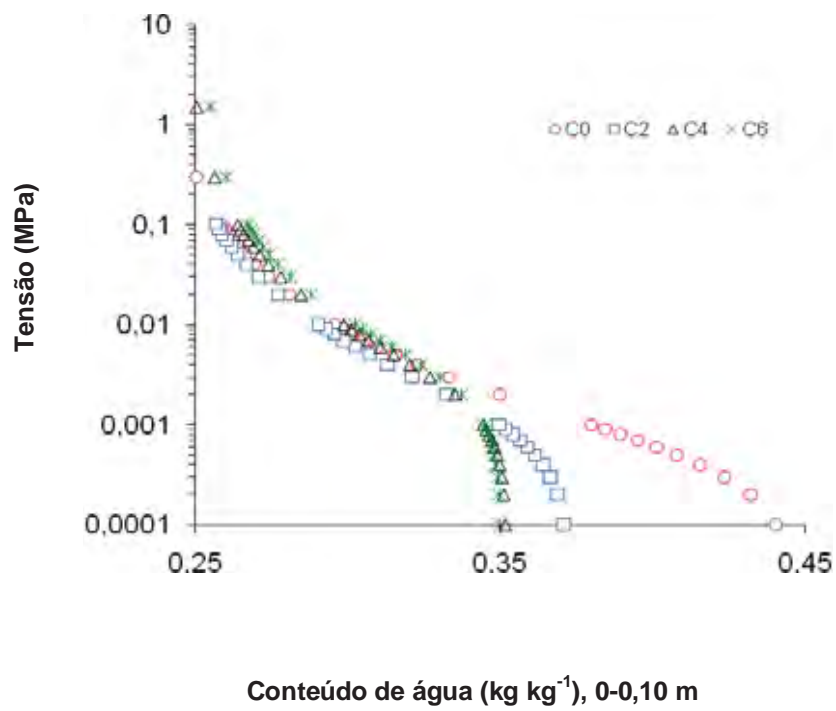


Figura 2. Curvas de retenção de água ajustados pelo modelo proposto por van Genuchten (1980).

O parâmetro físico “S” avalia a distribuição do tamanho dos poros e a qualidade física do solo para o crescimento das plantas, cujo valor indica a inclinação da curva de retenção de água. Nos tratamentos estudados foi obtido o valor de “S” de 0,036 no nível sem compactação (C_0), proporcionando condições físicas favoráveis ao desenvolvimento radicular, contudo observa-se que com duas passadas do trator de 11 Mg foi suficiente para reduzir o valor do índice “S” para 0,028. Nos tratamentos C_4 e C_6 , este valor foi reduzido para 0,026 o qual está abaixo do preconizado por DEXTER (2004 a) de “S” < 0,035 como limitante para um solo com estrutura física degradada (Tabela 2), resultados semelhantes foram encontrados por SILVA et al. (2008) cujos resultados obtidos foram menores que 0,035. A redução de “S” nos níveis compactados pode estar associada a uma diminuição do pico da distribuição de frequência de poros, resultando em um “achatamento” vertical da curva de retenção de água, pela redução dos poros estruturais (DEXTER, 2004 a). Sob sistemas de plantio direto e preparo convencional, em um Latossolo Vermelho, na linha e na entrelinha da cultura do milho, TORMENA et al. (2008) avaliando o índice “S”, verificaram maiores valores desse índice sob plantio direto e na linha de plantio, que por sua vez concluíram que o valor de “S” diminuiu com o aumento da densidade do solo, e que associado à sua compactação, houve redução da qualidade física do solo. Pode-se concluir que esta perda da qualidade física em razão do tráfego de tratores ocorreu, principalmente, pela redução da macroporosidade, concordando com os resultados de ARGENTON et al. (2005).

Na mata nativa o valor de “S” foi de 0,088, podendo-se, dessa forma, afirmar que esse solo possui boa qualidade física. Segundo CARVALHO FILHO et al. (2009), um LATOSSOLO VERMELHO Férrico, em sistema de uso com pastagem, obteve o menor valor do parâmetro “S” de 0,063, isso porque esse solo é altamente intemperizado e apresenta elevados teores de óxidos de Fe e Al que conferem melhor estrutura e porosidade a esse solo, conforme verificado por FERREIRA et al. (1999). Dessa forma, para esse tipo de solo o valor do índice “S” considerado crítico ao crescimento das plantas, é superior a 0,035.

Tabela 2. Valores do índice “S” para os níveis de compactação e as camadas do LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico

Tratamentos	“S”
Compactação (A)	
C ₀ ⁽²⁾	0,036 b ⁽¹⁾
C ₂	0,028 c
C ₄	0,026 c
C ₆	0,026 c
Mata	0,088 a
F	295,25**
Camadas (B)	
0-0,10 m	0,041 a
0,10-0,20 m	0,040 a
F	0,42 ^{NS}
Teste F (A x B)	9,90**
CV (%)	13,12

⁽¹⁾Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) de probabilidade.

⁽²⁾C₀= solo não trafegado; C₂= duas passadas; C₄= quatro passadas e C₆= seis passadas de trator de 11 Mg.

Com o solo não trafegado, Tabela 3, o índice “S” na camada de 0-0,10 m foi superior ao valor de 0,035, o que diferiu dos demais tratamentos. A camada de 0,10-0,20 m, os valores foram inferiores, porém, não diferiram entre si. A mata nativa apresentou valores elevados e obteve diferenças quando comparados aos demais tratamentos, para as duas camadas analisadas, e ainda, seu índice “S” foi superior na camada de 0,10-0,20 m, quando comparado com a camada de 0-0,10 m. PEREIRA et al. (2011) trabalhando com LATOSSOLO VERMELHO Distrófico em semeadura convencional obtiveram maior valor de índice “S” na camada de 0-0,05 m, devido ao aumento de poros de maior diâmetro, por meio do revolvimento do solo, o que não ocorreu na camada inferior.

Tabela 3. Valores do índice “S”, na interação de compactação dentro de camadas.

Compactação (A)	Camadas (B)		F
	0-0,10 m	0,10-0,20 m	
C ₀ ⁽²⁾	0,044 Ba ⁽¹⁾	0,027 Bb	30,84**
C ₂	0,029 Ca	0,027 Ba	0,19 ^{NS}
C ₄	0,025 Ca	0,028 Ba	0,57 ^{NS}
C ₆	0,025 Ca	0,028 Ba	1,16 ^{NS}
Mata	0,084 Ab	0,092 Aa	7,27**
F	130,78**	174,37**	

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ⁽²⁾C₀= solo não trafegado; C₂= duas passadas; C₄= quatro passadas e C₆= seis passadas de trator de 11 Mg.

CONCLUSÕES

1. A mata nativa apresentou elevados valores dos índices, diâmetro médio geométrico e diâmetro médio ponderado possuindo agregados maiores e mais estáveis. Os tratamentos C₀, C₂ e C₆, zero, duas e seis passadas de trator, camada 0-0,10 m, apresentaram diferença estatisticamente em relação ao tratamento C₄.
2. A condutividade hidráulica saturada revela que houve redução significativa do fluxo de água nos solos das áreas sob soja em relação à área sob mata natural.
3. Foi obtido o valor de “S” de 0,036 no nível sem compactação (C₀) e redução nos níveis mais compactados para 0,026, entretanto, apesar da mineralogia oxidica do LATOSSOLO VERMELHO a compactação reduziu o valor de “S”, o qual atingiu o valor limitante (< 0,035).

CAPÍTULO 4 – RELAÇÃO ENTRE A COMPACTAÇÃO DO SOLO E O SISTEMA RADICULAR NA PRODUTIVIDADE DA SOJA

RESUMO - A redução da produtividade das culturas e da sustentabilidade dos solos agrícolas pode ser ocasionada pela compactação do solo, alterando a densidade e porosidade do solo, os quais irão interferir no crescimento radicular. Este estudo objetivou avaliar os efeitos de compactação do solo em vasos preenchidos com LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico, textura argilosa, cultivado com soja, no Câmpus Jaboticabal/SP. O efeito da compactação do solo em vasos com capacidade de 9,82 L (0,20 m de altura e 0,25 m de diâmetro), correspondeu a 0 (C₀), 2 (C₂), 4 (C₄) e 6 (C₆) níveis de compactação que foram caracterizados pela densidade do solo de 1,00; 1,15; 1,30 e 1,45 Mg m⁻³. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, combinando-se tratamentos com três níveis de compactação mais um com solo não compactado, com três repetições, e mais duas repetições que foram utilizadas apenas para avaliações físicas do solo. Foram coletadas amostras indeformadas do solo com seis repetições em cada nível de compactação, com cilindros de 53,16 cm³ na camada de 0,02-0,05 m, visando quantificar a macroporosidade, a microporosidade, a densidade do solo e a resistência do solo à penetração. Os níveis de compactação analisados possivelmente não restringiram a produtividade da cultura, por apresentar valores dos atributos físicos abaixo dos considerados como crítico ao desenvolvimento da planta.

Termos para indexação: casa de vegetação, conteúdos de água, atributos físicos do solo.

INTRODUÇÃO

Nos atuais sistemas de produção agrícola, a utilização intensiva do solo, tem resultado em compactação, o qual prejudica a qualidade física do solo, bem como a produtividade das culturas, além de alterar a profundidade das raízes, a ramificação e sua distribuição no solo (COLLARES et al., 2008; BEUTLER et al., 2008). Em relação ao valor crítico à produção, a tolerância das plantas à compactação diverge entre culturas (BEUTLER et al., 2004), porém entre cultivares são observadas apenas algumas alterações nos componentes de desenvolvimento, como do crescimento radicular e da parte aérea (FOLONI et al., 2003). Em consequência da compactação, há aumento da resistência mecânica do solo e redução da porosidade, da permeabilidade e da disponibilidade de nutrientes e água, reduzindo o crescimento e o desenvolvimento radicular das culturas (STRECK et al., 2004).

Tanto em casa de vegetação (ROSOLEM et al., 1994) como no campo (SILVA et al., 2000 a), as raízes apresentam dificuldades em penetrar nas camadas compactadas, e como forma de compensar a redução do desenvolvimento radicular na camada de solo compactada, promove maior desenvolvimento radicular na camada superior ou inferior menos compactada. Para avaliar a compactação do solo são utilizados alguns atributos físicos como a porosidade, a resistência do solo à penetração (RP) e a densidade do solo (Ds). No entanto, para CAMARGO & ALLEONI (1997) a Ds tem sido um atributo indicado e muito utilizado, por ser uma medida quantitativa com razoável sensibilidade e de fácil determinação. O aumento na compactação e conseqüentemente na RP reduzem o crescimento de raízes, podendo ocasionar perdas de produtividade, por restringir o reservatório de água e nutrientes às raízes (CLARK et al., 2003). A RP está relacionada à umidade do solo e aumenta na medida em que o teor de água diminui (COLLARES et al., 2008).

FOLONI et al. (2003), em trabalho realizado em casa de vegetação, observaram que o crescimento radicular do milho, em LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico de textura média, foi prejudicado em 50% quando a RP foi de 0,75 MPa e totalmente inibido quando ela chegou a 1,4 MPa. Utilizando este mesmo solo com o mesmo

sistema de cultivo, porém com a cultura da soja, BEUTLER et al. (2004) verificaram que a produção de soja, cultivar Embrapa 48, decresceu a partir da D_s de $1,37 \text{ Mg m}^{-3}$. Em geral, são considerados críticos os valores de D_s a partir de $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$, para solos de textura franco-argilosa (média) (CAMARGO & ALLEONI, 1997; REICHERT et al., 2002).

O objetivo da pesquisa foi avaliar os efeitos de quatro níveis de compactação em vasos preenchidos com LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico, por meio de atributos físicos e suas consequências sobre o sistema radicular e a produtividade de duas cultivares de soja.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na primavera/verão 2009/2010, em casa de vegetação na área da Universidade Estadual Paulista (UNESP/FCAV) Jaboticabal (SP). Foram utilizadas amostras de LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico típico, textura argilosa, A moderado, caulínítico-oxídico (LVef), coletadas na camada de 0-0,20 m e passadas em peneira de 0,004 m. A composição granulométrica foi determinada em amostras deformadas por meio da dispersão com NaOH ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$) e agitação lenta durante 16 horas, sendo o conteúdo de argila obtido pelo método da pipeta (GEE & BAUDER, 1986). Foram efetuadas calagem e adubação com base nos resultados de análises químicas, segundo RAIJ et al. (1996), realizada, conforme metodologia proposta por RAIJ et al. (1987). Efetuada a adubação, foram ajustados os conteúdos de água correspondentes aos conteúdos de água retida nas tensões de 0,001 MPa, 0,01 MPa e 0,05 MPa, respectivamente, os quais foram determinados previamente em câmaras de Richards, em amostras indeformadas (KLUTE, 1986).

A operação de ajuste dos conteúdos predeterminados consiste na adição de água ou secagem do solo quando muito úmido, até atingir o conteúdo de água pré-estabelecido, sendo, posteriormente, o solo coberto com lona plástica para evitar alteração no conteúdo de água do solo. Em seguida, o solo foi colocado em vaso cilíndrico de PVC com capacidade de 9,82 L (0,20 m de altura e 0,25 m de diâmetro) e homoganeamente compactado através da queda livre de êmbolo de 7,0 kg, da altura de

0,60 m, no centro geométrico de um suporte de madeira com diâmetro ligeiramente inferior ao vaso (Figura 1), conforme descrito em BEUTLER (2003), sendo valores superiores de compactação obtidos por meio de maior número de impactos em cada camada. Os níveis de compactação corresponderam às densidades previamente obtidas em experimento de campo, com pequenos ajustes ($C_0 = 1,00 \text{ Mg m}^{-3}$; $C_2 = 1,15 \text{ Mg m}^{-3}$; $C_4 = 1,30 \text{ Mg m}^{-3}$ e $C_6 = 1,45 \text{ Mg m}^{-3}$).

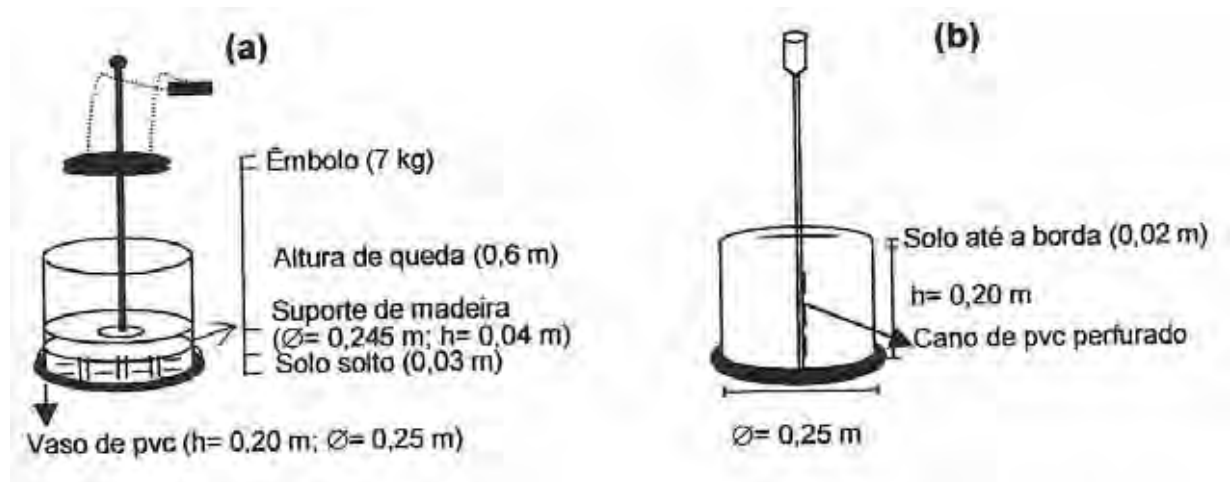


Figura 1. Esquema da compactação do solo no vaso (a) e vaso utilizado para o cultivo da soja (b).

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, combinando-se tratamentos com quatro níveis de compactação e três conteúdos de água no solo para as duas variedades (FT-Cristalina e CAC-1), constituindo o esquema fatorial 4×3 , com três repetições, e mais duas repetições que foram utilizadas apenas para avaliações físicas do solo. O efeito da compactação do solo nos vasos correspondeu à compactação de campo, conforme os seguintes tratamentos 0 (C_0), 2 (C_2), 4 (C_4) e 6 (C_6) passadas de um trator de 11 Mg.

Após a compactação foi efetuada a semeadura da soja em 04 de dezembro de 2009. Quinze dias após a semeadura, em 19 de dezembro de 2009, foram aplicados os níveis de irrigação correspondentes às tensões de 0,001, 0,01 e 0,05 MPa. Foi realizado o desbaste, ajustando-se a população para três plantas/vaso. O conteúdo de

água foi constante pela leitura diária dos tensiômetros e a reposição de água feita através de tubo de PVC perfurado (BEUTLER et al., 2003), instalado no centro geométrico do vaso.

Após a semeadura, foram coletadas seis amostras indeformadas por tratamento, em vasos não utilizados para o cultivo, com cilindros de 53,16 cm³ na camada de 0,02-0,05 m, visando quantificar os atributos do solo; foram avaliadas a microporosidade, por secagem (tensão de 0,006 MPa), em câmaras de pressão de Richards com placa porosa (KLUTE, 1986); a porosidade total segundo DANIELSON & SUTHERLAND (1986), a macroporosidade, obtida pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade, e a resistência do solo à penetração, assim como avaliado no experimento de campo. As avaliações do sistema radicular também foram realizadas (lavando as raízes de cada vaso, 3 plantas/vaso, e feitas imagens em “scanner”). Para obtenção por planta da produtividade da soja foram avaliados a altura de plantas, número de vagens, altura de inserção da primeira vagem e massa de 100 grãos.

As imagens das raízes foram digitalizadas em um scanner de leitura ótica, na resolução de 400 dpi, fornecendo a área (mm²), o diâmetro médio (mm) e o comprimento das raízes (mm) pelo software Delta-T Scan; a densidade do comprimento radicular (cm cm⁻³) foi determinada por meio da divisão do comprimento radicular pelo volume de solo coletado. Na sequência, as amostras foram secas em estufa a 65 °C até massa constante, para determinação da massa de matéria seca das raízes por amostra (mg), que foi dividida pelo volume de solo coletado, obtendo-se a massa de matéria seca das raízes por volume de solo (mg cm⁻³).

Os resultados obtidos do experimento foram submetidos à análise de variância pelo teste F, e as médias quando significativas foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 verifica que a macroporosidade nos tratamentos C₂ e C₄ não apresentaram diferenças estatísticas com relação ao tratamento C₀. O aumento do número de passadas do trator proporcionou a redução da macroporosidade e o aumento de microporos e da densidade. Nesta mesma camada de 0,02-0,05 m LEONEL et al. (2007) trabalhando com LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, obtiveram o valor da macroporosidade com maior alteração, de 0,26 para 0,09 m³ m⁻³. A microporosidade foi menor para o tratamento C₀ diferindo estatisticamente dos demais tratamentos cujos valores foram superiores, corroborando com os resultados de campo de LEONEL et al. (2007) e SECCO et al. (2004).

Solos mal estruturados prejudicam o desenvolvimento radicular. No entanto, para o crescimento e desenvolvimento satisfatórios das plantas os solos devem possuir macroporosidade mínima de 10% segundo SECCO et al. (2004). Assim, pelos resultados obtidos, os níveis de compactação analisados são favoráveis ao arejamento do solo, cujos macroporos não desapareceram no processo de compactação, os quais possivelmente não irão restringir a produtividade.

Os valores de densidade encontrados no trabalho provavelmente não prejudicaram a produção, pois, estão abaixo do preconizado por BEUTLER et al. (2004) que encontraram valores superiores a 1,37 Mg m⁻³, em casa de vegetação, com o LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, como valor limitante à produção de soja, a partir do qual a produção de soja variedade Embrapa 48 decresceu, no conteúdo de água retido na tensão de 0,01 MPa. Já CENTURION et al. (2006) trabalhando com o mesmo solo em casa de vegetação mas com as variedades MG/BR 46 (Conquista) e IAC-8 não obtiveram restrição da produção de grãos até a densidade de 1,60 Mg m⁻³, no entanto, a maior tolerância destas variedades pode ser atribuída principalmente a condução da cultura em condições de menor temperatura. Segundo esses autores, houve reposição de menor quantidade diária de água, e o solo permaneceu com o conteúdo de água adequado por maior período, já que esse solo apresenta uma estrutura maciça pouco porosa, que dificulta a rápida movimentação de água através do perfil, minimizando os

efeitos prejudiciais da compactação do solo além de aumentar a tolerância à compactação.

O tratamento C₆ apresentou maior resistência do solo à penetração de 0,60 Mpa (Tabela 1) quando comparado aos demais tratamentos, que por sua vez, não diferiram entre si, entretanto, esse valor ainda é inferior ao encontrado por FOLONI et al. (2003) que trabalhando em LATOSSOLO VERMELHO Distroférico em casa de vegetação com a cultura do milho verificaram que o crescimento radicular desta cultura foi prejudicado em 50% quando a RP foi de 0,75 MPa. Com espaço poroso suficiente para o movimento de água e gases, grande área de contato solo/raiz, e baixa RP é a estrutura ideal ao desenvolvimento das plantas (KOPI & DOUGLAS, 1991). DEXTER (1987) verificou que em baixos conteúdos de água no solo, valores de resistência do solo à penetração de 1,0 MPa podem restringir o crescimento radicular, e que em valores de RP superiores a 4,0 MPa, em solos mais úmidos, já pode haver crescimento radicular.

Tabela 1. Atributos físicos do LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico nos quatro níveis de compactação.

Atributos físicos do solo				
Tratamentos	Macroporos (m ³ m ⁻³)	Microporos (m ³ m ⁻³)	Densidade do solo (Mg m ⁻³)	Resistência do solo à penetração (MPa)
C ₀ ⁽²⁾	0,26 ab ⁽¹⁾	0,29 d	0,92 d	0,27 b
C ₂	0,29 a	0,32 c	1,01 c	0,27 b
C ₄	0,23 b	0,35 b	1,12 b	0,31 b
C ₆	0,15 c	0,39 a	1,28 a	0,60 a
CV (%)	10,50	4,31	4,12	15,82

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05).

⁽²⁾C₀= solo não trafegado; C₂= duas passadas; C₄= quatro passadas e C₆= seis passadas de trator de 11 Mg.

De acordo com os resultados estatísticos dos dados analisados através de leitura de raiz em scanner, verificou-se diferenças estatísticas significativas entre níveis de compactação para comprimento e densidade de comprimento em ambas variedades testadas, para área houve diferença estatística significativa apenas para a variedade CAC-1 e com relação ao diâmetro, massa seca e densidade de massa de raiz a diferença ocorreu para a variedade FT-Cristalina. O nível correspondente à C₂ promoveu maior desenvolvimento radicular (Tabelas 2 e 3), pois, a partir do aumento da compactação ocorreu redução no seu desenvolvimento. Assim, a compactação do solo pode promover o engrossamento das raízes, em função de mudanças morfológicas e fisiológicas do sistema radicular (MATERECHERA et al., 1992). FREDDI, 2007 também constatou incrementos no crescimento radicular com o aumento da compactação do solo.

FREDDI et al. (2009) verificaram que com uma passada do trator de 6 Mg, houve aumento do diâmetro e densidade das raízes e a partir do tratamento com duas passadas do trator de 6 Mg, verificou-se diminuição do volume de raízes e aumento do seu diâmetro. Segundo BENGOUGH et al. (1997) a compactação diminui o comprimento e o desenvolvimento radicular das plantas de soja, que por sua vez diminui a área explorada pelas raízes, entretanto, pelos resultados obtidos, as variedades CAC-1 e FT-Cristalina diminuíram o comprimento de raízes a medida que aumentou a compactação e conseqüentemente reduziu a área explorada pelas raízes.

Tanto CAC-1 quanto FT-Cristalina (Tabelas 2 e 3), não foram influenciadas pelos níveis de irrigação a que foram submetidas, no que se refere ao diâmetro. Apenas a variedade FT-Cristalina apresentou diferenças estatísticas significativas entre níveis de irrigação para área, comprimento, densidade de comprimento radicular, massa seca e densidade de massa seca de raiz, cujo tratamento de irrigação na tensão intermediária de água (0,01 MPa) apresentou semelhança estatisticamente com o nível 0,001 MPa, cujo desenvolvimento radicular foi maior, que diferiu significativamente do menor nível de irrigação (0,05 MPa), cujo resultado foi semelhante ao de BEUTLER & CENTURION (2003) em que a produção de matéria seca da parte aérea, das raízes e de grãos de

soja em LATOSSOLO VERMELHO Distrófico e Eutrófico foi maior na tensão de 0,01 MPa, comparado a 0,05 MPa.

Tabela 2. Área (mm²), diâmetro (mm), comprimento (mm) e densidade (cm cm⁻³) de comprimento de raízes, massa seca de raízes (mg) e densidade de massa seca de raiz (mg cm⁻³), variedade de soja CAC-1 cultivada em casa de vegetação na primavera/verão 2009/2010.

Tratamentos	Área (mm ²) ⁽¹⁾	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Densidade de comprimento radicular (cm cm ⁻³)	Massa seca (mg)	Densidade de massa seca de raiz (mg cm ⁻³)
Compactação (A)						
C₀ ⁽³⁾	96369,30 ab ⁽²⁾	5,64 a	23578,82 ab	2,40 ab	2763,36 a	0,28 a
C₂	102527,74 a	6,35 a	29415,62 a	3,00 a	3300,58 a	0,34 a
C₄	56078,16 ab	4,24 a	17305,80 ab	1,76 ab	2831,60 a	0,29 a
C₆	42082,65 b	3,83 a	11982,07 b	1,22 b	1716,57 a	0,17 a
F	4,31*	2,70 ^{NS}	4,02*	4,02*	2,03 ^{NS}	2,03 ^{NS}
Irrigação (B)						
0,001 MPa	79450,98 a	5,58 a	22042,83 a	2,24 a	3151,77 a	0,32 a
0,01 MPa	64526,10 a	4,57 a	18280,98 a	1,86 a	2296,06 a	0,23 a
0,05 MPa	78816,31 a	4,89 a	21387,93 a	2,18 a	2511,25 a	0,26 a
F	0,46 ^{NS}	0,68 ^{NS}	0,38 ^{NS}	0,38 ^{NS}	1,20 ^{NS}	1,20 ^{NS}
Teste F (A x B)	0,87 ^{NS}	0,27 ^{NS}	0,73 ^{NS}	0,73 ^{NS}	0,23 ^{NS}	0,23 ^{NS}
CV (%)	57,84	43,03	55,00	55,00	53,11	53,11

⁽¹⁾Leituras das raízes realizadas em "scanner" Delta T de amostras de raízes retiradas de cada parcela (vaso de 9,82 L).

⁽²⁾Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

⁽³⁾C₀= 1,00 Mg m⁻³; C₂= 1,15 Mg m⁻³; C₄= 1,30 Mg m⁻³ e C₆= 1,45 Mg m⁻³.

Tabela 3. Área (mm²), diâmetro (mm), comprimento (mm) e densidade (cm cm⁻³) de comprimento de raízes, massa seca de raízes (mg) e densidade de massa seca de raiz (mg cm⁻³), variedade de soja FT-Cristalina cultivada em casa de vegetação na primavera/verão 2009/2010.

Tratamentos	Área (mm ²) ⁽¹⁾	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Densidade de comprimento radicular (cm cm ⁻³)	Massa seca (mg)	Densidade de massa seca de raiz (mg cm ⁻³)
Compactação (A)						
C ₀ ⁽³⁾	81105,08 a ⁽²⁾	6,79 b	23146,52 b	2,36 b	3320,72 b	0,34 b
C ₂	151474,47 a	13,79 a	44568,14 a	4,54 a	6836,51 a	0,70 a
C ₄	101157,15 a	7,89 ab	30487,37 ab	3,10 ab	4779,80 ab	0,49 ab
C ₆	87402,96 a	6,21 b	24391,49 b	2,48 b	3872,96 b	0,39 b
F	2,86 ^{NS}	4,02*	4,86**	4,86**	5,19**	5,19**
Irrigação (B)						
0,001 MPa	118334,78 ab	10,40 a	32542,27 ab	3,31 ab	4835,37 ab	0,49 ab
0,01 MPa	134038,38 a	10,06 a	38436,01 a	3,91 a	5807,12 a	0,59 a
0,05 MPa	63481,58 b	5,55 a	20966,85 b	2,14 b	3465,01 b	0,35 b
F	5,13**	3,23 ^{NS}	5,31*	5,31*	4,02*	4,02*
Teste F (A x B)						
	1,21 ^{NS}	1,41 ^{NS}	0,62 ^{NS}	0,62 ^{NS}	0,46 ^{NS}	0,46 ^{NS}
CV (%)	53,80	60,11	43,61	43,61	43,25	43,25

⁽¹⁾Leituras das raízes realizadas em "scanner" Delta T de amostras de raízes retiradas de cada parcela (vaso de 9,82 L).

⁽²⁾Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

⁽³⁾C₀= 1,00 Mg m⁻³; C₂= 1,15 Mg m⁻³; C₄= 1,30 Mg m⁻³ e C₆= 1,45 Mg m⁻³.

Nas Tabelas 4 e 5, podem-se observar que as variedades analisadas não foram influenciadas pelos níveis de compactação a que foram submetidas, corroborando os resultados de CENTURION et al. (2006) que não encontraram interação entre a compactação e as cultivares, trabalhando em casa de vegetação com as variedades IAC-8 e MG/BR 46.

Na maior tensão de água (0,001 MPa) a variedade CAC-1 foi influenciada, obtendo maior altura de plantas, a qual diferiu estatisticamente da menor tensão de água (0,05 MPa), bem como apresentou maior número de vagens. Resultados semelhantes foram encontrados por BEUTLER et al. (2004) visto que a maior tolerância da soja à compactação foi verificada em maior conteúdo de água. Seguindo este conceito NOVAIS & SMYTH (1999) relatam que em condições adequadas de água no solo, ocorre maior disponibilidade de água e nutrientes na solução do solo, por diminuir a interação dos íons com os colóides do solo. TARDIEU (1994) também verificou que,

em solos compactados, ocorre rápida diminuição de água nos poros ocupados pelas raízes, que aumenta a resistência ao fluxo de água em direção às raízes.

BEUTLER & CENTURION (2004) verificaram que o menor teor de água (0,05 MPa) no LATOSSOLO VERMELHO Distrófico não afetou a altura de plantas com uma resistência do solo à penetração de 3,76 MPa, já com a RP de 3,37 MPa, no LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico, restringiu a altura das plantas. Em solo argiloso e com menor teor de água, em relação ao solo arenoso, RIBEIRO (1999) verificou que a compactação do solo é mais prejudicial ao crescimento das plantas de soja.

Tabela 4- Altura de plantas (cm), altura de inserção da primeira vagem (cm), número de vagens e peso de 100 grãos (g), variedade CAC-1, cultivada sob diferentes manejos, em casa de vegetação, na primavera/verão 2009/2010.

Tratamentos	Altura de plantas (cm)	Altura de inserção de 1ª vagem (cm)	Número de vagens	Peso 100 grãos (g)
Compactação (A)				
C ₀ ⁽²⁾	112,33 a ⁽¹⁾	33,35 a	12,41 a	13,51 a
C ₂	105,76 a	29,09 a	12,52 a	13,62 a
C ₄	108,35 a	35,28 a	11,85 a	14,06 a
C ₆	107,37 a	31,78 a	12,33 a	12,62 a
F	0,33 ^{NS}	1,06 ^{NS}	0,22 ^{NS}	0,87 ^{NS}
Irrigação (B)				
0,001 MPa	117,63 a	34,43 a	13,97 a	13,15 a
0,01 MPa	110,85 ab	34,28 a	11,94 b	13,94 a
0,05 MPa	96,88 b	28,42 a	10,92 b	13,27 a
F	6,27**	2,42 ^{NS}	8,36**	0,58 ^{NS}
Teste F (A x B)	0,11 ^{NS}	0,69 ^{NS}	0,89 ^{NS}	0,36 ^{NS}
CV (%)	13,49	23,56	15,17	14,42

⁽¹⁾Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ⁽²⁾C₀= 1,00 Mg m⁻³; C₂= 1,15 Mg m⁻³; C₄= 1,30 Mg m⁻³ e C₆= 1,45 Mg m⁻³.

Tabela 5- Altura de plantas (cm), altura de inserção da primeira vagem (cm), número de vagens e peso de 100 grãos (g), variedade FT-Cristalina, cultivada sob diferentes manejos, em casa de vegetação, na primavera/verão 2009/2010.

Tratamentos	Altura de plantas (cm)	Altura de inserção de 1ª vagem (cm)	Número de vagens	Peso 100 grãos (g)
Compactação (A)				
C ₀ ⁽²⁾	115,54 a ⁽¹⁾	35,13 a	16,67 a	11,95 a
C ₂	113,67 a	40,22 a	16,19 a	11,27 a
C ₄	113,91 a	37,67 a	15,59 a	10,39 a
C ₆	113,48 a	41,17 a	16,48 a	10,96 a
F	0,03 ^{NS}	0,60 ^{NS}	0,18 ^{NS}	1,13 ^{NS}
Irrigação (B)				
0,001 MPa	113,04 a	35,78 a	17,89 a	11,39 a
0,01 MPa	114,41 a	41,36 a	15,22 a	11,02 a
0,05 MPa	115,00 a	38,50 a	15,58 a	11,02 a
F	0,05 ^{NS}	0,85 ^{NS}	2,27 ^{NS}	0,17 ^{NS}
Teste F (A x B)	0,27 ^{NS}	0,07 ^{NS}	1,23 ^{NS}	0,62 ^{NS}
CV (%)	13,94	27,20	20,50	16,47

⁽¹⁾Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

⁽²⁾C₀= 1,00 Mg m⁻³; C₂= 1,15 Mg m⁻³; C₄= 1,30 Mg m⁻³ e C₆= 1,45 Mg m⁻³.

CONCLUSÕES

1. A resistência do solo à penetração não diferiu estatisticamente nos primeiros níveis de compactação (C₀; C₂ e C₄) constatando diferença apenas no nível mais compactado (C₆), cujo valor ainda é inferior ao prejudicial à cultura, apresentando boa estrutura ao desenvolvimento das plantas.
2. As variedades CAC-1 e FT-Cristalina diminuíram o comprimento de raízes à medida que aumentou a compactação e conseqüentemente reduziu a área explorada pelas raízes. Para a variedade FT-Cristalina tanto a irrigação quanto a compactação não afetaram os parâmetros de produção. A variedade CAC-1 foi mais sensível ao conteúdo de água em relação à compactação.

REFERÊNCIAS

AGRIANUAL 2011: **Anuário da agricultura brasileira**. São Paulo, FNP Consultoria e Comércio, 2011. p. 419-450.

ALBUQUERQUE, P.E.P.; RESENDE, M.; SANTOS, N.C. Efeito do manejo da irrigação por aspersão sobre a emergência de milho em diferentes solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.953-961, 1999.

ANDRIOLI, I.; CENTURION, J.F. Levantamento detalhado dos solos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 27., Brasília, 1999. **Anais**. Brasília, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999. p.1-4 CD-ROM.

ARATANI, R.G.; FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; ANDRIOLI, I. Qualidade física de um Latossolo Vermelho acriférico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, p.677-687, 2009.

ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p.425-435, 2005.

ARVIDSSON, J.; HÅKANSSON, I. A Model for estimating crop yield losses caused by soil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.20, p.319-332, 1991.

BAILEY, A.C.; JOHNSON, C.E.; SCHAFER, R.L. A model for agricultural soil compaction. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.33, p.257-262, 1986.

BARBER, R.G. Persistence of loosened horizons and soybean yield increases in Bolivia. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, p.943-950, 1994.

BASSOI, L.H.; FANTE JÚNIOR, L.; JORGE, L.A.C.; CRESTANA, S.; REICHARDT, K. Distribuição do sistema radicular do milho em terra roxa estrutura latossólica: II. Compactação entre cultura irrigada e fertirrigada. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.51, p.541-548, 1994.

BENGOUGH, A.G.; MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.41, p.341-358, 1990.

BENGOUGH, A.G.; CROSER, C.; PRITCHARD, J. A biophysical analysis of root growth under mechanical stress. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.189, p.155-164, 1997.

BENNIE, A.P.T. Growth and mechanical impedance. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. (Eds.) **Plant roots**. New York, M. Dekker, p.453-470, 1996.

BERGAMIN, A.C.; VITORINO, A.C.T.; FRANCHINI, J.C.; SOUZA, C.M.A.; SOUZA, F.R. Compactação em um Latossolo Vermelho distroférrico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, p.681-691, 2010.

BERTOL, I.; ALMEIDA, J. A.; ALMEIDA, E. X.; KURTZ, C. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem de capim-elefante-anão cv. Mott. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, p.1047-1054, 2000.

BEUTLER, A.N. **Efeito da compactação do solo e do conteúdo de água nas características agrônômicas de soja e arroz de sequeiro**. Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista, 2003. 126p. (Tese de Doutorado)

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

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G. Comparação de métodos para determinação da capacidade de campo em laboratório. **Cultura Agrônômica**, v.12, p.55-68, 2003.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, p.581-588, 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, p.181-192, 2004.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P. Soil resistance to penetration and least limiting water range for soybean yield in a haplustox from Brazil. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v.48, p.863-871, 2005.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C.; LEONEL, C.L.; JOÃO, A.C.G.S.; 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, p.1223-1232, 2007.

BEUTLER, S.J.; LOSS, A.; PEREIRA, M.G.; ANJOS, L.H.C.; FERREIRA, E.P.; SANTOS, L.L.; SILVA, E.M.R. Frações oxidáveis do carbono orgânico cultivado sob manejo orgânico. In: FERTBIO, 2008. Desafios para o uso do solo com eficiência e qualidade ambiental. Londrina, 2008. **Anais**. Londrina, 2008. CD ROM.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A., ed. Methods of soil analysis. 2.ed. Madison, **American Society of Agronomy**, p.363-375,1986.

BOONE, F.R.; van der WERF, H.M.G.; KROESBERGEN, B.; TEN HAAG, B.A.; BOERS, A. The effect of compactation of the arable layer in sandy soils on the growth of maize of silage. II. Soil conditions and growth. **Netherlands Journal of Agricultural Research**, Amsterdam, v.35, p.113-128, 1987.

BRAIDA, J.A., REICHERT, J.M.; VEIGA, M.; REINERT, D.J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.4, p.605-614, 2006.

BUSSCHER, W.J.; BAUER, P.J.; CAMP, C.R.; SOJKA, R.E. Correction of cone index for soil water content differences in a Coastal Plain soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.43, p.205-217, 1997.

CAMARA, R.K.; KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.4, p.813-819, 2005.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1997. 132p.

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

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, p.493-501, 2006.

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

CARTER, M.R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.70, p.425-433, 1990.

CARVALHO, L.A. **Condutividade hidráulica do solo no campo: as simplificações do método do perfil instantâneo**. 2002. 86 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2002.

CARVALHO FILHO, A.; CARVALHO, L.C.C.; CENTURION, J.F.; BEUTLER, A.N.; CORTEZ, J.W.; RIBON, A.A. Qualidade física de um Latossolo Vermelho férreo sob sistemas de uso e manejo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.25, p.43-51, 2009.

CENTURION, J.F. **Caracterização e classificação dos solos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal**. Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 1998. 84p. (Tese de Livre Docência)

CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C.; BEUTLER, A.N.; ROSSINI, L.A.; FREDDI, O.S.; SOUZA NETO, E.L. Compactação do solo no desenvolvimento e na produção de cultivares de soja. **Científica**, São Paulo, v.34, p.203-209, 2006.

CHAVES, J.C.D.; CALEGARI, A. Adubação verde e rotação de culturas. **Inf. Agropec.**, v.22, p.53-60, 2001.

CHILDS, E.C. La física del drenaje de tierras. In: LUTHIN, J. N. **Drenaje de tierras agrícolas**. México: Limusa Willey, 1967. Cap. 1, p. 71-100.

CHRISTOFIDIS, D. O futuro da irrigação e a gestão das águas. **Item**, Brasília, n.80, p.40-47, 2008.

CINTRA, F.L.D.; MIELNICZUK, J.; SCOPEL, I. Caracterização do impedimento mecânico em um Latossolo Roxo do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.7, n.3, p.323-327, 1983.

CLARK, L.J.; WHALLEY, W.R.; BARRACLOUGH, P.B. How do roots penetrate strong soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.255, 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, 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, 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.

DANIELSON, R.E.; SUTHERLAND, P.L. Porosity. In: KLUTE, A. ed. **Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods**. 2 ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. Part 1. p.443-461.

DEXTER, A.R. Mechanics of root growth. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.98, p.303-312, 1987.

DEXTER, A.R. Amelioration of soil by natural processes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.20, p.87-100, 1991.

DEXTER, A.R. Soil physical quality: Part I. Theory. Effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v.120, n.3-4, p.201-214, 2004 a.

DEXTER, A.R. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tith and hard-setting. **Geoderma**, Amsterdam, v.120, p.215-225, 2004 b.

DEXTER, A.R. Soil physical quality: Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. **Geoderma**, Amsterdam, v.120, p.227-239, 2004 c.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. **Tecnologia de produção de soja: Região Central do Brasil 2007**. Londrina, 2006. 225p. (Sistemas de Produção, 11).

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

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.507-514, 1999.

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.; CARVALHO, M.P.; VERONESI JÚNIOR, V.; CARVALHO, G.J. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.1, p.113-121, 2006.

FREDDI, O.S. **Avaliação do intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho cultivado com milho**. Jaboticabal, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2007. 105p. (Tese de Doutorado)

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, p.627-636, 2007.

FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F., DUARTE, A.P.; LEONEL, C.L. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho. I – Características de planta, solo e índice S. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, p.793-803, 2009.

FREIRE, J.C. Condutividade hidráulica e capacidade de campo em um Latossolo Roxo distrófico não saturado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.3, p.73-77, 1979.

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size Analysis. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. Part 1. p.383-411.

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, p.477-484, 2004.

HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.16, p.105-120, 1990.

HÅKANSSON, I.; MEDVEDEV, V.W. Protection of soils from mechanical overloading by establishing limits for stresses caused by heavy vehicles. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.35, p.85-97, 1995.

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

HERNANDEZ, F.B.T.; SOUZA, S.A.V. DE; ZOCOLER, J.L.; FRIZZONE, J.A. Simulação e efeito de veranicos em culturas desenvolvidas na região de Palmeira d'Oeste, Estado de São Paulo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.23, p.21-30, 2003.

HILLEL, D. **Applications of soil physics**. New York, Academic Press, 1980. 385p.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C., eds. **Soil compactation in crop production**. Amsterdam, Elsevier, 1994. p.45-69.

KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates: In:BLAKE, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L.; ENSMINGER, L.E.; CLARK, F.E. (Ed.). **Methods of soil**

analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p.499- 510.

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262p.

KLEIN, V.A. Uma proposta de irrigação automática controlado por tensiômetros. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 7, p. 231-234, 2001.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, p.857-867, 2002.

KLEIN, V. A. **Física do solo**. Passo Fundo: EDIUPF, 2008. 212p.

KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Características físicas e químicas do solo afetadas por métodos de preparo e modos de adubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.19, p.395-401, 1995.

KLUTE, A. Water retention: Laboratory methods. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.635-660.

KOOISTRA, M.J.; SCHOONDERBEEK, D.; BOONE, F.R.; VEEN, B.W.; NOORDWIJK, M van. Root-soil contact of maize, as measured by a thin-section technique. II. Effects of soil compaction. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.139, p.119-129, 1992.

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

LEONEL, C.L.; CENTURION, M.A.P.C.; CENTURION, J.F.; BEUTLER, A.N.; FREDDI, O.S. Relação da compactação do solo com a cultura do amendoim. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.23, p.70-81, 2007.

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

LINDEMANN, W.C.; HAM, G.E.; RANDALL, G.W. Soil compaction effects on soybean nodulation, N₂(C₂H₄) fixation and seed yield. **Agronomy Journal**, Madison, v.74, p.307-311, 1982.

LINDSTRON, M.J.; VOORHEES, W.B. Response of temperate crops to soil compaction. In: SOANE, B.D.; VAN OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. London, Elsevier, 1994. p.265-286. (Developments in Agricultural Engineering, 2)

LIPIEC, J.; ISHIOKA, T.; HATANO, R.; SAKUMA, T. Effects of soil structural discontinuity on root and shoot growth and water use of maize. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.157, p.65-74, 1993.

LOPES, A.S.; PAVANI, L.C.; CORÁ, J.E.; ZANINI, J.R.; MIRANDA, H.A. Manejo da irrigação (tensiometria e balanço hídrico climatológico) para a cultura do feijoeiro em sistemas de cultivo direto e convencional. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, p. 89-100, 2004.

MATERECHERA, S.A.; ALSTON, A.M.; KIRBY, J.M.; DEXTER, A.R. Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.144, p.297-303, 1992.

MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F.; LOVATO, T.; FERNANDES, F.F.; DEBARBA, L. Manejo de solo e culturas e sua relação com estoques de carbono e

nitrogênio do solo. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S.S.; ALVAREZ V., V.H., eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v.3, p.209-248.

NEVES, C.S.V.J.; FELLER, C.; KOUAKOUA, E. Efeito do manejo do solo e da matéria orgânica em água quente na estabilidade de agregados de um Latossolo Argiloso. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, p.1410–1415, 2006.

NIERO, L.A.C.; DECHEN, S.C.F.; COELHO, R.M.; DE MARIA, I.C. Avaliações visuais como índice de qualidade do solo e sua validação por análises físicas e químicas em um Latossolo Vermelho distroférico com usos e manejos distintos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, p.1271-1282, 2010.

NOGUEIRA, J.B. **Mecânica dos solos**. Ensaios de Laboratório. São Carlos, EESC-USP, 1998. 248p.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. UFV, 1999. 399 p.

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

PEREIRA, F.S.; ANDRIOLI, I.; PEREIRA, F.S.; OLIVEIRA, P.R.; CENTURION, J.F.; FALQUETO, R.J.; MARTINS, A.L.S. Qualidade física de um Latossolo Vermelho submetido a sistemas de manejo avaliado pelo índice S. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, p.87-95, 2011.

PRIMAVESI, A. **Manejo Ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. São Paulo, Nobel. 549p, 1987.

RAIJ, B.VAN; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S.; BATAGLIA, O.C. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170p.

RAIJ, B.VAN; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.H.; FURLANI, A.M.C. **Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas, Instituto Agrônômico & Fundação IAC, 1996. 285p. (Boletim Técnico, 100)

RAPER, R.L. Agricultural traffic impacts on soil. **J. Terramech.**, v.42, p.259-280, 2005.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.12, p.211-216, 1988.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Manejo, qualidade do solo e sustentabilidade: condições físicas do solo agrícola. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14., 2002, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: UFMT, 2002. CD-ROM.

REYNOLDS, W.D.; VIEIRA, S.R.; TOPP, G.C. An assessment of the single-head analysis for the constant head well permeameter. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.72, n.4, p.489-501, 1992.

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

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

SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P.C.; FABRÍCIO, A.C.; MACEDO, M.C.M.; BROCH, D.L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.1, p.11-21, 2008.

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.

SHARMA, M.L.; UEHARA, C. Influence of soil structure on water relations in low humic latossols. II. Water movement. **Soil Science Society of America Proceedings**, Washington, v.32, n.5/6, p.770-774, 1968.

SILVA, A. J. N. da. **Caracterização de Latossolos amarelos sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no Estado de Alagoas**. 1996. 133 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 1996.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Managment versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.44, p.81-93, 1997.

SILVA, M.L.N.; BLANCANEUX, P.; CURI, N.; LIMA, J.M.; MARQUES, J.J.G.S.M.; CARVALHO, A.M. Estabilidade e resistência de agregados de um Latossolo Vermelho-Escuro cultivado com sucessão milho-adubo verde. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.33, p.97-103, 1998.

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

SILVA, A.P. **Integração manejo x física**. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., Santa Maria, 2004. Palestras... Santa Maria, UFSM, 2004. CD-ROM.

SILVA, M.A.S.; MAFRA, Á.L.; ALBUQUERQUE, J.A.; ROSA, J.D.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Propriedades físicas e teor de carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob distintos sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, p.329-337, 2006.

SILVA, O.S.; FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; ARATANI, R.G.; ANDRIOLI, F.F.; ANDRIOLI, I. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho cultivado no sistema plantio direto. **Irriga**, Botucatu, v.13, n.2, p.191-204, 2008.

SOUZA, Z.M.; ALVES, M.C. Propriedades químicas de um Latossolo Vermelho distrófico de cerrado sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.1, p.133-139, 2003.

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

STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. Condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.13, p.63-71, 1978.

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, p.755-760, 2004.

TARDIEU, F. Growth and functioning of roots and to root systems subjected to coil compaction. Towards a system with multiple signaling. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.30, p.217-243, 1994.

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.

TAVARES FILHO, J.; FONSECA, I.C.B.; RIBON, A.A.; BARBOSA, G.M.C. Efeito da escarificação na condutividade hidráulica saturada de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.3, p.996-999, 2006.

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

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

TELLES, D.D.; DOMINGUES, A.F. Água na agricultura e pecuária. In: REBOUÇAS, A.C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J.G. (Orgs.). **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 3. ed. São Paulo: Escrituras Editoras, 2006. cap.10, p.325-364.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P. 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.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.C.; DEXTER, A.R. Quantification of the soil physical quality of a tropical Oxisol using the S index. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.65, n.1, p.56-60, 2008.

TORRES, E.; SARAIVA, O.F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina, Embrapa Soja, 1999. 58p. (Circular Técnica, 23)

TURNER, N.C. Further progress in crop water relations. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.58, p.293-325, 1997.

VAN GENUCHTEN, M.T.A. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, p.892-897, 1980.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo, Mcgraw-Hill do Brasil, 1977. 509p.

VARQUEZ, L.; MYHRE, D.L.; GALLAHER, R.N.; HANLON, E.A.; PORTIER, K.M. Soil compaction associated with tillage treatments for soybean. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.13, p.35-45, 1989.

VARSA, E.C.; CHONG, S.K.; ABOLAJI, J.O.; FARQUHAR, D.A.; OLSEN, F.J. Effect of deep tillage on soil physical characteristics and corn (*Zea mays* L.) root growth and production. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.43, p.219-228, 1997.

VASCONCELOS, R.F.B.; CANTALICE, J.R.B.; OLIVEIRA, V.S.; COSTA, Y.D.J.; CAVALCANTE, D.M. Estabilidade de agregados de um Latossolo Amarelo distrocoeso de Tabuleiro Costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, p.309-316, 2010.

VOMOCIL, J.A.; FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil air and water. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St Joseph, v.4, p.242-246, 1961.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E.S.; NEVES, J.C.L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.5, p.487-494, 2005.

WOHLENBERG, E.V., REICHERT, J.M., REINERT, D.J.; BLUME, E. Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.5, p.891-900, 2004.

YOODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal of the American Society of Agronomy**, Madison, v.28, n.5, p.337-351, 1936.