

COMPACTAÇÃO DE UM LATOSSOLO INDUZIDA PELO TRÁFEGO DE MÁQUINAS E SUA RELAÇÃO COM O CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DE FEIJÃO E TRIGO⁽¹⁾

Gilberto Loguércio Collares⁽²⁾, Dalvan José Reinert⁽³⁾, José Miguel Reichert⁽³⁾ & Douglas Rodrigo Kaiser⁽⁴⁾

RESUMO

A compactação dos solos constitui fator limitante ao aumento da produtividade e ao uso contínuo do sistema plantio direto, principalmente em solos argilosos. Neste trabalho, avaliou-se, num Latossolo Vermelho argiloso, a influência de estados de compactação sobre a densidade, porosidade e resistência do solo à penetração, bem como as conseqüências sobre o crescimento radicular, área foliar e produtividade do feijoeiro e do trigo cultivado em sucessão. Os tratamentos foram: PD - plantio direto continuado por seis anos; PDc - plantio direto com compactação adicional, e Esc - escarificação sobre PD. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com três repetições. A maior densidade ocorreu na camada de 0,05–0,15 m, com valores maiores que 1,5 Mg m⁻³, mas não se observou diferença significativa entre os tratamentos. A resistência à penetração foi maior que 2 MPa nos períodos mais secos, com umidade (θ) < 0,28 m³ m⁻³ e os maiores valores ocorreram nas camadas superficiais (0,05–0,15 m) do PDc e do PD. A maior restrição radicular ocorreu a 0,1 m de profundidade no PDc, o que resultou em menor crescimento da área foliar e menor altura do feijoeiro. A menor restrição ao crescimento radicular e a maior área foliar e altura ocorreram no PD e no Esc. O PDc reduziu a produtividade do feijoeiro em 17 %, se comparado ao PD. A escarificação não afetou significativamente a produtividade do feijoeiro. Na cultura do trigo, houve apenas tendência de redução de produtividade no PDc e Esc, em relação à produtividade obtida no PD. Assim, a escarificação não foi necessária para o nível de compactação encontrado nesse Latossolo, manejado sob plantio direto há seis anos.

Termos de indexação: escarificação, crescimento radicular, propriedades físicas, *Phaseolus vulgaris*, *Triticum aestivum*.

⁽¹⁾ Pesquisa executada com recursos do CNPq e da FAPERGS. Parte da tese de doutorado do primeiro autor. Recebido para publicação em fevereiro de 2007 e aprovado em fevereiro de 2008.

⁽²⁾ Professor do Departamento de Ciências Agrárias, Conjunto Agrotécnico Visconde da Graça, Universidade Federal de Pelotas – CAVG/UFPEL. Av. Ildefonso Simões Lopes 2791, Bairro Arco Iris, CEP 96060-290 Pelotas (RS). E-mail: collares@ufpel.tche.br

⁽³⁾ Professor Titular do Departamento de Solos, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Campus Universitário, CEP 97105-900 Santa Maria (RS). E-mail: dalvan@ccr.ufsm.br; reichert@smail.ufsm.br

⁽⁴⁾ Doutorando em Ciência do Solo, UFSM. Bolsista da CAPES. E-mail: kaiser@mail.ufsm.br

SUMMARY: TRAFFIC-INDUCED COMPACTION OF AN OXISOL AND ITS RELATION WITH GROWTH AND YIELD OF COMMON BEAN AND WHEAT

Soil compaction is a limiting factor to increase yields and to develop long-term no-till, especially in clayey soils. The objective of this study was to evaluate the effect of compaction levels on soil bulk density, porosity and penetration resistance, as well as the consequences on root growth, leaf area index and yield of common bean and wheat in crop succession. The treatments were: NT – continuous no-till for six years; NTc – NT with additional compaction; Chi – chisel plow on NT. The experimental design was completely randomized with three replications. The highest bulk density was found in the 0.05–0.15 m layer of the soil under NTc, with values over 1.5 Mg m^{-3} . Soil resistance to penetration exceeded 2 MPa in the driest periods, with moisture (θ) $< 0.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, and highest values were observed at the soil surface (0.05 to 0.15 m) for NTc and NT. Root growth was most affected at 0,1 m depth under NTc, which resulted in a restricted development of the leaf area and shorter bean plants. Root growth was less restricted and the leaf area and plant height were greater under NT and Chi. Common bean yield in NTc was 17 % lower than under NT. Chisel plow did not affect the common bean yield significantly. In wheat, yields tended to be lower in NTc and Chi than in NT. Chisel plow was therefore not necessary to alleviate soil compaction in this Oxisol under no-tillage for six years.

Index terms: chisel plow, root growth, yield, physical properties, Phaseolus vulgaris, Triticum aestivum.

INTRODUÇÃO

O planalto riograndense, especialmente aquelas regiões ocupadas por Latossolos com textura argilosa, é responsável pela produção de, aproximadamente, 53 % do trigo (862.331 t), 55 % da soja (4.069.745 t), 45 % do milho (2.443.196 t) e 39 % do feijão (55.684 t) produzidos no Estado (Atlas... 2006). O sistema plantio direto, amplamente empregado nas lavouras dessas regiões, contribuiu para minimizar a degradação do solo pela erosão, principalmente pela continuada deposição de resíduos culturais (Braidá & Cassol, 1999), mantendo o solo coberto durante todo o ano e com mínima mobilização.

No sistema plantio direto, pela mobilização mínima do solo, é comum ocorrer aumento na densidade do solo (Silva et al., 2000a, b; Secco et al., 2004), porém esse adensamento é, muitas vezes, contrabalançado pelo aumento do teor de matéria orgânica (Bayer et al., 2002; Lovato et al., 2004), da atividade biológica (Cividanes, 2002) e da agregação (Campos et al., 1995; Wendling et al., 2005), resultando em melhores condições químicas e físicas do solo (Albuquerque et al., 2005).

Apesar disso, a mecanização com máquinas cada vez mais pesadas e a maior intensidade de uso do solo, mesmo no sistema de semeadura direta, promovem efeitos negativos na estrutura do solo (Silva et al., 2003) e aumento da compactação (Dias Júnior, 2000). Quando o tráfego de máquinas ocorre em determinada condição de umidade, pode-se superar a capacidade de suporte desses solos, promovendo a deformação plástica e o aumento do estado de compactação do solo (Reinert, 1990; Håkansson & Voorhess, 1998).

Dentre os efeitos da compactação nos atributos físicos do solo, destacam-se o aumento da densidade e da resistência do solo à penetração e a redução da porosidade e da permeabilidade do solo (Soane & van Ouwerkerk, 1994; Stone et al., 2002). O aumento da resistência do solo à penetração, acima de 2 MPa, afeta o crescimento das raízes e da parte aérea das plantas (Letey, 1985). Vários pesquisadores utilizam a resistência do solo à penetração para avaliar efeitos dos sistemas de manejo do solo no ambiente radicular (Bengough & Mullins, 1990; Tormena & Roloff, 1996; Streck et al., 2004; Genro Júnior et al., 2004; Silva et al., 2004). A diminuição do teor de água aumenta a resistência do solo à penetração, fazendo com que as raízes em expansão experimentem um impedimento mecânico cada vez maior. Solos compactados também apresentam menor aproveitamento dos nutrientes e maiores emissões de N_2O para a atmosfera (Ruser et al., 2006). Por essa razão, o crescimento do sistema radicular das plantas é restringido (Bengough et al., 2006), reduzindo o acesso à água e aos nutrientes (Soane & van Ouwerkerk, 1995), principalmente àqueles que são pouco móveis no solo, como o P.

O estado de compactação resulta do tipo de manejo do solo e das culturas e pode alterar os fatores físicos que promovem condições ideais ou limitantes ao crescimento vegetal. Segundo Taylor & Brar (1991), os níveis críticos de resistência do solo para o crescimento das plantas variam com o tipo de solo e com a espécie cultivada. Em Latossolo Vermelho, Petter (1990) verificou que a resistência de 2,8 MPa foi limitante ao crescimento radicular da soja. Fernandez et al. (1995) encontraram inibição

completa do crescimento radicular da soja, em Latossolo Vermelho, textura média, a partir de $1,52 \text{ Mg m}^{-3}$ de densidade do solo e de $0,5 \text{ MPa}$ de resistência à penetração, enquanto Nesmith (1987) adotou o valor de $2,0 \text{ MPa}$ como limite crítico de resistência à penetração de raízes. Por estar a resistência à penetração e inversamente relacionada com a umidade do solo, tem sido bastante difícil estabelecer, no campo, os valores críticos de resistência, de acordo com o processo de umedecimento e secagem do solo, os quais alteram rapidamente a resistência mecânica de possível condição limitante para não-limitante (Genro Júnior et al., 2004).

A resposta das principais plantas cultivadas à compactação ainda não está completamente conhecida. Os estudos realizados para obter a resposta das plantas em diferentes estados de compactação, normalmente, têm sido feitos em vasos (Rosolem et al., 1999; Guimarães et al., 2002; Silva & Rosolem, 2002) ou representam um levantamento de determinado estado de compactação no campo (Silva et al., 2004; Santos et al., 2005) e seu efeito sobre a cultura nessa condição.

Neste trabalho, avaliou-se, num Latossolo Vermelho argiloso, a influência do preparo e de estados de compactação sobre a densidade, porosidade e resistência do solo à penetração, bem como as consequências sobre o crescimento radicular, área foliar e produtividade do feijoeiro e a produtividade do trigo cultivado em sucessão.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado na área do Campo Experimental da Agronomia da UNICRUZ, no município de Cruz Alta, no Rio Grande do Sul. O solo é um Latossolo Vermelho (Embrapa, 1999) com 607 g kg^{-1} de argila, 176 g kg^{-1} de silte e 217 g kg^{-1} de areia nos primeiros $0,5 \text{ m}$ de profundidade. A área utilizada para o experimento, num total de 2.600 m^2 , foi dividida em nove parcelas quadradas de 17 m de lado, e vinha sendo cultivada há mais de seis anos com o sistema semeadura direta com a sucessão de soja ou milho, no verão, e aveia ou trigo, no inverno.

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com três repetições, e os tratamentos foram diferenciados em níveis de compactação: PD - plantio direto continuado, que reflete o histórico das pressões aplicadas por seis anos de manejo sob plantio direto; PDc - plantio direto com compactação adicional, que visou aumentar o estado de compactação da área, e Esc - escarificação efetuada após seis anos sob PD, para reduzir a compactação atual do solo.

A compactação adicional das parcelas (PDc) foi realizada no dia 14 de janeiro de 2003, por meio de quatro passadas paralelas e sobrepostas de uma pá-carregadeira articulada *CATERPILAR 966*, com rodado de pneus, com massa total de $16,6 \text{ Mg}$. A

umidade do solo no momento da aplicação dos tratamentos foi de $0,26$; $0,34$; $0,38$; $0,34$ e $0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, nas camadas de $0-0,05$; $0,05-0,10$; $0,10-0,15$; $0,20-0,25$ e $0,25-0,35 \text{ m}$, respectivamente. A máquina trafegou por toda a parcela, de forma que os pneus comprimissem áreas paralelas entre si, sendo as passadas sobrepostas às anteriores para que toda a área fosse igualmente trafegada. A escarificação foi realizada com um escarificador de sete hastes até à profundidade de $0,25 \text{ m}$ e, após, efetuou-se o nivelamento superficial do terreno com o uso de uma grade de 36 discos.

A semeadura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.; cv. FT Bionobre) foi efetuada no dia 15 de janeiro de 2003, em área dessecada com glifosate. A densidade de semeadura foi de 34 sementes por m^2 , com espaçamento entrelinhas de $0,45 \text{ m}$. Em maio de 2003, sucedendo a cultura de verão, foi semeado trigo (*Triticum aestivum* L.; cv. BRS 179), com densidade de semeadura de 330 sementes por m^2 . A semeadura das culturas foi realizada com uma semeadora-adubadora de discos.

Para determinar a densidade e a porosidade do solo, foram coletadas amostras com estrutura preservada em anéis metálicos com $0,054 \text{ m}$ de diâmetro e $0,03 \text{ m}$ de altura, em cinco camadas de solo, a saber: $0-0,05$; $0,05-0,10$; $0,10-0,15$; $0,20-0,25$ e $0,30-0,35 \text{ m}$. Essas amostras foram coletadas no dia 24 de fevereiro de 2003 (40 dias após a semeadura - DAS). A determinação da densidade seguiu o método da Embrapa (1979), enquanto a porosidade foi determinada conforme Oliveira (1968).

A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada nos dias 15/1/03 (dia da semeadura); 29/1/03 (14 DAS); 24/2/03 (40 DAS) e 28/02/03 (44 DAS), usando-se um penetrômetro de taxa constante de penetração, com armazenamento digital dos dados, possuindo ponta cônica com ângulo de penetração de 30° e $12,83 \text{ mm}$ de diâmetro da base do cone (Collares et al., 2004). As medidas foram realizadas em cada parcela, repetindo a penetração da haste do penetrômetro em três distintos pontos escolhidos ao acaso, até $0,60 \text{ m}$ de profundidade, tendo sido as leituras registradas em cada camada de $0,015 \text{ m}$.

A umidade do solo foi medida com TDR portátil da Soil Moisture (TRASE), ao 1, 7, 14, 21, 28, 40, 44, 57, 71 e 78 DAS. Os sensores do TDR tiveram sua estrutura confeccionada em fibra (tecnil), a qual serviu de suporte para duas hastes metálicas de aço inox com $0,23 \text{ m}$ de comprimento, conectadas entre si e ao aparelho por meio de cabo coaxial. As hastes foram inseridas no solo, com inclinação tal que integrasse uma área de acordo com as camadas de: $0-0,06$; $0,06-0,12$; $0,12-0,24$, e $0,24-0,48 \text{ m}$. Foi feita a calibração do TDR para o solo local, ajustando-se uma função, conforme sugerido por Topp et al. (1980), com a qual se calculou a umidade volumétrica (θ) correspondente a cada leitura. A equação 1 expressa o ajuste:

$$\theta = 13,8523 + 1,4462 ka - 0,0389 ka^2 + 0,0010719 ka^3 \quad (1)$$

em que $ka = (t \times c/L)^2$; θ = umidade volumétrica do solo, em $m^3 m^{-3}$; ka = constante dielétrica aparente do solo; t = tempo de propagação da onda eletromagnética na haste metálica, em nanosegundos; c = velocidade de propagação da onda ($30 \times 10^9 \text{ cm s}^{-1}$), e L = o comprimento da haste metálica, em cm.

O solo onde estavam instalados os sensores do TDR foi inundado e saturado no final do experimento para a determinação da capacidade de campo (CC), segundo método do perfil instantâneo (Hillel et al., 1972). A umidade no ponto de murcha permanente (PMP) foi determinada pelo método fisiológico (Embrapa, 1979), utilizando-se o feijoeiro como planta-teste. Para esse estudo, consideraram-se os valores médios de umidade na CC e no PMP, para cada camada, independentemente do tratamento.

Para relacionar o efeito da compactação sobre as plantas, foram avaliadas algumas características que poderiam ser afetadas pelas variações impostas pelos distintos manejos aplicados, considerando que os maiores efeitos da compactação estão associados à deficiência hídrica no pleno desenvolvimento e crescimento. A emergência de plantas foi avaliada aos 7 e aos 14 dias da semeadura (DAS), numa área de 1 m^2 em cada parcela. Para avaliar o crescimento da parte aérea das plantas, foram selecionadas cinco plantas por parcela e realizadas medidas do comprimento e da largura das folhas aos 14, 21, 28 e 40 DAS, para estimar a área foliar. Para estimar a área foliar real, ajustou-se uma equação entre as medidas do comprimento e largura e a área real de folhas representativas, selecionadas ao acaso. A área real das folhas foi obtida em mesa digitalizadora. A equação 2 expressa o ajuste:

$$AF = 0,5697 (CL) \quad R^2 = 0,96 \quad (2)$$

sendo AF: área foliar e CL: produto entre o comprimento e a largura da folha.

Quando a cultura se encontrava em plena floração (44 DAS), fez-se a avaliação do crescimento e da distribuição do sistema radicular nos diferentes tratamentos, usando o método do perfil, descrito por Böhm (1979). Para caracterizar o volume de solo explorado pelo sistema radicular e o encontro do sistema radicular com camadas de impedimento mecânico, a distribuição do sistema radicular das plantas foi observada por meio da abertura de uma trincheira transversal a uma linha de cultivo, expondo a raiz de uma planta escolhida aleatoriamente de maneira que representasse o conjunto de plantas da parcela experimental. Após a exposição da raiz em uma secção transversal à linha de cultivo e próxima ao eixo da planta, o perfil foi dividido em quadrículas de $0,05 \text{ m}$ com auxílio de uma malha de $0,5 \times 0,3 \text{ m}$ colocado em pleno contato com o solo. Efetuou-se,

então, o desenho do formato natural em que se encontrava o sistema radicular nesse momento, obtendo-se o perfil de distribuição radicular do feijoeiro.

Na maturação fisiológica, avaliou-se a produtividade das culturas, efetuando a colheita de uma área representativa de $8,1 \text{ m}^2$ para o feijoeiro, e de $2,9 \text{ m}^2$, para o trigo, em cada parcela experimental.

A análise de variância das médias foi realizada pelo teste "F" e para a comparação de médias entre os distintos sistemas de manejo de solo, usou-se a Diferença Mínima Significativa (DMS) com probabilidade de erro de 5 %, utilizando o programa estatístico SAS (SAS, 1991).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A densidade do solo foi maior nas camadas de $0,05\text{--}0,10$ e de $0,10\text{--}0,15 \text{ m}$ em todos os tratamentos, mas não houve diferença estatística significativa entre os tratamentos (Figura 1a). O efeito da escarificação (Esc) na redução da densidade do solo praticamente desapareceu no tempo entre a aplicação do tratamento e as determinações efetuadas 40 dias após, indicando um processo de reconsolidação e rearranjo da estrutura do solo.

Houve, de maneira geral, tendência de aumento na microporosidade e redução na macroporosidade no PDc, em relação aos outros tratamentos (Figura 1a,b). No PDc, a microporosidade só foi maior nas camadas de $0,10\text{--}0,15 \text{ m}$ e de $0,20\text{--}0,25 \text{ m}$, o que pode ter resultado da transferência da carga aplicada pelos pneus da máquina até essas camadas, aproximação de agregados do solo e aumento no volume de microporos. Os valores de macroporosidade foram inferiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a partir dos $0,05 \text{ m}$, indicando prováveis limitações no arejamento do solo em épocas mais úmidas. Na porosidade total, não ocorreu diferença entre os tratamentos estudados (Figura 1d). As necessidades das plantas quanto à porosidade de aeração variam com a espécie vegetal (Taylor & Gardner, 1963). Como regra geral, Sojka (1992) sugere que uma porosidade de aeração inferior a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ seria limitante ao crescimento e desenvolvimento da maioria das espécies.

A umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo da cultura (Figura 2) teve grande faixa de variação, de $0,22\text{--}0,37 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, principalmente nas camadas superficiais ($0\text{--}0,2 \text{ m}$). A compactação adicional (PDc) aumentou significativamente a retenção de água na camada superficial, diferenciando-se do Esc, que reteve menos água até $0,06 \text{ m}$. Isso pode ser explicado pela tendência de aumento da macroporosidade no Esc e tendência de aumento da microporosidade no PDc em relação aos demais tratamentos. Nas camadas mais profundas ($0,06\text{--}0,48 \text{ m}$), as diferenças não foram significativas entre os tratamentos estudados.

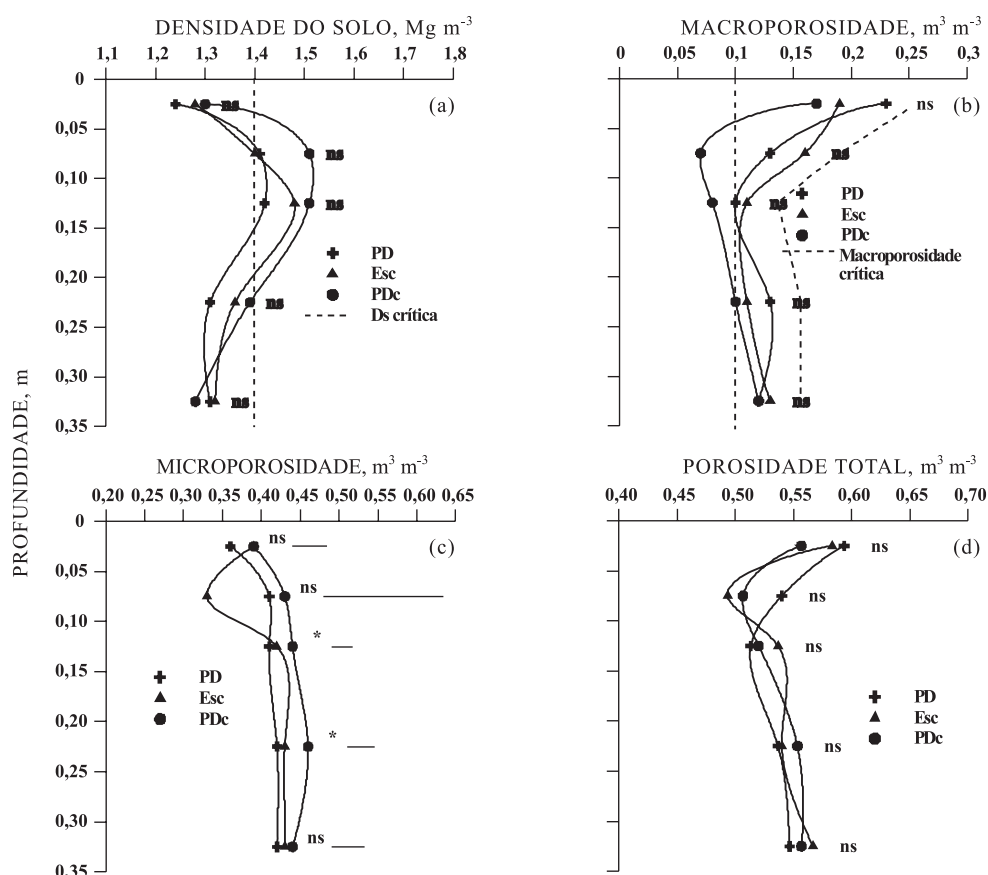


Figura 1. Valores da densidade do solo (a), macroporosidade (b), microporosidade (c) e porosidade total (d), em Latossolo sob plantio direto contínuo (PD), plantio direto com compactação adicional (PDc) e com escarificação (Esc), em 24/2/2003 (40 DAS). (ns: não-significativo; *: significativo pelo DMS a 5 %).

A resistência à penetração foi maior que 2 MPa nos períodos mais secos ($\theta < 0,28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), que é considerada crítica para as plantas (Taylor et al., 1966). Nos diferentes dias avaliados, os maiores valores de resistência à penetração ocorreram nas camadas superficiais (0,05–0,15 m), nos tratamentos PDc e no PD (Figura 3). A escarificação foi eficiente na diminuição da resistência à penetração até os 0,25 m, sendo sempre menor que 2 MPa, podendo proporcionar melhor crescimento de raízes.

No tratamento com compactação adicional (PDc), a densidade do solo tendeu a ser maior (Figura 1) e a resistência à penetração (Figura 3) foi maior até 0,1 m de profundidade. A densidade do solo foi maior que $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$ dos 0,07 a 0,12 m de profundidade, considerada como crítica pelo método do intervalo hídrico ótimo (IHO) para esse solo (Silva, 2003). Mesmo com umidade próximo a $0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, as observações do dia 15/1/03 (1 DAS) mostraram que a RP no PDc estava acima de 2 MPa até 0,12 m de profundidade. Quando a umidade reduziu de 0,30 para $0,27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Figura 2), somente no tratamento escarificado a RP era menor que 2 MPa até 0,12 m (medida do dia 29/01, 14 DAS) (Figura 3). Silva et al.

(2000a) e Streck et al. (2004) também encontraram maior resistência à penetração em solo trafegado por máquinas agrícolas, principalmente nos períodos mais secos.

Após experimentar situações de secagem e umedecimento do solo, associado com a consolidação da estrutura pelo crescimento radicular, a RP aos 40 DAS (24/02) não foi restritiva em nenhum dos tratamentos, situando-se sempre abaixo de 2 MPa. Para valores de umidade menores que $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (44 DAS), a RP na camada até 0,12 m foi superior a 2 MPa para o PDc e PD (Figura 3).

A variação da umidade do solo durante o ciclo do feijoeiro foi responsável pelas restrições experimentadas pelas plantas e a RP, tanto no tratamento PD como no PDc, estava intimamente relacionada com essa variação. Ainda que a umidade do solo estivesse acima do ponto de murcha permanente (PMP) e abaixo da capacidade de campo (CC), a resistência do solo à penetração esteve acima da crítica e pode ter limitado o crescimento radicular e da parte aérea das plantas (Figuras 4 e 5). A escarificação mostrou-se eficiente em reduzir a resistência à penetração até 0,25 m

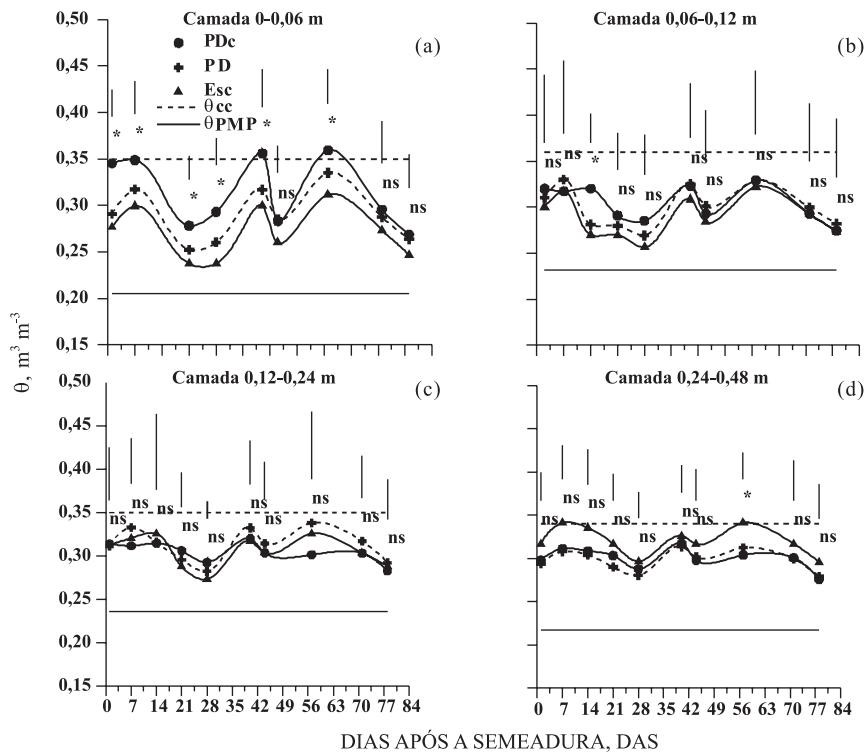


Figura 2. Variação da umidade volumétrica (θ) em diferentes profundidades do solo ao longo do ciclo da cultura do feijoeiro, em Latossolo sob plantio direto contínuo (PD), plantio direto com compactação adicional (PDc) e com escarificação (Esc). Barras verticais comparam valores de umidade volumétrica pelo teste DMS a 5 %. (ns: não-significativo; *: significativo).

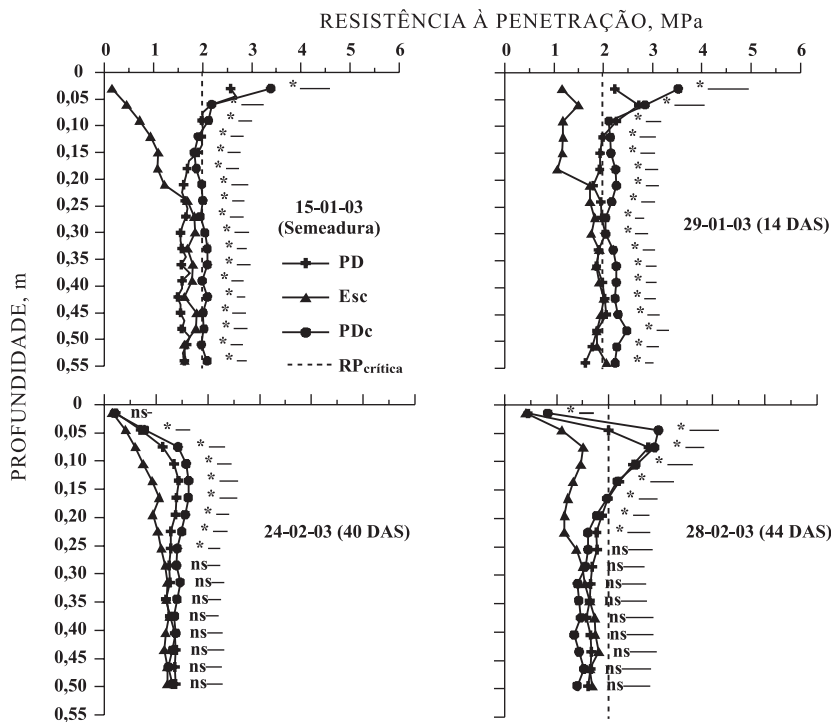


Figura 3. Resistência à penetração para quatro datas durante o ciclo da cultura do feijoeiro em Latossolo sob plantio direto contínuo (PD), plantio direto com compactação adicional (PDc) e com escarificação (Esc). Barras horizontais comparam os valores de RP, por profundidade, pelo teste DMS (5 %). (ns: não-significativo; *: significativo).

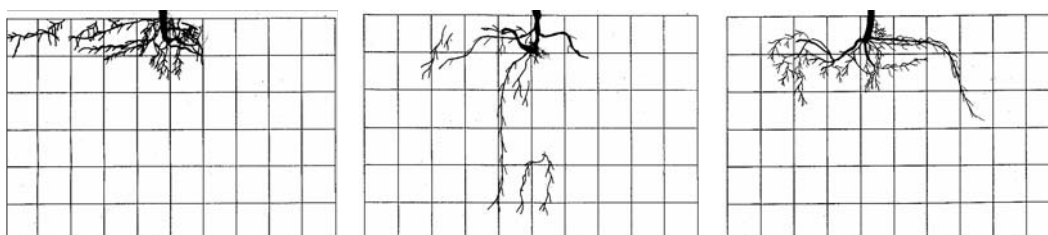
de profundidade. A escarificação, embora não tenha aumentado a macroporosidade, proporcionou menor resistência à penetração ao longo do ciclo da cultura. Abreu et al. (2004), Secco et al. (2004) e Tormena et al. (2004) também verificaram menor resistência à penetração e maior macroporosidade em solos submetidos à escarificação. A escarificação pode aumentar a condutividade hidráulica e a infiltração de água no solo (Camara & Klein, 2005).

A emergência das plantas não foi alterada pela compactação adicional e, inclusive, a escarificação tendeu a reduzir a emergência (Quadro 1), o que indica que o revolvimento do solo na linha de semeadura foi suficiente para proporcionar bom contato solo-semente e permitir a germinação e emergência das plantas. O mesmo efeito foi observado por Riquelme (2004) na cultura do feijoeiro.

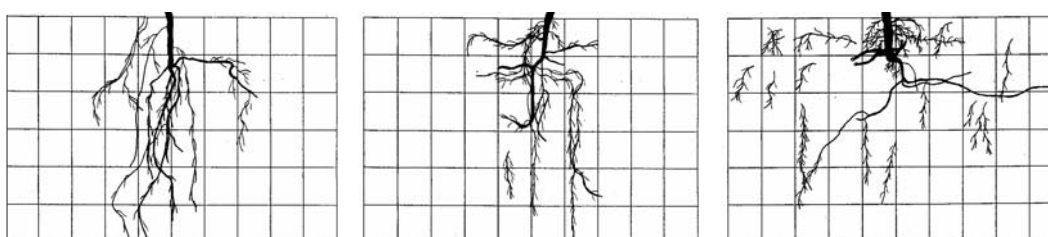
Considerando as flutuações de umidade e resistência à penetração, as raízes das plantas tiveram o seu crescimento restringido. No PDc, o crescimento radicular foi menos vigoroso e concentrou-se nas camadas superficiais, com indícios claros de deformação (Figura 4).

A raiz principal apresentou várias ramificações nas primeiras camadas de solo. A concentração de raízes foi evidente até 0,10 m de profundidade e as poucas raízes observadas na próxima camada cresceram em fendas entre as camadas compactadas, não conseguindo penetrar na zona compactada. No tratamento PD, que não recebeu compactação adicional, as raízes atingiram maior profundidade e tiveram melhor crescimento e distribuição no solo. Mesmo no PDc, foi possível observar o surgimento significativo de raízes secundárias, na forma de finas "franjas". A adaptação às condições adversas pode ser responsável pelo crescimento e desenvolvimento de plantas em locais onde as propriedades físicas são consideradas limitantes ou restritivas. A presença de zonas compactadas no solo restringe o crescimento radicular a partir daquele ponto (Montagu et al., 2001) e as raízes são induzidas a crescer em outra direção (Clarck et al., 2003) e, normalmente, concentram-se na superfície do solo. Quando existe compactação em camadas mais profundas, as raízes, ao crescerem em condições favoráveis no início do ciclo das plantas, tendem a concentrar-se superficialmente, podendo comprometer o acesso à água e nutrientes em períodos

Plantio direto com compactação adicional (PDc)



Plantio direto contínuo (PD)



Escarificação (Esc)

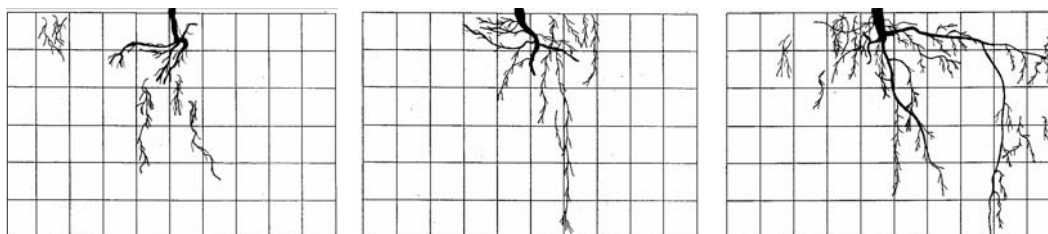


Figura 4. Distribuição radicular do feijoeiro em Latossolo sob plantio direto contínuo (PD), plantio direto com compactação adicional (PDc) e com escarificação (Esc). A dimensão do quadro é de 0,5 x 0,3 m, e cada célula (quadrícula) possui 0,05 x 0,05 m.

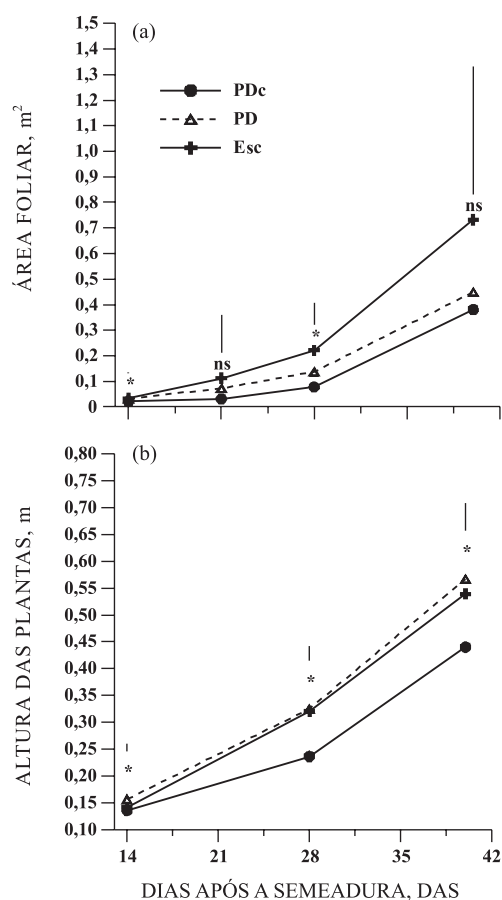


Figura 5. Variação da área foliar (a) e da altura (b) do feijoeiro ao longo do ciclo da cultura. Barras verticais comparam os valores de área foliar e altura de plantas pelo teste DMS (5 %). (ns: não-significativo; *: significativo).

Quadro 1. Emergência de plantas de feijoeiro cultivadas sob plantio direto contínuo (PD), plantio direto com compactação adicional (PDC) e com escarificação (Esc)

Tratamento	Plantas m ⁻²	
	7 DAS	14 DAS
PDC	29 a	30a
PD	30 a	30a
Esc	25 a	27a

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste DMS a 5 %.

de estiagem (Begon et al., 1996). Para o feijoeiro, a floração é o período mais crítico para deficiência hídrica (Massignam et al., 1998). No entanto, se as condições hídricas e nutricionais forem atendidas, a concentração superficial das raízes não prejudica o crescimento e a produtividade da cultura (Silva et al., 2000b).

Em resposta à restrição radicular que diminui o acesso à água e nutrientes, as plantas tiveram menor crescimento da sua parte aérea (Figura 5). No PDC, as plantas tiveram menor altura (14, 28 e 40 DAS) e área foliar (14 e 28 DAS). O crescimento das plantas foi restringido pela resistência à penetração. No PDC, as raízes concentraram-se até à profundidade de 0,10 m, indicando que a alta resistência à penetração limitou o crescimento radicular a partir dessa profundidade. No PD e na escarificação, as raízes cresceram até à profundidade de 0,30 m e, visualmente, não se observaram diferenças de crescimento entre esses tratamentos. A área foliar do feijoeiro foi maior na escarificação aos 14 e 28 DAS e, nos demais períodos, não houve diferença significativa (Figura 5a). A altura das plantas foi menor no PDC em todos os períodos avaliados (Figura 5b). No PD, apesar de a resistência à penetração ter atingido valores acima da crítica (2 MPa), o crescimento radicular foi, possivelmente, favorecido pela presença de poros contínuos e, dessa forma, a restrição à planta pode ter sido menor.

O estado de compactação criado por quatro passadas de máquina (PDC) reduziu a produtividade do feijoeiro em 17 %, se comparado ao plantio direto contínuo sem compactação adicional (PD). A escarificação não afetou significativamente a produtividade do feijoeiro. Na cultura do trigo, houve apenas tendência de redução de produtividade no PDC e Esc, em relação à produtividade obtida no PD. (Quadro 2). Silva (2003) verificou maior efeito da compactação de um Latossolo sob a produtividade do trigo, quando comparado ao seu efeito na produtividade de milho e soja. Secco et al. (2004) encontraram que a escarificação anual de um Latossolo ou a cada três anos em áreas sob plantio direto não alterou significativamente a produção de soja e milho, mas favoreceu o crescimento e a produtividade do trigo. As produtividades do feijão e do trigo no PD e na escarificação não apresentaram diferenças estatisticamente significativas, mesmo que a resistência à penetração tenha atingido valores críticos em alguns períodos no PD.

Quadro 2. Produtividade das culturas do feijoeiro e do trigo cultivadas sob plantio direto contínuo (PD), plantio direto com compactação adicional (PDC) e com escarificação (Esc)

Tratamento	Produtividade		Produtividade relativa	
	Feijão	Trigo	Feijão	Trigo
	— Mg ha ⁻¹ —		— % —	
PDC	2,382b	2,911 a	83,73	86,35
PD	2,879a	3,371 a	100,00	100,00
Esc	2,762ab	3,151 a	95,93	93,47

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste DMS a 5 %.

O sistema radicular do feijoeiro experimentou impedimentos nas camadas superficiais e, dessa forma, no PDC o crescimento das raízes e da parte aérea foi limitado e a produtividade do feijoeiro foi menor. A escarificação reduziu os efeitos da compactação causada por seis anos de plantio direto continuado, o que ficou evidenciado na redução da resistência do solo à penetração. Todavia, os resultados mostraram que a produtividade não foi significativamente diferente do que a alcançada no sistema plantio direto continuado, não justificando a adoção dessa prática como forma de minimizar os efeitos negativos da compactação, quando o solo apresenta indicadores de compactação semelhantes aos observados na cultura do feijão e do trigo.

CONCLUSÕES

1. O crescimento radicular e a área foliar do feijoeiro foram afetados pela compactação adicional, refletindo-se em redução da produtividade.

2. A escarificação do solo mostrou-se eficaz em diminuir os efeitos da compactação do solo, principalmente na redução da resistência à penetração, porém não resultou em aumento de produtividade do feijoeiro, nem do trigo, quando efetuada em Latossolo sob plantio direto contínuo por seis anos.

LITERATURA CITADA

- ABREU, S.; REICHERT, J.M. & REINERT, D.J. . Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 28:519-531, 2004.
- ALBUQUERQUE, J.A.; MAFRA, A.L.; FONTOURA, S.M.V.; BAYER, C. & PASSOS, J.F.M. Avaliação de sistemas de preparo e calagem em um Latossolo Bruno aluminico. R. Bras. Ci. Solo, 29:963-975, 2005.
- ATLAS SOCIOECONÔMICO DO RIO GRANDE DO SUL. Disponível em: <[http:// www. scp.rs.gov.br/atlas](http://www.scp.rs.gov.br/atlas)> . Acesso em 4 de jun. de 2006.
- BAYER, C.; DICK, D.P.; RIBEIRO, G.M. & SCHEUERMANN, K.K. Carbon stocks in organic matter fractions as affected by land use and soil management, with emphasis on no-tillage effect. Ci. Rural, 32:401-406, 2002.
- BEGON, M.; HARPER, J. & TOWNSEND, C.R. Ecology: Individuals, populations and communities. Oxford, 1996. 1068p.
- BENGHOUGH, A.G. & MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth: A review of experimental techniques and root growth responses. J. Soil Sci., 41:341-358, 1990.
- BENGHOUGH, A.G.; BRANSBY, M.F.; HANS, J.; McKENNA, S.J.; ROBERTS, T.J. & VALENTINE, T.A. Root responses to soil physical conditions: Growth dynamics from field to cell. J. Exp. Bot., 57:437-447, 2006.
- BÖHM, W. Methods of studying root systems. Berlin, Springer-Verlag, 1979. 190p.
- BRAIDA, J.A. & CASSOL, E.A. Relações de erosão em entressulcos com o tipo e a quantidade de resíduo vegetal na superfície do solo. R. Bras. Ci. Solo, 23:711-721, 1999.
- CAMARA, R.K. & KLEIN, V.A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. R. Bras. Ci. Solo, 29:789-796, 2005.
- CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICOLÓDI, 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. R. Bras. Ci. Solo, 19:121-126, 1995.
- CIVIDANES, F.J. Efeitos do sistema de plantio e da consorciação soja-milho sobre artrópodes capturados no solo. Pesq. Agropec. Bras., 37:15-23, 2002.
- CLARK, L.J.; WHALLEY, W.R. & BARRACLOUGH, P.B. How do roots penetrate strong soil? Plant Soil, 255:93-104, 2003.
- COLLARES, G.C., REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Desenvolvimento e funcionalidade de um penetrômetro de cone com taxa constante de penetração no solo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., Santa Maria, 2004. Anais. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2004. CD-ROM.
- DIAS JÚNIOR, M.S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, C.E. , eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa , MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1. p.53-94.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 1999. 412p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de métodos de análise de solos. Rio de Janeiro, 1979.
- FERNANDEZ, E.M.; CRUSCIOL, C.A.C.; THIMOTEO, C.M. de S. & ROSOLEM, C.A. Matéria seca e nutrição da soja em razão da compactação do solo e adubação fosfatada. Científica, 23:117 -132, 1995.
- GENRO JÚNIOR, S.A.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. R. Bras. Ci. Solo, 28:477-484, 2004.
- GUIMARÃES, C.M.; STONE, L.F. & MOREIRA, J.A.A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. II: Efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea. R. Bras. Eng. Agríc. Amb., 6:213-218, 2002.
- HAKANSSON, I. & VOORHESS, W.B. Soil compactation. In: LAL, R.; BLUM, W.H.; VALENTIN, C. & STEWART, B.A., eds. Methods for assessment of soil degradation. Boca Raton, Lewis Publishers, 1998. p.167-179.
- HILLEL, D.; KRENTOS, V. & STYLINOY, Y. Procedures and test of internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics *in situ*. Soil Sci., 114:395-400, 1972.

- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. *Adv. Soil Sci.*, 1:277-294, 1985.
- LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C. & VEZZANI, F. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento de milho em sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:175-187, 2005.
- MASSIGNAM, A.M.; VIEIRA, H.J.; HEMP, S.; DITTRICH, R.C.; FLESCHE, R.D. & VICTORIA, F.B. Ecofisiologia do feijoeiro. I-Determinação do período mais crítico à deficiência hídrica do solo. *R. Bras. Agrometeorol.*, 6:35-39, 1998.
- MONTAGU, K.D.; CONROY, J.P. & ATWELL, B.J. The position of localized soil compaction determines root and subsequent shoot growth responses. *J. Exp. Bot.*, 52:2127-2133, 2001.
- NESMITH, D.S. Soil compaction in double cropped weath and soybean on Ultissol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51:183-186, 1987.
- OLIVEIRA, L.B. Determinação da macro e microporosidade pela mesa de tensão em amostras de solo com estrutura indeformada. *Pesq. Agropec. Bras.*, 3:197-200, 1968.
- PETTER, R.L. Desenvolvimento radicular da soja em função da compactação do solo, conteúdo de água e fertilidade em Latossolo. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 1990. 144p. (Tese de Mestrado)
- REINERT, D. J. Soil structural form and stability induced by tillage in a typic Hapludalf. East Lansing, Michigan State University, 1990. 128p. (Tese de Doutorado)
- RIQUELME, U.F.B. Propriedades físicas e hídricas do solo em sistemas de manejo do feijoeiro. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2004. 78p. (Tese de Mestrado)
- ROSOLEM, C. A.; FERNANDEZ, E. M. & ANDREOTTI, M. Root growth of corn seedlings as affected by soil resistance to penetration. *Pesq. Agropec. Bras.*, 34:821- 828, 1999.
- RUSER, R.; FLESSA, H.; RUSSOW, R.; SCHMIDT, G.; BUEGGER, F. & MUNCH, J.C. Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil moisture and rewetting. *Soil Biol. Biochem.*, 38:263-274, 2006.
- SANTOS, P.A.; CARVALHO, M.P.; FREDDI, O.S.; KITAMURA, A.E.; FREITAG, E.E. & VANZELA, L.S. Correlação linear e espacial entre o rendimento de grãos do feijoeiro e a resistência mecânica à penetração em um Latossolo Vermelho distrófico. *R. Bras. Ci. Solo.*, 29:287-295, 2005.
- SAS Institute. SAS. SAS/STAT Procedure guide for personal computers. Version 5. Cary, 1991.
- SECCO, D.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:797-804, 2004.
- SILVA, R.B.; DIAS JÚNIOR, M.S.; SILVA, F.A.M. & FOLE, S.M. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo dos Cerrados. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:973-983, 2003.
- SILVA, R.H. & ROSOLEM, C. A. Soybean root growth as affected by previous crop and soil compaction. *Pesq. Agropec. Bras.*, 37:855-860, 2002.
- SILVA, V.R. Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2003. 171p. (Tese de Doutorado)
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:191-199, 2000b.
- 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. *Ci. Rural*, 30:795-801, 2000a.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Variabilidade espacial da resistência do solo a penetração em plantio direto. *Ci. Rural*, 34: 399-406, 2004.
- SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C. Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. *Soil Till. Res.*, 35:5-22, 1995.
- SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C. Soil compaction problems in world agriculture. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C., eds. *Soil compaction in crop production*. Amsterdam, Elsevier, 1994. p.1-21.
- SOJKA, R.E. Stomatal closure in oxygen-stressed plants. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 154:269-280, 1992.
- 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. *R. Bras. Eng. Agric. Amb.*, 6:207-212, 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. *C. Rural*, 34:755-760, 2004.
- TAYLOR, H.M. & GARDNER, H. R. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content and strength of soil. *Soil Sci.*, 96:153-156, 1963.
- TAYLOR, H.M. & BRAR, G.S. Effect of soil compaction on root development. *Soil Till. Res.*, 19:111-119, 1991.
- TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M. & PARKER, J.J. Soil strength - Root penetration relations to medium to coarse - textured soil materials. *Soil Sci.*, 102:18-22, 1966.
- TOPP, G.C.; DAVIS, J.L. & ANNAN, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. *Water Res. Res.*, 16 :571-582, 1980.
- TORMENA, C.A. & ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 20: 333-339, 1996.
- TORMENA, C.A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J.C.; COSTA, A.C.S. & FIDALSKI, J. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:1023-1031, 2004.
- WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E.S. & NEVES, J.C.L. Carbono orgânico e estabilidade de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 40:487-494, 2005.