

RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO E RENDIMENTO DA SOJA APÓS INTERVENÇÃO MECÂNICA EM LATOSSOLO VERMELHO SOB PLANTIO DIRETO⁽¹⁾

Marta Sandra Drescher⁽²⁾, Flávio Luiz Foletto Eltz⁽³⁾, José Eloir Denardin⁽⁴⁾, Antônio Faganello⁽⁵⁾ & Gerson Laerson Drescher⁽⁶⁾

RESUMO

A compactação altera, negativamente, várias propriedades do solo, como a capacidade de penetração das raízes e a disponibilidade de água e nutrientes às plantas, restringindo a taxa fotossintética, o crescimento da parte aérea e, por conseguinte, o rendimento da cultura. Nesse sentido, quando a compactação do solo torna-se limitante ao desenvolvimento das culturas, faz-se necessária a adoção de medidas mitigatórias. Nesse contexto, este trabalho objetivou avaliar o efeito residual de intervenções mecânicas mediante aração e escarificação do solo, associadas à semeadora com sulcadores tipo discos e discos + haste, como prática mitigadora da compactação de solo manejado sob sistema plantio direto (SPD), sobre os parâmetros de resistência do solo à penetração e o rendimento da cultura da soja. Para isso, foi realizado um estudo no município de Coxilha, na região norte do Rio Grande do Sul, em um Latossolo Vermelho, em experimento instalado no ano de 2001 em área com histórico de manejo sob SPD. Nessa área, a cada ano um tratamento foi submetido à descompactação mecânica do solo sob SPD mediante uma aração e outro mediante uma escarificação do solo, anterior à implantação da cultura de verão, retornando-se o manejo sob SPD após essa intervenção. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com parcelas subdivididas, com três repetições. Os tratamentos foram compostos pela combinação de 13 sistemas de manejo do solo, alocados na parcela principal, e dois dispositivos sulcadores da semeadora, alocados na subparcela. Assim, os

⁽¹⁾ Extraído da Dissertação de Mestrado do primeiro autor. Recebido para publicação em 02 de fevereiro de 2012 e aprovado em 18 de outubro de 2012.

⁽²⁾ Eng.- Agrônoma, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Bolsista CAPES. CEP 97105-900 Santa Maria (RS). E-mail: martadrescher@gmail.com

⁽³⁾ Eng.- Agrônomo, PhD, Prof. do Departamento de Solos, UFSM. E-mail: flavioeltz@gmail.com

⁽⁴⁾ Eng.- Agrônomo, Dr., Pesquisador da Embrapa-Trigo. Rodovia BR 285, km 294. Caixa Postal 451. CEP 99001-970 Passo Fundo (RS). E-mail: denardin@cnpt.embrapa.br

⁽⁵⁾ Eng. Mecânico, MSc, Pesquisador da Embrapa-Trigo. E-mail: afaganel@cnpt.embrapa.br

⁽⁶⁾ Graduando em Agronomia, UFSM. E-mail: gersondrescher@gmail.com

sistemas de manejo avaliados foram constituídos pela testemunha, representada pela manutenção ininterrupta do SPD por 16 anos; seis períodos de tempo de manejo sob SPD (7,5; 6,5; 5,5; 4,5; 3,5 e 2,5 anos) após uma intervenção mecânica com arado de discos + grade de discos (A); e os mesmos seis períodos após uma intervenção mecânica com escarificador (E). Os níveis alocados na subparcela foram constituídos pela ação de uma semeadora de plantio direto equipada com discos duplos defasados atuando até 7 cm de profundidade e de uma semeadora equipada com discos duplos + haste atuando até 13 cm de profundidade. Os resultados obtidos indicaram que a intervenção mecânica em solo manejado sob SPD consolidado, mediante a prática de escarificação ou aração do solo, apresenta potencial efêmero para mitigar a compactação e promover a melhoria da estrutura do solo, com efeito residual de até dois anos e meio para a resistência do solo à penetração. A utilização de semeadora de plantio direto equipada com sulcador tipo haste + disco apresentou potencial para mitigação da compactação do solo, promovendo a redução da resistência mecânica do solo à penetração na camada de 7 - 15 cm de profundidade. Contudo, o efeito residual da intervenção mecânica para descompactação do solo e a adoção dos diferentes dispositivos de aplicação do adubo no sulco de semeadura não foram eficientes em alterar o rendimento de grãos da cultura da soja na safra agrícola 2008/2009.

Termos de indexação: densidade do solo, compactação do solo, preparo do solo.

SUMMARY: PENETRATION RESISTANCE AND SOYBEAN YIELD AFTER MECHANICAL INTERVENTION ON AN OXISOL UNDER TILLAGE

Compaction negatively affects a number of soil properties, e.g., resistance to root penetration and water and nutrient availability to plants, restricting the photosynthetic rate, shoot growth and consequently, the yield. When soil compaction becomes limiting to crop development, mitigation measures must be adopted. The purpose of this study was to evaluate the residual effect of mechanical soil plowing and chiseling, by a seeder with soil breakers (disks and disks plus short ripper) as mitigation practice of the soil compaction under no-tillage (NT), on soil penetration resistance and soybean yield. In 2001, a study was conducted in Coxilha, in northern Rio Grande do Sul, on an Oxisol, in an area with a sequence of NT management. In this field, every year a treatment of mechanical soil decompression was applied, consisting of plowing and chiseling the soil under NT, before sowing the summer crop, reassuming the NT management after this intervention. The experimental design consisted of randomized blocks in a split-plot design with three replications. The treatments consisted of a combination of 13 systems of soil management in the main plots and two seed drill devices in the subplots. Thus, the management systems were evaluated by the control, represented by the uninterrupted maintenance of NT for 16 years, six NT management periods (7.5, 6.5, 5.5, 4.5, 3.5, and 2.5 years) after one intervention with mechanical disc plow + disc harrow (A) and the same six NT management periods after one mechanical intervention with chiseling (E). The levels in the subplots consisted of the action of a no-till seeder equipped with double discs reaching a depth of 7 cm and a seeder equipped with double discs + short ripper reaching a depth of 13 cm. Results indicated that the mitigating effect on compaction and on the improvement of soil structure of the mechanical intervention in soil under consolidated NT consisting of soil chiseling or plowing is short-lived, with a residual effect of up to two and a half years for penetration resistance. The use of a no-till seeder drill equipped with short ripper + disc seeder has potential for mitigation of soil compaction, by reducing mechanical penetration resistance in the 7-15 cm layer. Nevertheless, the residual effect of mechanical intervention for soil decompression and the adoption of different devices for fertilizer application in the plant furrow were not effective in altering the soybean yield in the 2008/2009 growing season.

Index terms: soil density, soil compaction, soil preparation.

INTRODUÇÃO

A resistência à penetração é uma propriedade física do solo que influencia o crescimento de raízes e serve como base à avaliação do efeito do sistema de manejo do solo sobre o ambiente radicular (Tavares Filho & Ribon, 2008). A determinação da resistência do solo à penetração é realizada mediante a resistência que o solo oferece à penetração de um instrumento de sondagem (penetrômetro), chamado de "índice de cone" (Bengough et al., 2001; Borges et al., 2004). O índice reflete o comportamento do solo quanto à compactação, ao conteúdo de água (Saffih-Hdadi et al., 2009), à granulometria e tipo de argila. É dependente de atributos do solo como textura e de propriedades como porosidade, estrutura, estabilidade de agregados e teor de água (Ribon & Tavares Filho, 2008). Com o uso do penetrômetro, é possível identificar camadas com maior resistência à penetração e, com isso, inferir a presença ou não de compactação do solo, o grau da compactação e a profundidade da camada compactada no perfil do solo e, com essas informações, optar pela tecnologia mais adequada para a descompactação.

O incremento da compactação do solo promove, além da redução da capacidade de penetração das raízes no solo (Batey & McKenzie, 2006), a alteração no equilíbrio da proporção de gases do solo e da disponibilidade de água e nutrientes às plantas (Batey & McKenzie, 2006; Birkas, 2008). Em consequência, o funcionamento bioquímico da planta é modificado, restringindo, entre outros fatores, a taxa fotossintética, o crescimento da parte aérea e, com isso, o rendimento da cultura (Beutler & Centurion, 2004).

O processo de compactação do solo está associado ao sistema de manejo do solo. Assim, em áreas manejadas sob preparo convencional do solo observa-se a desagregação excessiva da camada arável, o encrostamento superficial e a formação de camadas coesas ou compactadas, denominadas pé-de-grade ou pé-de-arado (Gabriel Filho et al., 2000). A formação dessas camadas decorre do tráfego de trator no sulco do arado, bem como da própria ação da grade ou dos discos dos arados. No sistema plantio direto (SPD) a pressão aplicada na superfície do solo, que se encontra mais resistente à compactação, apresenta dinâmica diferenciada quando comparada com o preparo convencional (Veiga et al., 2008). Entre as causas citadas como principais condicionadoras desse processo tem-se o acúmulo das pressões provocadas pelo tráfego de máquinas agrícolas, o qual altera o arranjo do espaço poroso do solo, modificando a curva característica de água no solo (Tarawaly et al., 2004), a acomodação natural de partículas do solo (Carvalho Jr. et al., 1998) e o manejo do solo em condições inadequadas de umidade. Nesse sentido, diversos trabalhos têm indicado que a camada de maior compactação e restrição ao crescimento radicular, em áreas de plantio direto, está localizada entre 8 e 15 cm (Genro Junior et al., 2004; Suzuki et al., 2008).

Esse cenário é verificado na região de clima subtropical úmido do Brasil, em que áreas manejadas sob SPD têm apresentando tendência à intensa degradação estrutural da camada subsuperficial do solo, onde a compactação do solo é um dos fatores mais importantes. Essa compactação faz-se perceptível por alterações de propriedades físicas do solo, alterações morfológicas de raízes de plantas e percepção, ocasional, de redução de produtividade das culturas (Denardin et al., 2008)

Nesse sentido, quando a compactação do solo se torna limitante ao desenvolvimento das culturas, faz-se necessária a adoção de medidas mitigatórias (Defra, 2005). Para isso, a prática corriqueira tem sido a escarificação do solo que, ao romper a camada superficial encrostada e a camada subsuperficial compactada, eleva o volume do solo, proporcionando aumento da porosidade e redução da densidade do solo (Kochhann & Denardin, 2000). Com o mesmo objetivo, eventualmente, também tem sido empregada a aração como prática mitigadora da compactação do solo (Garrido et al., 2011). Todavia, essas práticas, além de serem onerosas, não necessariamente implicam aumento do rendimento das culturas, ocasionando, por vezes, até mesmo sua redução (Veiga et al., 2008). Além disso, Busscher et al. (2002) chamam a atenção para o fato de que esse efeito é de curta duração, devido ao processo natural de reconsolidação do solo, resultante da ação da chuva e dos ciclos de umedecimento e secagem (Hillel, 1998), mesmo na ausência de tráfego.

Esse cenário tem levado à procura por métodos alternativos de mitigação da compactação do solo àqueles tradicionalmente empregados. Nesse sentido, tem sido preconizado o emprego de semeadoras equipadas com hastes associadas ao disco de corte, para propiciar a descompactação do solo no local específico onde se desenvolverão as raízes da planta cultivada (Silva et al., 2001).

Este trabalho objetivou avaliar o efeito residual de intervenções mecânicas esporádicas mediante aração e escarificação do solo, associadas à ação de semeadora com sulcadores tipo discos duplos defasados e discos duplos + haste, como prática mitigadora da compactação de solo manejado sob SPD, sobre os parâmetros de resistência do solo à penetração e rendimento da cultura da soja.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido no município de Coxilha, na região norte do Estado do Rio Grande do Sul, localizado nas coordenadas geográficas de 28° 10' 18,7" de latitude Sul e 52° 22' 39,89" de longitude Oeste, com altitude de 695 m. O solo da área de estudo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico húmico (Streck et al., 2008), de textura argilosa (Quadro 1). O clima da região, segundo a classificação

de Köppen, é subtropical úmido, Cfa, com regime pluviométrico bem distribuído durante o ano e precipitação pluvial normal variando de 1.300 a 1.800 mm ano⁻¹, com maiores valores em maio e junho (Nimer, 1989).

O experimento foi instalado em 2001, em uma área de lavoura manejada sob SPD com rotação de culturas e manutenção dos resíduos culturais sobre a superfície do solo desde 1993. O delineamento experimental adotado foi de blocos ao acaso com parcelas subdivididas, com três repetições.

Os tratamentos foram compostos pela combinação de 13 sistemas de manejo do solo (Quadro 2), alocados na parcela principal (12 x 8 m), e dois dispositivos sulcadores da semeadora, alocados na subparcela (6 x 8 m). Assim, os níveis alocados na subparcela, foram constituídos pela ação de uma semeadora de plantio direto equipada com discos duplos defasados atuando até 7 cm de profundidade, tanto para a deposição de fertilizante como para a deposição das sementes no solo, e de uma semeadora equipada com discos duplos + haste, onde a deposição de fertilizantes é realizada pelo mecanismo de haste atuando em profundidade de 13 cm.

O modelo de produção adotado compreendeu: trigo (*Triticum aestivum* L.)/soja (*Glycine max* (L.) Merr.); ervilhaca (*Vicia sativa* L.)/milho (*Zea mays* L.) e aveia-branca (*Avena sativa* L.)/soja. A adubação de base, em cada safra agrícola e com especificidade para cada espécie cultivada, foi feita na linha de semeadura, em conformidade com os resultados das análises de fertilidade do solo processadas em amostras de solo coletadas na camada de 0-10 cm (SBCS/CQFS, 2004). As mobilizações de solo com arações e escarificações foram realizadas nas safras de verão, antecedendo o estabelecimento das culturas de soja e milho.

Os parâmetros avaliados foram a resistência mecânica do solo à penetração e o rendimento da cultura da soja no ano agrícola 2008/2009. A avaliação do rendimento da cultura da soja foi realizada no mês de abril de 2009. Para a determinação, efetuou-se a colheita mecânica, sendo empregada colhedora automatizada para parcelas, marca Wintersteiger, com avaliação em toda a área útil da parcela, sendo os resultados expressos em kg ha⁻¹.

Quadro 1. Composição granulométrica do Latossolo Vermelho distrófico húmico da área experimental do estudo

| Camada | Areia | Silte | Argila | Densidade de partícula |
|--------|--------------------|-------|--------|------------------------|
| cm | g kg ⁻¹ | | | Mg m ⁻³ |
| 0-7 | 317 | 209 | 474 | 2,70 |
| 7-15 | 304 | 202 | 494 | 2,68 |
| 15-20 | 307 | 203 | 490 | 2,70 |
| 0-20 | 306 | 193 | 501 | 2,68 |

A resistência do solo à penetração, por sua vez, foi avaliada no mês de junho de 2009, por dois métodos: o primeiro, realizado diretamente no campo, dois dias após precipitação pluvial, em solo com umidade gravimétrica de 22 % até a profundidade de 40 cm; e o outro, em laboratório, com amostras com teor de umidade estabilizado à tensão de sucção de 6 kPa. Assim, na avaliação pelo primeiro método, utilizou-se um penetrômetro da marca Falker, modelo PLG 1020, o qual atinge 40 cm de profundidade. O segundo método de avaliação da resistência à penetração foi realizado em laboratório, sendo empregado o penetrômetro eletrônico de bancada, modelo MA 933, da marca MARCONI, dotado de variador eletrônico de velocidade e sistema de registro de dados (Tormena et al., 2007). Para isso, foram coletadas amostras de solo indeformado em anéis volumétricos, de aço inoxidável, medindo 61,58 cm³, 2,5 cm de altura por 5,6 cm de diâmetro.

A coleta das amostras foi feita em três profundidades, adotando-se, para estratificação das camadas de solo, o método do perfil cultural (Tavares Filho et al., 1999), visando à homogeneidade estrutural do solo por camada. A amostragem foi efetuada em um ponto de cada unidade experimental correspondente às subparcelas, de modo que fossem coletadas duas amostras em cada parcela principal. Para atingir a condição de uniformidade na umidade das amostras, estas foram saturadas por um período de 48 h e posteriormente encaminhadas à mesa de tensão, onde permaneceram à tensão de 6 kPa.

Os resultados dos parâmetros avaliados foram submetidos à análise de variância para verificação da existência de interação entre os fatores da parcela principal e subparcela e ao teste de Tukey para comparação múltipla de médias, a 5 %.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise estatística dos dados indicou a inexistência de interação entre os sistemas de manejo (parcela principal) e os dispositivos sulcadores da semeadora (subparcela), sendo realizado o teste de comparação múltipla de médias para cada um dos fatores estudados.

Resistência mecânica do solo à penetração

A resistência à penetração, avaliada pelo método do penetrômetro eletrônico de bancada (Quadro 3), não diferiu entre os diferentes períodos de adoção do SPD, em nenhuma das camadas avaliadas. Um dos fatores que pode ter contribuído para a ausência de diferença estatística é o elevado coeficiente de variação dos dados: 57,15; 30,85 e 31,72 % para as camadas de 0-7, 7-15 e 15-22 cm, respectivamente. Esses resultados corroboram os obtidos por Castro (1995) em Latossolo Roxo e Ribon et al. (2003) em Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, os quais obtiveram coeficiente de

Quadro 2. Caracterização dos tratamentos componentes do estudo

| Tratamento | Safra sob SPD ⁽¹⁾ | Ano sob SPD ⁽²⁾ |
|--|------------------------------|----------------------------|
| T - Testemunha - SPD contínuo | 16 safras + 16 safras | 8 anos + 8 anos |
| A7 - aração do solo - verão 2001/02 | 15 safras sob SPD | 7,5 anos sob SPD |
| E7 - escarificação do solo - verão 2001/02 | 15 safras sob SPD | 7,5 anos sob SPD |
| A6 - aração do solo - verão 2002/03 | 13 safras sob SPD | 6,5 anos sob SPD |
| E6 - escarificação do solo - verão 2002/03 | 13 safras sob SPD | 6,5 anos sob SPD |
| A5 - aração do solo - verão 2003/04 | 11 safras sob SPD | 5,5 anos sob SPD |
| E5 - escarificação do solo - verão 2003/04 | 11 safras sob SPD | 5,5 anos sob SPD |
| A4 - aração do solo - verão 2004/05 | 9 safras sob SPD | 4,5 anos sob SPD |
| E4 - escarificação do solo - verão 2004/05 | 9 safras sob SPD | 4,5 anos sob SPD |
| A3 - aração do solo - verão 2005/06 | 7 safras sob SPD | 3,5 anos sob SPD |
| E3 - escarificação do solo - verão 2005/06 | 7 safras sob SPD | 3,5 anos sob SPD |
| A2 - aração do solo - verão 2006/07 | 5 safras sob SPD | 2,5 anos sob SPD |
| E2 - escarificação do solo - verão 2006/07 | 5 safras sob SPD | 2,5 anos sob SPD |

(1) SPD: Sistema Plantio Direto. (2) O tratamento testemunha manteve-se sob SPD por oito anos antes do ensaio e por oito anos durante o ensaio.

Quadro 3. Resistência à penetração avaliada pelo método do penetrômetro eletrônico de bancada em Latossolo Vermelho distrófico húmico sob SPD com uso de semeadora equipada com discos e com haste + discos

| Tratamento | Resistência à Penetração | | |
|---------------|--------------------------|--------------------|--------------------|
| | Camada, cm | | |
| | 0-7 | 7-15 | 15-22 |
| | MPa | | |
| T | 1,17 ^{ns} | 1,97 ^{ns} | 1,82 ^{ns} |
| A7 | 1,09 | 1,77 | 1,40 |
| A6 | 0,61 | 1,80 | 1,57 |
| A5 | 0,92 | 1,48 | 1,41 |
| A4 | 1,17 | 1,64 | 1,71 |
| A3 | 1,14 | 1,46 | 1,40 |
| A2 | 1,00 | 1,27 | 1,50 |
| E7 | 1,14 | 1,43 | 1,32 |
| E6 | 0,90 | 1,59 | 1,28 |
| E5 | 0,74 | 1,61 | 1,48 |
| E4 | 1,07 | 1,74 | 1,61 |
| E3 | 0,91 | 1,72 | 1,22 |
| E2 | 0,75 | 1,11 | 1,29 |
| CV (%) | 57,15 | 30,85 | 31,72 |
| Disco | 1,02 ^{ns} | 1,69 a | 1,48 ^{ns} |
| Haste + Disco | 0,92 | 1,48 b | 1,45 |
| CV (%) | 34,0 | 27,0 | 30,0 |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5 %. ^{ns} Médias na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5 %.

variação de, respectivamente, 41,08 e 42,85 %, prejudicando a obtenção de diferenças estatísticas entre os dados.

Resultado similar foi observado também na avaliação da resistência mecânica do solo à penetração pelo método do penetrômetro de campo, para as áreas onde a intervenção no SPD foi realizada mediante aração (Figura 1a). Nessa avaliação, percebe-se incremento nos valores de resistência à penetração até aproximadamente 15 cm de profundidade. Abaixo dessa camada, os resultados mantiveram-se aproximadamente constantes, apresentando redução a partir dos 36 cm. Esses resultados encontram-se em consonância com o trabalho de Beutler et al. (2001), o qual verificou gradiente crescente de resistência à penetração com o aumento da profundidade, atingindo a máxima resistência a 15-20 e 20-30 cm para o SPD com cultivo contínuo com milho e cultivo em rotação com milho e feijão, respectivamente.

Contudo, a análise comparativa entre os diferentes períodos de adoção do SPD, a partir de uma aração (Figura 1a), não acusou diferenças estatísticas nas camadas mais superficiais do solo, ocorrendo diferenças apenas para as camadas de 36 e 40 cm. Nestas camadas, a testemunha, manejada há 16 anos sob SPD, apresentou a maior resistência à penetração, e as áreas submetidas à aração há dois anos e meio (A2) e há quatro anos e meio (A4), os menores valores.

Esses resultados não eram esperados, uma vez que a intervenção no SPD mediante aração não ultrapassou os 25 cm de profundidade. Assim, esperava-se o maior valor de resistência à penetração, com diferença entre os tratamentos, até a profundidade de 25 cm, caracterizando a ação do arado de discos e o tráfego de máquinas, conforme observado por Castro (1995) em Latossolo Roxo cultivado com milho.

Todavia, Pierce et al. (1992), estudando os efeitos do modo de preparo do solo em propriedades físicas de um solo franco-arenoso, encontraram resultados que

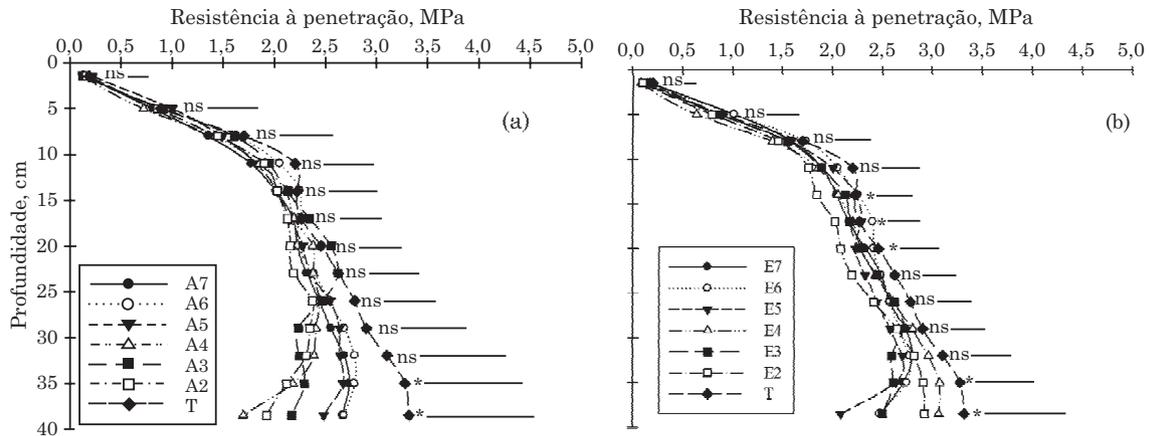


Figura 1. Resistência à penetração do solo em área submetida à aração há 7,5 anos (A7), 6,5 anos (A6), 5,5 anos (A5), 4,5 anos (A4), 3,5 anos (A3) e 2,5 anos (A2) e parcela testemunha manejada há 16 anos sob SPD (T) (a) e resistência do solo à penetração em área submetida à escarificação há 7,5 anos (E7), 6,5 anos (E6), 5,5 anos (E5), 4,5 anos (E4), 3,5 anos (E3) e 2,5 anos (E2); e parcela testemunha manejada há 16 anos sob SPD (T) (b). As barras horizontais correspondem à diferença mínima significativa (Tukey a 5%) dos valores de resistência à penetração para cada profundidade.

corroboram aqueles obtidos neste estudo. Esses autores observaram efeitos residuais na densidade e porosidade do solo dois anos após intervenção mecânica a 35 cm de profundidade, indicando que diferenças entre os tratamentos em profundidades superiores a 30 cm podem estar, ainda, associadas ao processo de revolvimento do solo.

Contrariamente, nas parcelas cuja intervenção no SPD foi realizada mediante escarificação (Figura 1b), a diferença entre os sistemas de manejo do solo pode ser percebida mais claramente. Assim, na camada situada de 0-12 cm, não houve diferenças entre os tratamentos. Esse aspecto pode ser atribuído à ação escarificadora dos sulcadores da semeadora, corroborando o trabalho de Beutler et al. (2001). Todavia, abaixo dessa camada, as intervenções mecânicas são devidas, exclusivamente, à escarificação, ocasionando, portanto, diferenças entre os tratamentos.

Dessa forma, na profundidade de 12 cm, observa-se que o tratamento E2 (área escarificada há dois anos e meio) apresentou a menor resistência à penetração, diferindo da testemunha (16 anos sob SPD). Os demais tratamentos (períodos de adoção do SPD a partir da escarificação) apresentaram comportamento intermediário. Esses resultados indicam que os efeitos oriundos da escarificação do solo permaneceram até dois anos e meio após a intervenção.

Esses resultados contradizem trabalhos como os de Secco & Reinert (1997), que encontraram efeito residual da escarificação em Latossolo Vermelho sob semeadura direta apenas até 10 meses após o preparo, ou de Botta et al. (2006), que relatam que a ação do escarificador no solo possui efeito de redução imediata dos problemas oriundos da compactação, verificando recompactação do solo dois anos após a escarificação.

Outros estudos indicam que a duração pode ser muito variável, indo desde alguns meses (Evans et al., 1996; Hamilton-Manns et al., 2002) até alguns anos (Twonlow et al., 1994), o que pode estar associado com a textura do solo (Pierce et al., 1992). Isso é indicativo de que a duração do efeito da escarificação no solo ainda não é claramente conhecida (Batey, 2009).

Para as profundidades de 15 e 18 cm, a resistência à penetração da área escarificada há seis anos e meio (E6) chega a ser igual e superior, respectivamente, à da testemunha, o que pode indicar que intervenções que envolvam mobilização do solo, em áreas sob SPD contínuo, podem contribuir para deterioração de sua estrutura. Isso é atribuído à deterioração da resistência dos agregados, que, especialmente em solos muito compactados, resulta em solo mais fraco e menos estável, sendo mais suscetível a uma subsequente compactação mais intensa (Canarache et al., 2000). Segundo Kay & Angers (1999), esse fato também pode ser atribuído ao aumento na taxa de dispersão de argila, a qual pode resultar em aumento na resistência do solo, em razão de a argila dispersa funcionar como material cimentante com o secamento do solo.

Com base na análise da figura 1, é possível perceber ainda a existência de valores de resistência à penetração superiores a 2 MPa, especialmente na camada situada entre 10 e 12 cm. Essa informação mostra-se relevante quando o valor de 2 MPa é assumido como valor crítico de resistência à penetração, a partir do qual o desenvolvimento radicular das culturas pode ser grandemente prejudicado (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1999), com reflexos negativos sobre o rendimento das culturas agrícolas, embora outros trabalhos tenham indicado que o limite crítico possa atingir 2,5 MPa em solos

sob pastagem (Leão et al., 2004), 3,0 MPa em solos sob floresta (Zou et al., 2000) e 3,5 MPa em solo cultivado em longo prazo sob plantio direto (Tormena et al., 2007).

A utilização de semeadora munida com haste aliada a disco de corte foi eficaz na redução da resistência do solo à penetração mecânica, especialmente na camada de 7-15 cm. Tais resultados puderam ser observados tanto na avaliação da resistência à penetração em laboratório (Quadro 2) quanto na avaliação efetuada diretamente no campo (Figura 2). Esse comportamento pode ser considerado benéfico para a melhoria da estrutura do solo, uma vez que essa camada coincide com aquela de maior restrição ao crescimento radicular em áreas de SPD.

Assim, os resultados obtidos sustentam a hipótese de que o emprego de elementos sulcadores, tipo haste de ação profunda, projetada para atuar junto à camada compactada, em semeadoras de plantio direto, apresenta potencial de mitigar a compactação do solo, a ser explorado em áreas manejadas sob SPD, principalmente em solos mais argilosos.

Rendimento

Os distintos períodos de adoção do SPD, obtidos mediante intervenção mecânica em área de SPD consolidado, não alteraram o rendimento da cultura da soja no ano agrícola 2008/2009 (Figura 3a). Considerando que o rendimento está associado a fatores como propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, manejo dado à cultura e fator climático, a ausência de diferenças entre os tratamentos deste estudo pode estar associada à distribuição do regime pluviométrico na região durante todo o ciclo de cultivo da cultura. Assim, condições climáticas ideais podem

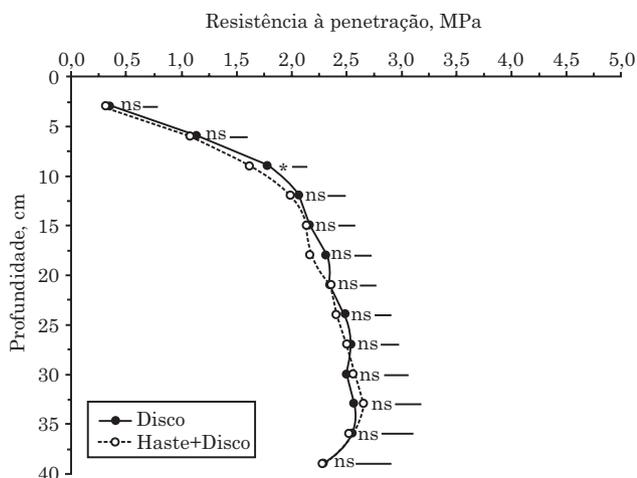


Figura 2. Resistência do solo à penetração em parcelas com semeadura realizada com semeadoras equipadas com sulcadores tipo discos e haste + discos. As barras horizontais correspondem à diferença mínima significativa (Tukey a 5 %) dos valores de resistência à penetração para cada profundidade.

ter minimizado os efeitos de um solo com tendência à compactação (Lipiec & Simota, 1994; Batey, 2009). Com isso, o sistema radicular da cultura pode ter obtido água e nutrientes em quantidade satisfatória na camada superficial do solo, descompactada, proporcionando bons rendimentos mesmo em locais com presença de camadas subsuperficiais compactadas.

De forma similar aos diferentes períodos de adoção do SPD obtidos a partir de aração ou escarificação, a utilização do dispositivo de aplicação do adubo no sulco de semeadura (discos duplos defasados e haste + discos) também não promoveu alterações significativas no rendimento da cultura da soja no ano agrícola 2008/2009 (Figura 3b). Essa observação

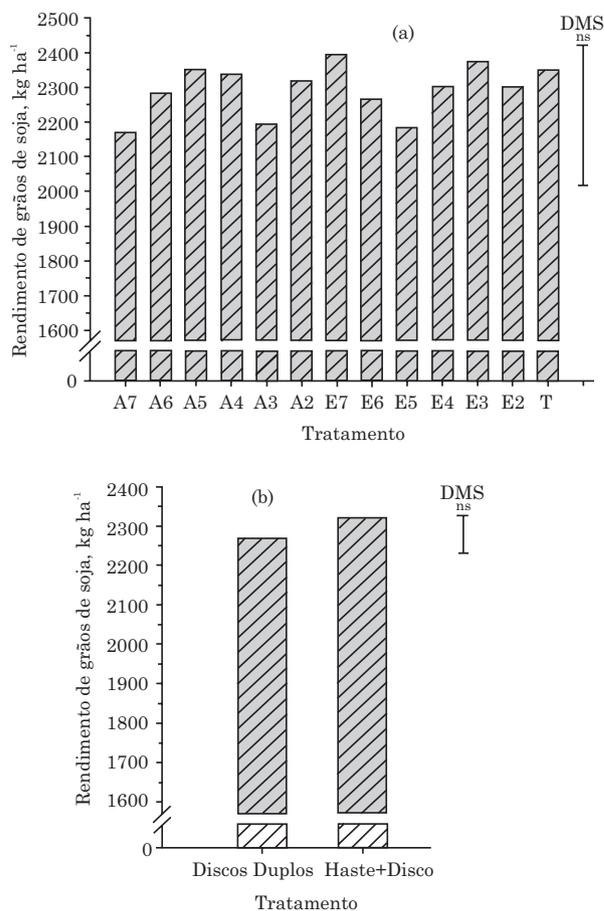


Figura 3. Rendimento de grãos da cultura da soja, ano agrícola 2008/2009: (a) em área submetida à aração há 7,5 anos (A7), 6,5 anos (A6), 5,5 anos (A5), 4,5 anos (A4), 3,5 anos (A3) e 2,5 anos (A2); área submetida à escarificação há 7,5 anos (E7), 6,5 anos (E6), 5,5 anos (E5), 4,5 anos (E4), 3,5 anos (E3) e 2,5 anos (E2); e testemunha manejada há 16 anos sob SPD (T) e (b) em parcelas com semeadura realizada com semeadoras equipadas com sulcadores tipo discos e haste + discos. A barra vertical corresponde à diferença mínima significativa (Tukey a 5 %) para o rendimento de grãos da cultura de soja.

foi igualmente creditada à distribuição dos índices pluviométricos durante o ciclo da cultura, a qual pode ter amenizado o efeito prejudicial da compactação da camada subsuperficial do solo sobre o crescimento de raízes.

CONCLUSÕES

1. A intervenção mecânica em solo manejado sob SPD consolidado, mediante a prática de escarificação ou aração, apresenta potencial efêmero para mitigar a compactação e promover a melhoria da estrutura do solo, com efeito residual de até dois anos e meio para a resistência do solo à penetração.

2. A utilização de dispositivo de aplicação do adubo no sulco de semeadura tipo haste + disco apresentou potencial para mitigação da compactação do solo, promovendo a redução da resistência mecânica do solo à penetração na camada de 7-15 cm de profundidade.

3. O efeito residual de intervenção mecânica para descompactação do solo manejado sob SPD não alterou o rendimento de grãos da cultura da soja na safra agrícola 2008/2009, comparativamente à área manejada há 16 anos sob SPD consolidado.

AGRADECIMENTO

À Embrapa Trigo, por permitir o uso da área experimental, pela coordenação do projeto e pelo apoio técnico e financeiro para a execução deste trabalho.

LITERATURA CITADA

- BATEY, T. Soil compaction and soil management - a review. *Soil Use Manage.*, 25:335-345, 2009.
- BATEY, T. & MCKENZIE, D.C. Soil compaction: Identification directly in the field. *Soil Use Manage.*, 22:123-131, 2006.
- BENGOUGH, A.G.; CAMPBELL, D.J. & O'SULLIVAN, M.F. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. In: SMITH, K.A. & MULLINS, C.E., eds. *Soil and environmental analysis: Physical methods*. 2.ed. New York, Marcel Dekker, 2001. p.377-403.
- BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; CRUZ, J.C. & PEREIRA, I.A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos Cerrados. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:167-177, 2001.
- BEUTLER, A.N. & CENTURION, J.F. Soil compaction and fertilization in soybean productivity. *Sci. Agric.*, 61:626-631, 2004.
- BIRKAS, M. *Environmentally-sound adaptable tillage*. Budapest, Akademia Kiado, 2008. 354p.
- BORGES, J.R.; PAULETTO, E.A.; SOUSA, R.O.; PINTO, L.F.S. & LEITZKE, V.W. Resistência à penetração de um gleissolo submetido a sistemas de cultivo e culturas. *R. Bras. Agroci.*, 10:83-86, 2004.
- BOTTA, G.F.; JORAJURIA, D.; BALBUENA, R.; RESSIA, M.; FERRERO, C.; ROSATTO, H. & TOURN, M. Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annuus* L.) yields. *Soil Tillage Res.*, 1:64-172, 2006.
- BUSSCHER, W.J.; BAUER, P.J. & FREDERICK, J.R. Recompaction of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. *Soil Tillage Res.*, 68:49-57, 2002.
- CANARACHE, A.; HORN, R. & COLIBAS, I. Compressibility of soils in a long term field experiment with intensive deep ripping in Romania. *Soil Tillage Res.*, 56:185-196, 2000.
- CARVALHO JÚNIOR, I.A.; FONTES, L.E.F. & COSTA, L.M. Modificações causadas pelo uso e formação de camadas compactadas e, ou, adensadas em um Latossolo Vermelho-Escuro textura média, na região do Cerrado. *R. Bras. Ci. Solo*, Viçosa, 22:505-514, 1998.
- CASTRO, O.M. Comportamento físico e químico de um Latossolo Roxo em função do seu preparo na cultura do milho (*Zea mays* L.). Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1995. 174p. (Tese de Doutorado)
- DEFRA. *Cross compliance guidance for soil management*. London, Defra Publications, 2005. 76p.
- DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; SANTI, A.; FAGANELLO, A. & SATTTLER, A. Efeito da consorciação milho-braquiária (*Brachiaria brizantha*) na mitigação da compactação do solo. *Passo Fundo, Embrapa Trigo, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento Online*, 2008. 13p. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/bp/p_bp54.htm>.
- EVANS, S.D.; LINDSTROM, M.J.; VOORHEES, W.B.; MONCRIEF, J.F. & NELSON, G.A. Effect of subsoiling and subsequent tillage on soil bulk density, soil moisture and corn yield. *Soil Tillage Res.*, 38:35-46, 1996.
- GABRIEL FILHO, A.; PESSOA, A.C. S.; STROHHAECKER, L. & HELMICH, J.J. Preparo convencional e cultivo mínimo do solo na cultura de mandioca em condições de adubação verde com ervilhaca e aveia preta. *Ci. Rural*, 30:953-957, 2000.
- GARRIDO, L.R.; MADEJÓN, E.; MURILLO, J.M. & MORENO, F. Soil quality alteration by mouldboard ploughing in a commercial farm devoted to no-tillage under Mediterranean conditions. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 140:182-190, 2011.
- 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. *R. Bras. Ci. Solo*, Viçosa, 28:477-484, 2004.
- HAMILTON-MANNS, M.; ROSS, C.W.; HORNE, D.J. & BAKER, C.J. Subsoil loosening does little to enhance the transition to no-tillage on a structurally degrade soil. *Soil Tillage Res.*, 68:109-119, 2002.

- HILLEL, D. Environmental soil physics. New York, Academic Press, 1998. 770p.
- KAY, B.D. & ANGERS, D.A. Soil structure. In: SUMNER, M.E., ed. Handbook of soil science. Boca Raton, CRC Press, 1999. p.229-276.
- KOCHHANN, R.A. & DENARDIN, J.E. Implantação e manejo do sistema plantio direto. Passo Fundo, Embrapa-CNPT, 2000. 36p.
- LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S. & EUCLIDES, V.P.B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. R. Bras. Ci. Solo, 28:415-423, 2004.
- LIPIEC, J. & SIMOTA, C. Role of soil and climate factors in influencing crop responses to soil compaction in Central and Eastern Europe. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C., eds. Soil compaction in crop production. Amsterdam, Elsevier, 1994. p.365-390.
- NIMER, E. Climatologia do Brasil. 2.ed. Rio de Janeiro, IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1989. 442p.
- PIERCE, F.J.; FORTIN, M.C. & STATON, M.J. Immediate and residual effects of zone-tillage in rotation with no-tillage on soil physical properties and corn performance. Soil Tillage Res., 24:149-165, 1992.
- RIBON, A.A.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C. & PEREIRA, G.T. Densidade e resistência à penetração de solos cultivados com seringueira sob diferentes manejos. Acta. Sci. Agron., 25:13-17, 2003.
- RIBON, A.A. & TAVARES FILHO, J. Estimativa da resistência mecânica à penetração de um Latossolo Vermelho sob cultura perene no norte do estado do Paraná. R. Bras. Ci. Solo, 32:1817-1825, 2008.
- SAFFI-HADADI, K.; DÉFOSSEZ, P.; RICHARD, G.; CUI, Y.-J.; TANG, A.M. & CHAPLAIN, V. An evaluation of the susceptibility of french surface layers soil to compaction at various water contents and bulk densities. Soil Tillage Res., 105:96-103, 2009.
- SECCO, D. & REINERT, D.J. Efeitos imediato e residual de escarificadores em Latossolo Vermelho-Escuro sob plantio direto. Eng. Agríc., 16:52-61, 1997.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. Soil Sci. Soc. Am. J., 58:1775-1781, 1994.
- SILVA, A.R.B.; BENEZ, S.H.; MAHL, D.; LEITE, M.A.S.; PONTES, J.R.; GREGO, C.R.; MARQUES, J.P. & COSTA, A.M. Avaliação de uma semeadora-adubadora de plantio direto em função de diferentes mecanismos sulcadores e velocidades de deslocamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. Resumo expandido... Foz do Iguaçu: CONBEA, 2001. CD-ROM.
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO - COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - SBCS-CQFS-RS/SC. Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. Porto Alegre, SBCS/Núcleo Regional Sul/UFRGS, 2004. 400p.
- STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E. & PINTO L.F.S. Solos do Rio Grande do Sul. 2.ed. Porto Alegre, Emater/RS, 2008. 222p.
- SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & LIMA, C.L.R. de. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do rio grande do sul. R. Bras. Ci. Solo, 32:963-973, 2008.
- TARAWALY, M.A.; MEDINA, H.; FRÓMETA, M.E & ITZA, C.A. Field compaction at different soil-water status: effects on pore size distribution and soil water characteristics of a Rhodic Ferralsol in Western Cuba. Soil Tillage Res., 76:95-103, 2004.
- TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M.F.; MEDINA, C.C.; BALBINO, L.C. & NEVES, C.S.V.J. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. R. Bras. Ci. Solo, 23:393-399, 1999.
- TAVARES FILHO, J. & RIBON, A.A. Resistência do solo à penetração em resposta ao número de amostras e tipo de amostragem. R. Bras. Ci. Solo, 32:487-494, 2008.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. Soil Tillage Res., 52:223-232, 1999.
- TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J. & COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférrico sob sistemas de plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 31:211-219, 2007.
- TWONLOW, S.J.; PARKINSON, R.J. & REID, I. Temporal changes in soil physical conditions after deep loosening of a silty clay loam in SW England. Soil Tillage Res., 31:31-47, 1994.
- VEIGA, M.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & KAISER, D.R. Short and long-term effects of tillage systems and nutrient sources on soil physical properties of a Southern Brazilian Hapludox. R. Bras. Ci. Solo, 32:1437-1446, 2008.
- ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G. & HUDSON, I. Least limiting water range: A potential indicator of physical quality of forest soils. Aust. J. Soil Res., 28:947-958, 2000.