

Manejo da Compactação do Solo em Sistemas de Produção de Soja sob Semeadura Direta

1. Introdução

A compactação do solo é um dos principais problemas observados em áreas conduzidas sob semeadura direta, principalmente naquelas localizadas sobre solos de textura argilosa. Além de reduzir a produtividade das culturas, a compactação prejudica o desempenho das máquinas agrícolas e a qualidade do ar e da água. Para manejar adequadamente a compactação do solo em semeadura direta, é necessário, em primeiro lugar, conhecer como esse processo ocorre, os prejuízos que ocasiona aos diversos componentes dos sistemas de produção e ao ambiente, as metodologias e indicadores disponíveis para a sua detecção e monitoramento, e as medidas que podem ser adotadas para prevenir ou corrigir esse problema. Diante dessa demanda, o objetivo do presente trabalho é disponibilizar, aos produtores e técnicos ligados a sistemas de produção que incluam a soja, informações atualizadas a respeito de todos os aspectos referidos anteriormente, para que o problema da compactação do solo, uma vez detectado, possa ser controlado de modo rápido, eficiente e com um mínimo de prejuízos à sustentabilidade econômica e ambiental da propriedade.

2. Conceito e caracterização do processo de compactação do solo

A compactação do solo é definida como sendo o processo de redução de volume (compressão) de um solo não saturado por causas de natureza antropogênica, o qual resulta na diminuição do espaço poroso e, em decorrência, na expulsão de ar e, em alguns casos, de água. Dessa forma, a compactação do solo diferencia-se de outros processos com os quais é normalmente confundida, como a consolidação (compressão de um solo saturado por água) e o adensamento (redução do volume em virtude de processos naturais, como os relacionados à formação do solo). A condição física resultante do processo de compactação do solo é denominada grau ou estado de compactação, de forma que qualquer solo apresenta um determinado grau de compactação. Em geral, um solo é considerado compactado apenas quando a magnitude do grau de compactação ultrapassa um determinado nível crítico, a partir do qual se observa restrição ao desenvolvimento das plantas.

A compactação do solo pode ser superficial, quando ocorre sobre (selamento superficial e formação de crostas) ou no interior da camada arável (horizonte Ap), ou subsuperficial, quando ocorre abaixo desta camada. Esses dois processos constituem-se em problemas distintos, tendo em vista as diferenças marcantes entre os mesmos no que se refere às causas, efeitos, persistência e formas de controle. Enquanto os prejuízos sobre o desenvolvimento das plantas são maiores quando o solo se encontra superficialmente compactado, devido a maior limitação do volume de solo potencialmente explorável pelas raízes, a compactação subsuperficial é mais persistente, pois os efeitos dos agentes descompactantes naturais, como os ciclos de umedecimento e secamento, a matéria orgânica e a atividade biológica das raízes e macro e meso fauna do solo, são atenuados com o aumento da profundidade. Além disso, as alternativas artificiais para eliminar a compactação subsuperficial (escarificação e subsolagem), são econômica e energeticamente dispendiosas, tecnicamente difíceis de serem realizadas (exigem um baixo teor de água em todo o perfil a ser mobilizado), nem sempre eficientes e podem tornar o subsolo mais suscetível à recompactação.

O processo de compactação do solo é bastante complexo, de forma que a sua compreensão exige conhecimentos básicos de física e mecânica de solos. De maneira simplificada, a compressão do solo e, conseqüentemente, o aumento do seu grau de compactação, somente ocorre quando a pressão aplicada ao solo ultrapassar a resistência do mesmo à deformação. Quando isso acontece, observa-se, num primeiro momento, o rearranjo dos agregados e, em seguida, o rompimento (cisalhamento) dos mesmos. Em decorrência desse processo, os poros do solo, especialmente os de maior tamanho, passam a ser ocupados por agregados menores e/ou partículas simples, o que implica em redução do volume do solo. Considerando o sistema de semeadura direta, as principais forças que tendem a deformar o solo provêm do tráfego de rodados de máquinas agrícolas e do pisoteio animal. Diante do exposto, pode-se inferir que existem duas formas básicas de evitar a compactação do solo: diminuir a magnitude da pressão aplicada e aumentar a resistência do solo à deformação. Esses aspectos serão discutidos com mais detalhes no item 6.1.

Londrina, PR
Setembro, 2008

Autores

Henrique Debiasi

Engº Agrônomo, Dr.
Embrapa Soja
Cx. P. 231
86001-970, Londrina, PR
debiasi@cnpso.embrapa.br

Julio Cezar Franchini

Engº Agrônomo, Dr.
Embrapa Soja
Cx. P. 231
86001-970, Londrina, PR
franchin@cnpso.embrapa.br

Sérgio Luiz Gonçalves

Engº Agrônomo, Dr.
Embrapa Soja
Cx. P. 231
86001-970, Londrina, PR
sergiolg@cnpso.embrapa.br

3. Efeitos da compactação do solo

Os efeitos negativos da compactação do solo envolvem, em primeiro lugar, a redução da produtividade das culturas. Solos compactados se caracterizam por uma alta densidade e um baixo volume de poros, principalmente daqueles de maior tamanho (macroporos). Há indícios também de que a compactação modifica a geometria do espaço poroso, diminuindo a proporção dos poros verticalmente alongados e aumentando a dos circulares, descontínuos e horizontalmente orientados. Tudo isso diminui a capacidade de infiltração de água do solo e a condutividade hidráulica e, ao mesmo tempo, aumenta a energia com a qual a água é retida pelo solo, resultando em um menor armazenamento e disponibilidade de água às plantas. Além disso, o aumento do grau de compactação resulta no incremento da resistência do solo à penetração das raízes, especialmente sob baixa disponibilidade hídrica, limitando assim o crescimento e a efetividade das mesmas. Com isso, o volume de solo explorado pelo sistema radicular das plantas diminui, acarretando uma menor absorção de água e nutrientes. Da mesma forma, existem evidências de que algumas doenças radiculares da soja, entre as quais se destaca a causada pelo fungo *Macrophomina phaseolina*, têm sua severidade aumentada quando o desenvolvimento radicular é prejudicado pela compactação excessiva do solo.

Por outro lado, quando ocorre excesso de chuvas, o aumento do grau de compactação do solo incrementa a possibilidade de ocorrência de problemas de disponibilidade de oxigênio às plantas. Isso ocorre porque, em solos compactados, a porosidade de aeração diminuiu a valores inferiores ao considerado crítico às plantas (10%) em umidades menores do que em solos bem estruturados. Além disso, como a condutividade hidráulica saturada é baixa, a drenagem é lenta. Quando a aeração é deficiente, o desenvolvimento radicular, assim como a capacidade das raízes em absorver água e nutrientes, são comprometidos. Processos como a fixação biológica do nitrogênio e a mineralização dos nutrientes presentes em resíduos culturais e na matéria orgânica do solo são também prejudicados. A formação de sítios anaeróbicos, mais comum em solos compactados, pode aumentar significativamente as perdas de nitrogênio por denitrificação, diminuindo assim a disponibilidade desse nutriente às plantas. É importante considerar também que a falta de aeração propicia o aparecimento de substâncias e elementos tóxicos, os quais podem causar lesões nas raízes abrindo portas para a entrada de patógenos causadores de doenças radiculares, como a já mencionada *M. phaseolina* e os fungos relacionados à morte de plântulas de soja, como *Fusarium* sp., *Phytophthora sojae*, *Sclerotium rolfsii* e *Rhizoctonia solani*.

Diante do que foi anteriormente exposto, pode-se inferir que os problemas de compactação se manifestam ou então se tornam mais evidentes sob excesso ou deficiência hídrica, principalmente quando essas condições ocorrem em períodos críticos da cultura. Tal fato foi comprovado em pesquisa conduzida por Torres et al. (1993), na fazenda experimental da Embrapa Soja, em Londrina/PR, sobre um Latossolo Vermelho distroférrico

muito argiloso. Os autores avaliaram o efeito de diferentes densidades do solo na camada de 0,08-0,16 m sobre a produtividade de grãos da soja, em três safras seguidas (Figura 1). Verificaram que, na safra 84/85, quando não ocorreu deficiência hídrica, a produtividade de grãos da soja foi pouco prejudicada em função do aumento da densidade do solo. Na safra 87/88 (deficiência hídrica de 10 dias), os efeitos negativos da compactação sobre a produtividade já foram mais evidentes. Em 86/87, quando foi observado estresse hídrico, com duração de 20 dias, houve uma redução acentuada na produtividade da soja, já a partir da densidade de 1,27 Mg m⁻³.

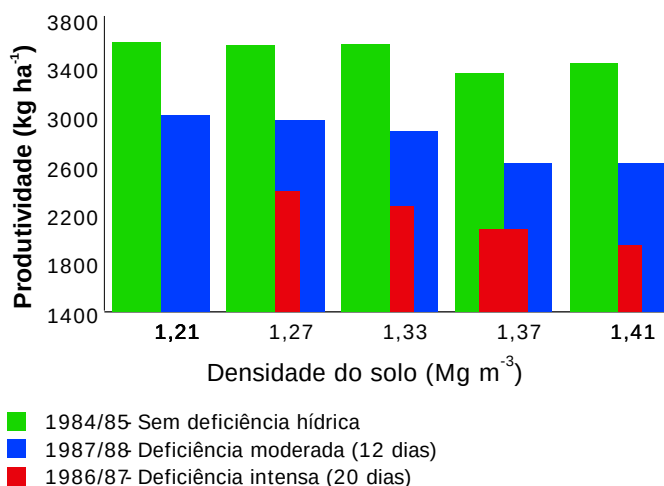


Figura 1. Produtividade da soja em resposta a diferentes densidades do solo na camada de 0,08-0,16 m, medida em diferentes safras. Fonte: Torres et al. (1993).

Principalmente em anos secos, a produtividade das culturas diminui em solos com alta porosidade, indicando a existência de um nível ótimo de compactação. Esse comportamento se justifica pelo fato de solos soltos e muito porosos se caracterizarem por uma menor condutividade hidráulica não saturada e, ao mesmo tempo, não proporcionarem um bom contato solo-raiz, o que prejudica a absorção de água e nutrientes. Em solos pouco densos e com elevada macroporosidade, a retenção de água na capacidade de campo é baixa, de modo que o volume de água disponível é menor comparativamente a solos com moderado grau de compactação. A emergência também pode ser afetada negativamente em solos com densidades muito baixas, devido ao mau contato solo-semente.

Os efeitos da compactação do solo estendem-se para além da produtividade das culturas, de forma que esse processo afeta também o desempenho das máquinas agrícolas. A compactação aumenta a demanda de força de tração das ferramentas de mobilização do solo e dos mecanismos sulcadores que equipam as semeadoras-adubadoras adaptadas à semeadura direta. A qualidade do trabalho também é prejudicada, o que é preocupante principalmente quando se trata da formação da cama de semeadura (sulco). Em solos compactados, a mobilização do solo na linha de semeadura pode resultar em agregados grandes, o que prejudica o contato solo-semente e, em decorrência, a sua germinação. Além disso, sob condições de excesso de chuvas, a água pode

acumular-se no sulco, levando ao encharcamento dessa região e, assim, favorecer o aparecimento de podridões de semente. Em contrapartida, superfícies firmes, ou seja, que apresentem determinado grau de compactação, ao reduzir as perdas de potência na interface solo/rodado relacionadas à patinação e à resistência ao rolamento (menor recalque do rodado no solo), aumentam a eficiência de tração, o que incrementa a capacidade operacional das máquinas e diminui o consumo de energia.

A compactação do solo tem implicações ambientais, visto que pode prejudicar a qualidade da água e do ar. Solos com elevado grau de compactação apresentam uma baixa capacidade de infiltração de água, o que aumenta o escoamento superficial. Essa água carrega consigo partículas de solo, nutrientes e moléculas de agrotóxicos o que, além de representar prejuízos financeiros ao produtor, polui as fontes superficiais de água. A compactação também prejudica a ação do solo como regulador do nível dos rios, uma vez que o escoamento superficial resulta em descargas rápidas e intensas de água nos mesmos, aumentando a probabilidade de ocorrência de enchentes. Por outro lado, como o volume de água que infiltra é pequeno, a recarga das fontes superficiais e subsuperficiais de água por via subterrânea é reduzida, o que pode agravar o efeito das estiagens sobre o nível dos rios. Do mesmo modo, aumentos consideráveis da emissão de alguns gases causadores do efeito estufa, notadamente o óxido nítrico, têm sido observados em solos compactados. A compactação reduz também a fixação de CO_2 , em razão da diminuição na produção de fitomassa, e a oxidação do metano pelos microrganismos aeróbicos, limitando assim a capacidade do solo em diminuir a concentração atmosférica desses gases.

4. Indicadores do grau de compactação do solo

4.1. Indicadores qualitativos

Entende-se por indicadores qualitativos aqueles que, para fins de monitoramento do grau de compactação em nível de propriedade agrícola, não são passíveis de ser quantificados. A avaliação desses indicadores é visual e subjetiva, comparando-se a situação detectada no campo com o padrão normalmente exibido por áreas com problemas de compactação. Os indicadores qualitativos mais importantes são brevemente discutidos a seguir:

4.1.1. Padrão de desenvolvimento da lavoura

Conforme explicado no item 3, a compactação do solo afeta o desenvolvimento das plantas principalmente por comprometer o crescimento e a efetividade do sistema radicular, bem como por diminuir o volume de água armazenado no solo. Diante disso, os sintomas exibidos pela parte aérea de plantas afetadas pela compactação assemelham-se àqueles relacionados à deficiência hídrica e nutricional, tais como crescimento lento com redução da altura de planta e amarelecimento das folhas. Falhas na germinação e emergência das plântulas são comuns, principalmente em condições de excesso ou deficiência hídrica. Esses fatores podem

resultar em uma lavoura cujo padrão de desenvolvimento é desuniforme.

4.1.2. Características da superfície do solo

Um dos principais efeitos da compactação do solo é a redução na capacidade de infiltração de água. Em decorrência disso, um forte indicativo da existência de camadas compactadas relaciona-se à observação de locais dentro da lavoura com água empoçada após chuvas de intensidade moderada. Elevadas perdas de água por escoamento superficial, evidenciadas pelo acúmulo de água no canal dos terraços, associada ou não a perdas de solo, especialmente quando ocorrem em áreas com baixa propensão natural a esse processo (pouca declividade, solos profundos e cobertos por palha e/ou vegetação viva, manejados sob semeadura direta), também podem indicar compactação excessiva do solo.

4.1.3. Crescimento, morfologia e distribuição das raízes

A avaliação do crescimento, das características e da distribuição do sistema radicular da soja e culturas associadas deve ser realizada através da abertura de trincheiras dispostas transversalmente ao sentido das linhas de semeadura. Raízes grossas, achatadas e orientadas no sentido horizontal (Figura 2) podem evidenciar que o solo está compactado. Entretanto, a existência de pequenos recurvamentos na raiz principal da soja (Figura 3) não pode ser apontada como indício de compactação do solo, principalmente quando o sistema de manejo adotado corresponde à semeadura direta. Isso representa apenas um artifício da raiz para ultrapassar pequenas regiões com maior resistência à penetração no solo. A continuidade do crescimento em profundidade, conforme mostrado na Figura 3, demonstra que a camada apresenta regiões de menor resistência e/ou bioporos capazes de garantir o aprofundamento da raiz principal.

Quando o sistema de manejo adotado é o preparo convencional, a concentração das raízes na superfície do solo é relacionada, quase sempre, à ocorrência de compactação em subsuperfície. Porém, em condições de semeadura direta, a avaliação do padrão de distribuição das raízes no perfil deve ser realizada com cuidado. É amplamente conhecido que, sob semeadura direta, os nutrientes e a matéria orgânica concentram-se na superfície do solo (0,0-0,12 m). Esse fato, aliado à manutenção da umidade do solo na camada superficial do solo em virtude da cobertura morta e dos fluxos ascendentes de água proporcionados pelos poros contínuos que surgem em decorrência do não revolvimento do solo, estimula o desenvolvimento radicular nessa camada em detrimento às regiões mais profundas. Ou seja, a concentração das raízes da soja e das culturas associadas ao sistema de produção da mesma, quando manejadas sob semeadura direta, não significa, necessariamente, que existam zonas em subsuperfície caracterizadas por um grau de compactação acima do crítico. No entanto, é importante que algumas raízes atinjam maiores profundidades, o que pode ocorrer mediante o crescimento através de bioporos ou fendas. Nesse sentido, uma proporção



Figura 2. Raízes de soja afetadas por uma camada de solo compactado. Foto: Enoir C. Pellizzaro.



Figura 3. Pequenos recurvamentos na raiz principal da soja não refletem problemas de compactação excessiva do solo, desde que a expansão em profundidade não seja limitada.

muito pequena de raízes em camadas mais profundas, principalmente se a avaliação for realizada após períodos de deficiência hídrica, pode indicar que o grau de compactação nessas camadas esteja limitando a produtividade da cultura.

O desenvolvimento radicular das culturas pode ser comprometido por outros fatores que não a compactação do solo, como a toxidez por alumínio, podendo levar a erros de diagnóstico. Os sintomas da toxidez por alumínio englobam a redução do desenvolvimento e da ramificação das raízes, bem como o engrossamento e escurecimento das mesmas (necrose). Assim, camadas de solo permeadas por raízes grossas, pouco ramificadas e em baixa densidade podem não apresentar impedimento de natureza mecânica, mas sim química. Isso comprova a necessidade da avaliação do estado de compactação envolver diversos indicadores, incluindo aqueles relacionados à qualidade química do solo.

4.1.4. Qualidade da estrutura do solo

Camadas de solo compactadas são formadas por estruturas (torrões) similares à apresentada na Figura 4a. Estruturas desse tipo apresentam, em seu interior, um pequeno número de raízes pouco ramificadas e fortemente aderidas ao solo, baixa atividade biológica e

ausência quase total de orifícios, poros e bioporos visíveis a olho nu. Quando presentes, esses poros são tubulares e/ou representados por cavidades de formato arredondado. Quando essas estruturas são rompidas, observa-se a formação de unidades menores cujas faces de ruptura são lisas (Figura 4a). Em casos extremos, a estrutura pode ser laminar (agregados cujo maior eixo é o horizontal) ou mesmo massiva (elementos de solo fortemente unidos, sendo praticamente impossível a individualização de torrões). Por outro lado, estruturas que ao serem quebradas exibem superfícies rugosas, apresentando em seu interior uma grande quantidade de poros e/ou bioporos visíveis a olho nu, bem como de raízes ramificadas que são facilmente separadas da massa de solo (Figura 4b), são encontradas em camadas de solo sem problemas de compactação.



Figura 4. Aspecto de torrões extraídos de camadas com alto (a) e baixo (b) grau de compactação. Fonte: Torres & Saraiva (1999).

É importante observar também a ocorrência de fendas e bioporos (Figura 5), principalmente na camada de 0,08-0,20 m de profundidade, que normalmente apresenta maiores problemas de compactação excessiva em condições de semeadura direta. A presença de bioporos, fendas e fissuras contendo vestígios de atividade biológica evidencia que o sistema de semeadura direta está entrando na fase de equilíbrio. Além disso, esse tipo de porosidade constitui-se em caminhos pelos quais as raízes podem atravessar camadas de solo com elevada resistência à penetração e, desse modo, buscar água e nutrientes a maiores profundidades. Assim, a existência de bioporos e fendas pode diminuir ou mesmo anular os efeitos negativos sobre a produtividade das culturas devido a camadas de solo com elevada resistência à penetração.



Figura 5. Bioporos produzidos por insetos servem de caminho para as raízes crescerem através de camadas compactadas.

A avaliação da qualidade da estrutura aqui proposta baseia-se no método do perfil cultural. Informações mais detalhadas a respeito desse método podem ser obtidas em Tavares-Filho et al. (1999) e Neves et al. (2003).

4.2. Indicadores quantitativos

Nesse tópico, serão abordados os principais indicadores do estado de compactação do solo passíveis de serem quantificados que, atualmente, são a densidade do solo e a resistência mecânica à penetração. Adicionalmente, serão feitas breves considerações a respeito de um novo indicador, baseado no mapeamento do grau de compactação do solo através da medição da força de tração nas hastes sulcadoras que equipam as semeadoras-adubadoras. A principal limitação de todos os indicadores para fins de diagnóstico do grau de compactação do solo refere-se ao estabelecimento de níveis críticos para os mesmos, acima ou abaixo dos quais a produtividade começa a diminuir. Tal problema persiste mesmo que consideráveis esforços de pesquisa já tenham sido dispendidos para a sua solução. A principal justificativa para a dificuldade no estabelecimento de níveis críticos de compactação do solo para o crescimento das plantas é atribuída às variações de clima, tipo de solo e manejo adotado entre diferentes locais e anos.

4.2.1. Densidade do solo

A densidade do solo, definida como sendo a relação entre a massa de solo seca em estufa a 105°C e o

respectivo volume total, depende do volume de poros e da densidade das partículas. Como a variação na densidade das partículas, para uma mesma classe de solo, é relativamente pequena, a densidade pode ser considerada como sendo uma função direta do volume de poros. Assim, considerando um mesmo tipo de solo, quanto menor for a sua densidade, maior será a porosidade total e, dessa forma, menor o grau de compactação. Para comparar diferentes tipos de solos, é importante levar em consideração a densidade das partículas que os compõem. A título de exemplificação, pode-se considerar dois solos com mesma densidade, porém com densidade das partículas diferente. O solo que apresentar maior densidade das partículas terá maior porosidade total e, dessa forma, menor grau de compactação. Solos ricos em óxidos de ferro, como os Latossolos, e/ou pobres em matéria orgânica, apresentam maiores valores de densidade das partículas.

Uma das grandes vantagens do uso da densidade do solo como indicador do estado de compactação é a sua independência em relação ao teor de água do solo durante a avaliação. No entanto, são necessárias diversas amostragens para que diferenças significativas nesta variável sejam detectadas. Além disso, o método padrão para quantificação da densidade do solo, que envolve a coleta de amostras indeformadas através de cilindros ou anéis volumétricos (Figura 6), é trabalhoso, demorado e destrutivo. Maiores detalhes sobre a coleta das amostras e análises de laboratório para determinação da densidade do solo podem ser obtidas em Kiehl (1979) e EMBRAPA (1997).



Figura 6. Cilindros volumétricos para coleta de amostras indeformadas destinadas à determinação da densidade do solo, os quais se encontram inseridos na parede vertical de uma trincheira.

O estabelecimento dos valores de densidade do solo críticos ao desenvolvimento das plantas não é tarefa fácil, considerando-se que a resposta das culturas a esse atributo varia de solo para solo, principalmente em função da textura, o que dificulta a extrapolação dos resultados experimentais. Os solos arenosos são, naturalmente, mais densos e menos porosos do que os argilosos, em virtude de não possuírem uma microestrutura tão desenvolvida quanto os últimos. Em geral, os valores de densidade do solo variam de 1,05-1,45; 1,35-1,65; e 1,45-1,75 Mg m^{-3} para solos de textura argilosa, média e arenosa, respectivamente. Os valores críticos de densidade do solo tornam-se maiores à medida que o teor de areia aumenta. Isso ocorre porque os solos arenosos, devido ao maior tamanho das partículas que os compõem, mesmo quando caracterizados por densidades consideradas altas para solos argilosos, apresentam valores de macroporosidade suficientes para garantir adequada aeração e uma resistência à penetração não limitante ao crescimento radicular. Embasados em estudos envolvendo o intervalo hídrico ótimo (IHO), Reichert et al. (2003) sugerem valores de densidade do solo críticos ao desenvolvimento das plantas, os quais variam em função da classe textural do solo (Figura 7).

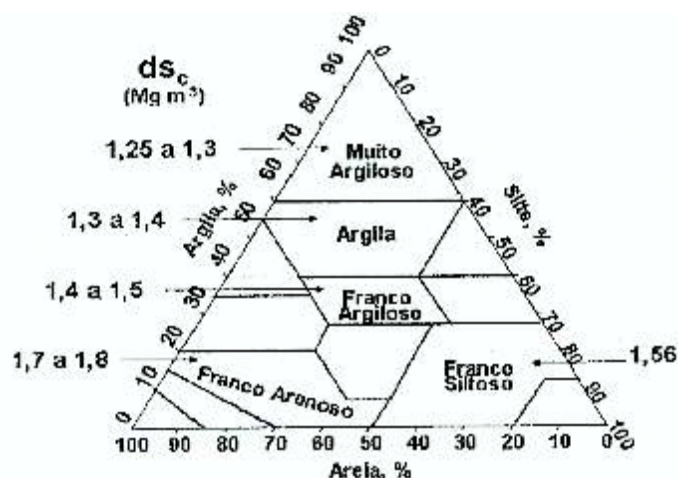


Figura 7. Valores de densidade do solo críticos ao desenvolvimento das plantas (ds_c), em função da classe textural do solo. Adaptado de Reichert et al. (2003).

A aplicabilidade dos valores de densidade do solo crítica apresentados na Figura 7 à cultura da soja é comprovada pelos resultados obtidos por Torres et al. (1993), apresentados na Figura 1 (item 3). Observa-se que, nas safras de 84/85 (sem deficiência hídrica) e de 87/88 (deficiência hídrica de 10 dias), a produtividade de grãos de soja começou a decrescer em densidades maiores do que 1,33 Mg m^{-3} . Em 86/87, quando foi observada uma deficiência hídrica mais pronunciada (20 dias), menores produtividades de grãos de soja foram obtidas a partir da densidade de 1,27 Mg m^{-3} . Da mesma forma, Beutler et al. (2005), com base em um

experimento conduzido em casa de vegetação, com adequada disponibilidade hídrica, concluíram que a produtividade da soja foi reduzida a partir de densidades do solo equivalentes a 1,28 e 1,38 Mg m^{-3} para um Latossolo Vermelho distroférrico (52% de argila) e para um Latossolo Vermelho distrófico (27% de argila), respectivamente.

Para reduzir as diferenças de resposta das plantas à densidade em função do tipo de solo, Hakansson (1990) propôs o conceito de densidade relativa, determinada através da divisão da densidade do solo por um valor de densidade de referência, obtido pela compressão uniaxial de amostras grandes e indeformadas de solo a uma pressão de 200 kPa. Esse autor, tendo como base os resultados de mais de 100 experimentos em diferentes tipos de solos, concluiu que a densidade relativa ótima à produtividade de diversas culturas corresponde a aproximadamente 0,87. No Brasil, tem-se utilizado como referência a densidade máxima do solo determinada pelo teste de Proctor Normal que, na maioria dos casos, resulta em valores de densidade relativa ótima (Torres & Saraiva, 1999; Beutler et al., 2005) semelhantes aos indicados por Hakansson (1990). De maneira geral, os valores de densidade máxima variam de aproximadamente 1,50 a 1,90 Mg m^{-3} para solos argilosos e arenosos, respectivamente. Levando-se em consideração os valores de densidade máxima do solo e densidade relativa, os valores limitantes de densidade do solo seriam de aproximadamente 1,30 e 1,65 Mg m^{-3} para solos argilosos e arenosos, respectivamente, os quais são similares aos apresentados na Figura 7.

4.2.2. Resistência do solo à penetração

A quantificação da resistência do solo à penetração (RP) é feita mediante o emprego de equipamentos denominados de penetrômetros, sendo que os mais utilizados são os constituídos por uma haste metálica que apresenta um cone em uma de suas extremidades. Estes equipamentos medem a força por unidade de área (pressão) necessária para que o cone penetre no solo até uma determinada profundidade. Existem dois grupos de penetrômetros de cone:

- estáticos (Figuras 8, 9 e 10): nesse tipo de penetrômetro, o cone é empurrado contra o solo a uma velocidade constante, de forma hidráulica, eletromecânica ou mesmo manual. A medição da força necessária à penetração do cone no solo é realizada através de um dinamômetro localizado na parte superior do aparelho. A leitura é feita diretamente em um micrômetro (penetrômetros, Figura 8) ou então os valores são registrados mecanicamente em um gráfico (penetrógrafos, Figura 9). Ambos os dispositivos são calibrados em função da área do cone, de forma que os valores mostrados no micrômetro ou registrados no gráfico estão em unidades de pressão. No caso dos penetrômetros, deve-se anotar também a profundidade correspondente a cada leitura de RP. Atualmente, existem equipamentos mais sofisticados, em que os valores de RP e das respectivas profundidades de medição são armazenados em formato eletrônico e, posteriormente, descarregados em um computador (Figura 10).

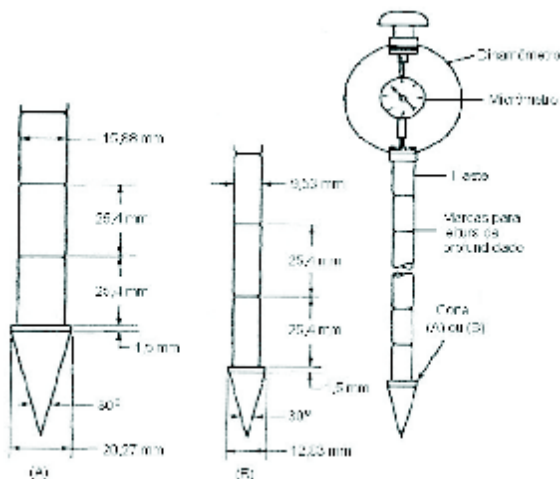


Figura 8. Esquema de um penetrômetro estático. Adaptado da norma ASAE S313.3 (ASAE, 2004).



Figura 9. Modelo de penetrógrafo.



Figura 10. Penetrômetro dotado de sistema eletrônico para aquisição e armazenamento dos dados de resistência à penetração e das respectivas profundidades de medição.

- dinâmicos ou penetrômetros de impacto: no Brasil, o modelo mais utilizado vem sendo aquele desenvolvido por Stolf et al. (1983), o qual é mostrado nas Figuras 11 e 12. Nesse equipamento, o dinamômetro e o sistema registrador foram substituídos por um peso (4 kg) de curso constante guiado pela mesma haste na qual se

encontra o cone. Esse peso, caindo de uma altura determinada (normalmente, 0,4 m; para solos com resistência à penetração muito baixa, usa-se 0,2 m), proporciona energia cinética para que o cone penetre no solo. São registrados, manualmente, o número de impactos e a profundidade atingida pelo cone. Para penetrômetros de impacto com as mesmas características do apresentado nas Figuras 11 e 12 (massa total de 3,2 kg), a RP (MPa) pode ser calculada através da equação (1):

$$RP = A \frac{N}{P} + 0,54856 \quad (1)$$

Onde A é constante, igual a 3,3862 e 6,7724 para alturas de queda do peso de 0,2 e 0,4 m, respectivamente; e N é o número de impactos necessário para que o cone atinja a profundidade P, em cm.

A RP aumenta em função do incremento na densidade do solo sendo, portanto, um indicador do grau de compactação do solo. No entanto a RP diminui à medida que o teor de água do solo aumenta, dificultando assim a aplicabilidade dos resultados para fins de diagnóstico do estado de compactação do solo. Dessa

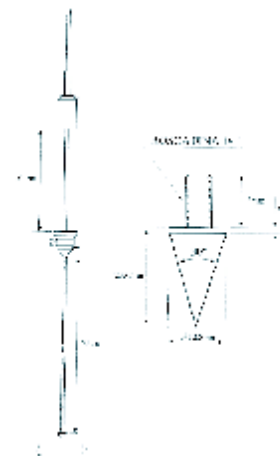


Figura 11. Diagrama esquemático do penetrômetro de impacto construído por Stolf et al. (1983).



Figura 12. Penetrômetro de impacto construído conforme Stolf et al. (1983).

forma, a interpretação dos dados de RP deve ser cuidadosa e sempre acompanhada do conhecimento do teor de água do solo no momento da avaliação. Esse cuidado deve ser maior para os solos argilosos, onde grau de dependência da RP em relação à umidade do solo é mais elevado comparativamente aos arenosos. A avaliação da RP deve ser realizada, preferencialmente, quando o solo estiver na consistência friável (situação em que, apertando-se entre os dedos um agregado de solo, ele se rompe facilmente com a formação de pequenos agregados, sem se deformar e/ou grudar nos dedos). Em umidades maiores, as diferenças nos valores de RP obtidos em áreas e/ou camadas compactadas e não compactadas tornam-se pequenas, podendo levar a diagnósticos errôneos. Por outro lado, a penetração do cone é dificultada em solos secos, principalmente quando se emprega penetrômetros estáticos e/ou o grau de compactação do solo é elevado, comprometendo a exequibilidade das avaliações. Além disso, na maior parte das pesquisas realizadas com o objetivo de quantificar o grau de compactação crítico ao desenvolvimento das plantas, a RP vem sendo determinada com o solo em sua consistência friável. Portanto, medir a RP em condições de solo friável facilita a comparação dos valores obtidos com aqueles considerados como sendo limitantes às plantas.

Para que a RP seja determinada de modo preciso e exato, os seguintes cuidados devem ser tomados:

- a RP não deve ser quantificada mediante a realização de leituras isoladas e aleatoriamente distribuídas em uma determinada área, pois a variação dos valores obtidos pode se relacionar mais aos padrões de tráfego e preparo do que à heterogeneidade do solo. Dessa forma, recomenda-se a execução das leituras de RP sobre uma linha reta de 2 m de comprimento disposta perpendicularmente às linhas de semeadura e de tráfego (transecta). Sugere-se que, sobre uma mesma transecta, as leituras sejam espaçadas entre si por uma distância de 0,1 m. Distribuir leituras regularmente espaçadas sobre uma transecta permite também visualizar se há regiões de baixa RP próximas a zonas com alta RP, o que pode evidenciar a existência de caminhos pelos quais as raízes podem se aprofundar através de camadas com valores médios de RP elevados.

- as características do cone, principalmente no que se refere à área da base e ao ângulo, afetam de modo significativo a magnitude da RP. As dimensões do cone são padronizadas pela norma ASAE S313.3 (ASAE, 2004). Existem dois tipos de cone, que diferem no que se refere à área da base (Figura 8). O cone maior é usado para solos fofos, enquanto que o menor aplica-se às demais situações sendo, por isso, o mais empregado. À medida que vai sendo utilizado, o cone se desgasta, resultando na diminuição da área da base e do comprimento, bem como na alteração do ângulo, o que modifica os valores de RP. Portanto, o desgaste máximo permitido sem que haja comprometimento da qualidade dos dados é de 3% em relação às dimensões originais. O cuidado deve ser maior se o penetrômetro for utilizado preponderantemente em solos arenosos e/ou ricos em cascalhos pois, nessa situação, o desgaste é mais intenso;

- o atrito solo-solo é maior que o atrito solo-metal. Visando evitar superestimativas dos valores de RP, o

cone e a haste devem ser limpos após cada ensaio, quando houver adesão de solo. Esse problema ocorre com maior intensidade quando o solo encontra-se na consistência plástica;

- a presença de ferrugem na haste e cone do equipamento também aumenta o atrito. Para evitar esse problema, os penetrômetros devem ser limpos e secos após o uso e, posteriormente, acondicionados e guardados em locais ao abrigo da umidade e sujeira;

- ao comparar áreas e/ou épocas distintas, deve-se observar a quantidade de raízes presentes. O sistema radicular das plantas une as partículas e agregados do solo, aumentando a resistência da massa de solo à ruptura pelo deslocamento do cone. Assim, para um mesmo grau de compactação, maiores valores de RP são esperados em áreas caracterizadas por uma maior concentração de raízes;

- no caso dos penetrômetros estáticos, a velocidade de inserção deve ser constante e inferior a 3 cm s^{-1} . O emprego de velocidades maiores resulta em valores subestimados de RP. Quando a inserção do penetrômetro estático é manual, a observação dessas recomendações é bastante difícil, principalmente em solos secos e/ou muito compactados, o que resulta numa alta variabilidade dos resultados obtidos. O uso de sistemas hidráulicos ou eletro-mecânicos para inserção do cone, ou a substituição dos penetrômetros estáticos pelos penetrômetros de impacto, constituem-se em alternativas para a solução desse problema.

Estabelecer níveis críticos de RP à produtividade das plantas é tarefa bastante difícil. Além das variações ocasionadas nos valores de RP pela umidade do solo, os mecanismos de atuação das raízes e dos penetrômetros são distintos, de maneira que a resistência do solo ao cone pode ser de duas a oito vezes maior que aquela encontrada pelas raízes (Bengough & Mullins, 1990). Tal fato é atribuído à incapacidade do penetrômetro em acompanhar as irregularidades dos poros pré-existent no solo. Diante disso, os valores críticos de RP podem ser maiores para camadas de solo caracterizadas por uma alta concentração de bioporos e/ou fendas. A magnitude dos valores críticos de RP pode ser alterada ainda em função da disponibilidade hídrica. Assim, em anos com ocorrência de excesso ou deficiência hídrica, os valores de RP acima dos quais a produtividade da soja e culturas associadas é prejudicada podem se tornar menores.

Para medições realizadas com penetrômetros estáticos e com o solo na consistência friável, o valor de 2 MPa tem sido indicado como o limite de RP acima do qual a produtividade das culturas começa a ser reduzida. No caso específico da soja, Beutler et al. (2005), estudando os efeitos de níveis crescentes de compactação simulada por passadas sequenciais de rodados de trator, em um Latossolo Vermelho distrófico de textura média (27% de argila) e sob disponibilidade hídrica adequada, obteve reduções significativas na produtividade da soja quando a RP, determinada na umidade equivalente à capacidade de campo e na camada de 0,0-0,18 m, ultrapassou o valor de 1,8 MPa. Quando se utiliza o penetrômetro de impacto, os valores de RP críticos às plantas são maiores. A partir de dados obtidos de diversos experimentos conduzidos na Embrapa Soja, em Latossolo Vermelho distrófico muito argiloso, Torres & Saraiva (1999) apontam que o grau de compactação começa a limitar a produtividade da soja

quando a RP medida com penetrômetro de impacto e na condição de solo friável ultrapassa o valor de 3,5 MPa. A partir de 6,5 MPa, a restrição ao desenvolvimento da soja, devida à compactação, passa a ser muito forte.

A principal vantagem da utilização da RP refere-se à facilidade e rapidez de execução do ensaio. O uso de penetrômetros permite ainda a avaliação do estado de compactação em pequenos intervalos de profundidade, o que nem sempre é possível quando se utiliza outras propriedades físicas. Além disso, a RP parece ser um indicador da qualidade estrutural do solo mais sensível a mudanças do manejo comparativamente à densidade do solo. A principal desvantagem da RP é a sua dependência em relação ao teor de água, o que dificulta a comparação dos resultados obtidos em diferentes locais e épocas.

4.2.3. Força de tração demandada por hastes sulcadoras de semeadoras-adubadoras

Recentemente, Cepik (2006) desenvolveu um sistema para a medição da força de tração demandada por hastes sulcadoras de adubo que equipam as semeadoras-adubadoras, visando avaliar o grau de compactação do solo. Essa metodologia baseia-se no fato de que, para um mesmo tipo de haste, trabalhando numa condição tal que as variações de profundidade de atuação e de umidade do solo sejam pequenas, a força de tração demandada pela mesma será tanto maior quanto maior for o grau de compactação do solo. A existência de forte correlação entre as variáveis força de tração e RP foi comprovada pelos dados obtidos por Conte et al. (2007). A força de tração é quantificada através de sensores instalados no suporte da haste sulcadora de adubo (Figura 13), os quais medem a deformação micrométrica sofrida pela mesma, cuja magnitude é proporcional à resistência do solo que incide na ponta da haste. No sistema proposto por Cepik (2006), os dados de força de tração são armazenados eletronicamente em um *datalogger* e, posteriormente, transferidos a um microcomputador. Pode-se utilizar uma ou mais hastes instrumentadas numa mesma máquina, tendo em vista que a qualidade da semeadura nas linhas monitoradas não é comprometida. A associação desse dispositivo de medição a um sistema de posicionamento global (GPS), permite mapear a variação espacial da força de tração (Figura 14) e, em consequência, do grau de compactação, simultaneamente à operação de semeadura.



Figura 13. Sensor utilizado para medição da força de tração requerida por hastes sulcadoras para deposição do adubo.

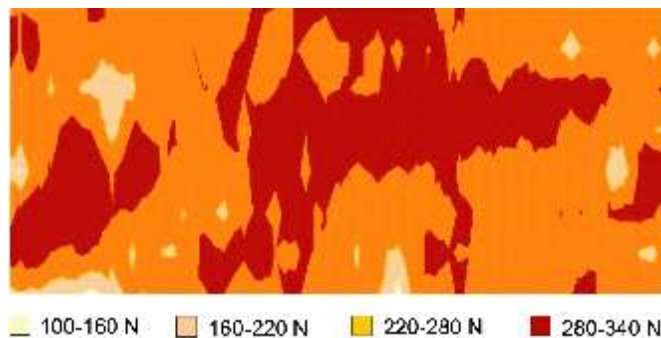


Figura 14. Mapa mostrando a variabilidade espacial da força de tração demandada pelas hastes sulcadoras das semeadoras-adubadoras. Adaptado de Cepik (2006).

É importante esclarecer que o mapeamento da força de tração medida em hastes sulcadoras serve para isolar, dentro de grandes áreas de lavoura, as regiões que possivelmente apresentam problemas de compactação, facilitando e agilizando o monitoramento do problema. A detecção dessas áreas torna-se ainda mais fácil dentro do contexto da agricultura de precisão, quando estão disponíveis mapas de outras variáveis, como os teores dos nutrientes, a acidez e a produtividade de grãos. O diagnóstico final em relação à existência ou não de níveis críticos de compactação nas regiões com alta demanda de força de tração exige a avaliação posterior de outros indicadores. Além de ainda não estar disponível no mercado e sob um custo de aquisição aceitável, o sistema apresenta outras limitações, como a possível interferência de variações na profundidade de atuação das hastes e na umidade do solo sobre os valores de força de tração, mascarando os resultados, e o pequeno alcance da avaliação em termos de profundidade (até 0,18 m).

5. Metodologia sugerida para o monitoramento do grau de compactação do solo

No tópico anterior, foram descritos diversos indicadores que podem ser utilizados para avaliar o estado de compactação do solo. O objetivo agora é descrever uma metodologia para determinar o grau de compactação do solo, envolvendo a integração de alguns dos indicadores anteriormente descritos. Essa metodologia baseia-se na que foi proposta por Torres & Saraiva (1999), sendo sua implementação composta pelas seguintes etapas:

- dividir a área em glebas, utilizando como critérios principais o tipo de solo e o histórico de produtividade e do manejo adotado;
- organizar e analisar o histórico de produtividade de cada gleba, bem como atentar para o padrão de desenvolvimento da lavoura (item 4.1.1) e a ocorrência de intenso escoamento superficial e água empoçada (item 4.1.2);
- uma vez detectadas glebas com decréscimos de produtividade ao longo do tempo, certificar-se de que os mesmos não foram causados por fatores como problemas climáticos e/ou fitossanitários, deficiência de nutrientes, acidez do solo, toxicidade de alumínio, entre outros;

- excluídas essas possibilidades, sugere-se avaliar o estado de compactação do solo, primeiramente, através da determinação da RP em transectas de acordo com o preconizado no item 4.2.2;

- valores médios de RP superiores a 2 e 5 MPa para penetrômetros estáticos e de impacto, respectivamente, acompanhados da ausência de regiões com baixa resistência que possam se constituir em caminhos para o crescimento em profundidade das raízes, são um forte indicativo de que essa camada está com um grau de compactação limitante às plantas. É importante determinar também a umidade do solo no momento da avaliação, principalmente para balizar a comparação entre glebas, camadas e/ou épocas diferentes. Cabe lembrar que os valores de RP sugeridos como sendo limitantes às plantas são válidos para avaliações realizadas com o solo na consistência friável;

- para complementar o diagnóstico, recomenda-se a abertura de trincheiras para avaliação da morfologia e distribuição das raízes (item 4.1.3), assim como da qualidade estrutural (item 4.1.4). Observar principalmente a intensidade de ocorrência, na camada com maior RP, de bioporos, fendas, vestígios de atividade biológica e de raízes. Lembrar que, mesmo em camadas com alta RP, a existência dessas características constitui-se num indício consistente de que a compactação pode não estar afetando a produtividade das culturas. Caso haja disponibilidade, pode-se complementar a avaliação retirando-se amostras de solo indeformadas em cilindros volumétricos para determinação da densidade do solo;

- informações a respeito do histórico de manejo do solo aplicado à área também são úteis para o diagnóstico. Por exemplo, a utilização do preparo convencional com arações e gradagens por um longo período de tempo, associada a não realização de escarificação ou subsolagem antes da implantação do sistema de semeadura direta, pode reforçar o diagnóstico de camadas compactadas em subsuperfície ("pé-de-arado").

6. Medidas de controle da compactação do solo

6.1. Preventivas

6.1.1. Racionalização do tráfego de máquinas agrícolas

Essa medida envolve, em primeiro lugar, a diminuição da pressão (pressão = peso sobre o rodado dividido pela área de contato rodado-solo) aplicada pelos rodados das máquinas agrícolas. Para isso, existem basicamente duas opções disponíveis ao produtor: diminuir o peso da máquina e/ou aumentar a área de contato rodado-solo. Quando se pensa em aumentar a área de contato rodado-solo, a primeira idéia que surge é utilizar pneus mais largos e/ou rodados duplos. No entanto, a área de contato rodado-solo pode ser aumentada também mediante o emprego de pneus de maior diâmetro. Ao contrário do observado quando do uso de rodados duplos e/ou de maior largura, pneus de maior diâmetro não aumentam a superfície trafegada, o que representa uma vantagem importante.

Outra medida bastante simples e de baixo custo para aumentar a área de contato rodado-solo e, em consequência, diminuir a pressão aplicada, relaciona-se à pressão de inflação dos pneus. Salvo algumas exceções, a pressão aplicada ao solo pelos rodados das máquinas agrícolas é similar à pressão de inflação dos pneus, independentemente das dimensões e do peso suportado pelos mesmos. Isso ocorre porque, para uma mesma pressão de inflação e dimensões dos rodados, o aumento do peso incidente incrementa a deformação lateral dos pneus, aumentando proporcionalmente a área de contato e, dessa forma, mantendo constante a pressão de contato. Além de aumentar a área de contato rodado-solo, a maior deformação do pneu ocasionada pelo emprego de menores pressões de inflação absorve parte da energia compactante e faz com que o rodado se adapte melhor às variações do microrelevo da superfície do solo, o que reduz a pressão de contato. Desse modo, deve-se sempre utilizar a menor pressão de inflação possível, levando-se em consideração o tipo e as dimensões dos pneus e o peso que incide sobre eles.

Área de contato rodado-solo pode ser aumentada ainda através do emprego de pneus radiais ou de baixa pressão e alta flutuação (BPAF). Atualmente, os pneus mais utilizados na agricultura são os diagonais, caracterizados pela disposição das lonas sob ângulos cruzados menores que 90° em relação à linha de centro da banda de rodagem. Nos pneus radiais, as lonas são dispostas num ângulo igual a 90° em relação ao centro da banda de rodagem. Essas características conferem uma maior deformabilidade às paredes laterais (flancos) do pneu radial comparativamente ao diagonal, resultando numa maior área de contato, maior absorção da energia de compactação e melhor adaptação às irregularidades do microrelevo, o que proporciona uma menor pressão de contato. O pneu BPAF apresenta características mistas do radial e do diagonal, ou seja, a carcaça é constituída por um misto de lonas cruzadas sob ângulos menores que 90° e de lonas sob ângulos iguais a 90°. Essa conformação resulta numa maior resistência dos flancos e banda de rodagem, o que propicia o uso de menores pressões de inflação para uma mesma carga suportada pelo pneu. Avaliando diferentes tipos de pneus com dimensões semelhantes e suportando o mesmo peso, Mazzeto & Lanças (2003) concluíram que a maior área de contato e, em consequência, a menor compactação, ocorreu para o pneu BPAF. Segundo os mesmos autores, a compactação foi mais acentuada para o pneu diagonal, enquanto que o radial apresentou um comportamento intermediário.

Outra alternativa para aumentar a área de contato rodado-solo é a substituição dos pneus por esteiras. O desenvolvimento de esteiras de borracha proporcionou a superação de algumas desvantagens inerentes às de metal, como a baixa velocidade de deslocamento, a dificuldade de transporte mesmo a pequenas distâncias e o elevado custo de manutenção. Entretanto, a disponibilidade de tratores e colhedoras equipados de fábrica com esteiras ainda é pequena no Brasil. No caso específico dos tratores, as esteiras equipam modelos com elevada potência o que, aliado ao elevado custo, limitam o uso das mesmas a algumas regiões.

Baseados em modelos matemáticos, Alakukku et al. (2003) destacam que a magnitude das tensões que se

propagam no interior do solo depende exclusivamente da pressão de contato apenas para a camada superficial do solo (0,0-0,1 m). Por outro lado, os valores das tensões que chegam à camada de 0,1-1 m são definidos não só pela pressão de contato rodado-solo, mas também pelo peso sobre a roda. Os autores obtiveram que o aumento da carga sobre o pneu de 5 para 10 t, mantendo-se constante a pressão de contato (ou seja, aumentando a área de contato), incrementou as tensões transmitidas à camada de 0,1 a 1 m. O mesmo efeito foi observado quando a pressão de contato rodado-solo passou de 150 a 300 kPa, mantendo-se constante a carga sobre o eixo. Porém, as diferenças provocadas pelas pressões de contato nas tensões que chegam à camada de 0,1 a 1 m vão diminuindo à medida que a profundidade aumenta, de forma que, a partir de 1 m, as tensões parecem depender apenas da carga sobre o eixo. Em outras palavras, para uma mesma pressão de contato, quanto maior a carga sobre a roda (e, assim, a área de contato rodado-solo), maior será a profundidade nas quais as tensões são transmitidas (Figura 15).

Diante do que foi exposto no parágrafo anterior, reduzir a pressão de contato rodado-solo pode não ser suficiente para evitar o aumento do grau de compactação em subsuperfície, de forma que a prevenção desse processo envolve também a redução do peso sobre cada roda. A primeira alternativa disponível para alcançar esse objetivo relaciona-se à elaboração de um adequado planejamento da mecanização agrícola da propriedade, de forma a possibilitar a seleção e aquisição de máquinas agrícolas com o menor peso possível sem comprometer a quantidade, a qualidade e a pontualidade das operações mecanizadas. Esse procedimento deve ser associado à correta adaptação das máquinas ao trabalho realizado. Nesse sentido, é muito comum, especialmente em pequenas propriedades, o uso de um único trator para as diferentes operações mecanizadas necessárias à implantação e condução de um dado sistema de produção envolvendo soja. Neste caso, observa-se que a quantidade de lastro usada no trator durante a aplicação de produtos químicos é, geralmente, a mesma da empregada quando da semeadura. Ou seja, trata-se de um peso excessivo que, além de resultar em maior gasto de combustível e desgaste do trator, pode levar ao aumento do grau de compactação do solo.

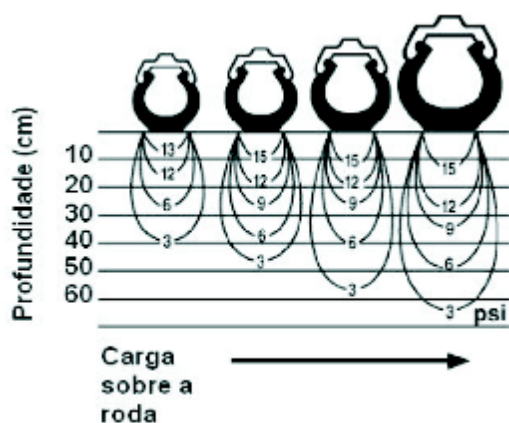


Figura 15. Efeito da carga sobre a roda sobre a profundidade de propagação das tensões no solo. A pressão de contato foi similar em todas as situações, de forma que à medida que a carga aumentou, a área de contato foi incrementada proporcionalmente. Adaptado de Söhne (1958).

Além do uso de tratores mais leves, a carga sobre cada roda e, conseqüentemente, o potencial de compactação em subsuperfície, pode ser reduzido aumentando-se o número de eixos ou o número de rodas por eixo. A divisão da carga somente ocorre caso a distância entre rodas ou eixos for suficiente para que não haja interação entre as tensões aplicadas (Keller & Arvidsson, 2004). No caso da diminuição da carga por rodado através de um maior número de eixos, como ocorre em alguns modelos de distribuidores de fertilizantes e corretivos a lanço, cabe destacar que eixos adicionais representam um maior número de passadas, o que também pode ocasionar compactação em subsuperfície. O uso de rodados duplos, por sua vez, aumenta a superfície trafegada. Infelizmente, os dados disponíveis na bibliografia, até o presente momento, ainda não são suficientes para se definir com clareza qual é a melhor configuração dos rodados visando reduzir o potencial de compactação do solo pelo tráfego.

Outra medida visando a prevenção da compactação do solo é a de limitar o tráfego a determinadas regiões dentro da lavoura (tráfego controlado). Esse procedimento permite dividir a lavoura em duas zonas: uma com baixo grau de compactação do solo, adequada ao desenvolvimento de plantas, e outra compactada, ideal sob o ponto de vista do desempenho dos tratores (menores perdas de potência por patinagem e resistência ao deslocamento da própria máquina, o que aumenta a capacidade operacional e reduz o consumo de combustível). O tráfego controlado apresenta ainda outras vantagens, como: possibilidade de realizar operações mecanizadas em condições de maior umidade do solo; diminuição da força de tração requerida pelas semeadoras-adubadoras, o que, aliado às menores perdas por patinagem e resistência ao rolamento, propicia o uso de tratores de menor potência e pneus mais estreitos, bem como economia de combustível; e menor ocorrência de áreas com sobreposição ou sem aplicação de produtos químicos, já que as regiões com tráfego servem como linhas de referência permanentes.

Embora ferramentas de agricultura de precisão, como o GPS, sejam importantes principalmente na implantação do sistema, o tráfego controlado pode ser viabilizado sem essas tecnologias. Neste caso, as operações mecanizadas devem ser sempre realizadas paralelamente a uma linha base (divisa da propriedade e/ou gleba, entre outras). A adoção dessa técnica requer que as bitolas de todas as máquinas agrícolas sejam similares. Da mesma forma, as larguras de trabalho dos equipamentos devem ser iguais ou múltiplas entre si. Um esquema de tráfego controlado nos moldes aqui sugeridos é mostrado na Figura 16. Nesse esquema, a largura útil dos equipamentos é de 4,5 m para a colhedora e a semeadora, e 13,5 m para o pulverizador. Assim, para cada três passadas da semeadora ou da colhedora, tem-se uma do pulverizador. Para pneus com 0,47 m de largura, a área trafegada no exemplo corresponderá a 20%.

O tráfego controlado apresenta uma série de limitações, principalmente no que se refere a sua exeqüibilidade. Os equipamentos disponíveis em pequenas propriedades apresentam largura útil reduzida, o que aumenta a proporção de área trafegada em relação à total. Como as regiões trafegadas não

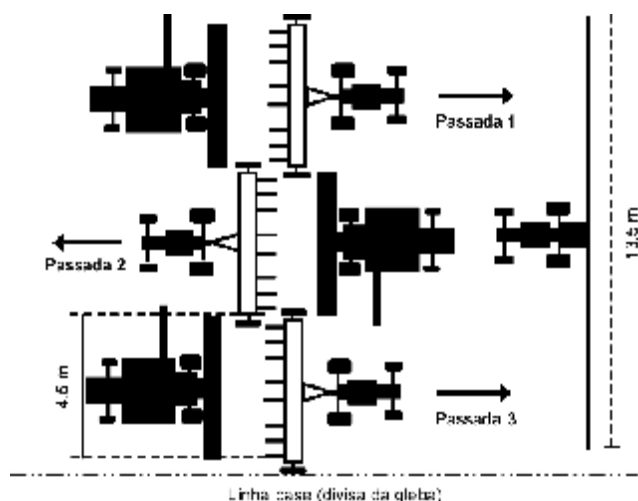


Figura 16. Esquema de tráfego controlado aplicável a sistemas de produção de soja sob semeadura direta.

são cultivadas, a perda de área pode ser mais importante do que o aumento da produtividade e/ou redução de custos, diminuindo assim a rentabilidade da propriedade. Da mesma forma, a implantação dessa prática é dificultada em áreas declivosas, onde a distância entre os terraços é pequena. Outro problema relaciona-se à compatibilização das bitolas do trator e da colhedora, o que nem sempre é possível. Por fim, conforme mencionado anteriormente, as linhas de tráfego não são semeadas, o que implica em redução da área cultivada. No entanto, trabalhos de pesquisa realizados no exterior têm indicado que o aumento na produtividade e a redução nos custos compensam com vantagens a diminuição da área (Raper, 2005). Mesmo assim, a efetiva inclusão do tráfego controlado como medida para a prevenção da compactação necessita de mais estudos sob as condições edafoclimáticas e sistemas de produção brasileiros.

6.1.2. Controle da intensidade de pastejo

A compactação do solo pelo pisoteio animal foi usada durante muitos anos como argumento contrário à implantação de sistemas de integração lavoura-pecuária em áreas manejadas sob semeadura direta, especialmente em solos argilosos. No entanto, a pesquisa e a experiência prática vêm demonstrando ao longo dos anos que, através de um manejo adequado da pastagem, é possível integrar sistemas de produção de grãos e carne sob pastejo direto sem danificar de forma pronunciada a estrutura do solo. Para que esse objetivo seja alcançado, o principal aspecto a ser observado relaciona-se à racionalização da carga animal.

Considerando sistemas de pastejo contínuos e de curta duração (durante o inverno), os resultados de pesquisa têm indicado que o uso de uma carga animal que permita a manutenção de um resíduo de pastagem entre 1,5 a 2 t ha⁻¹ bem distribuído sobre a superfície do solo, durante todo o período de pastejo, não se reflete em aumentos pronunciados no grau de compactação, mesmo em solos muito argilosos (Flores et al., 2007). Nessas condições, se o aumento do grau de compactação ocorrer, ele se restringirá à camada

superficial do solo (0,0-0,1 m), de forma que os efeitos sobre as culturas de grãos poderão ser contornados mediante o emprego de semeadoras-adubadoras equipadas com sulcadores do tipo haste. Em sistemas de pastejo rotacionados também conduzidos durante o outono-inverno, Lanzanova et al. (2007) encontraram que, quando os pastejos foram realizados a cada 14 dias, a compactação pelo pisoteio foi detectada até 0,15 m de profundidade. Por outro lado, períodos de descanso de 28 dias limitaram o aumento do grau de compactação à camada de 0,0-0,05 m. Neste trabalho, os animais foram mantidos na área até que a pastagem atingisse uma altura 0,10 m.

Em sistemas mistos de integração lavoura-pecuária, onde pastagens perenes implantadas em rotação a culturas de grãos ocupam as áreas por períodos superiores a um ano, observa-se que, em geral, o pisoteio animal não aumenta o grau de compactação do solo (Spera et al., 2004). Pelo contrário, algumas pesquisas têm demonstrado que a rotação de culturas anuais com pastagens tem proporcionado melhorias substanciais na qualidade física do solo (Salton et al., 1999; Stone et al., 2003), devido, principalmente, aos efeitos benéficos do sistema radicular abundante e agressivo das plantas forrageiras. Entretanto, quando a pastagem é composta por forrageiras de hábito de crescimento cespitoso, como o *Panicum maximum*, a ocorrência de áreas descobertas entre as touceiras pode intensificar os efeitos negativos do pisoteio animal sobre a estrutura do solo (Marchão et al., 2007). Estes autores, trabalhando em um Latossolo argiloso, concluíram que o grau de compactação do solo em uma área ocupada por pastagem de *P. maximum* por quatro anos foi maior comparativamente à cultivada com lavoura contínua de soja por igual período, até 0,15 m de profundidade.

No intuito de evitar a redução da qualidade física do solo pelo pisoteio animal em sistemas mistos de integração lavoura-pecuária, atenção especial deve ser dispensada à definição do período de tempo sob o qual uma determinada área é utilizada para pastejo. Em alguns casos, a qualidade física do solo sob pastagens perenes, mesmo decorridos dez anos de sua implantação, mantém-se em um nível superior comparativamente a áreas exploradas continuamente com culturas anuais (Alvarenga & Davide, 1999). Por outro lado, avaliações preliminares realizadas pela equipe de manejo do solo da Embrapa Soja, em uma unidade de observação de sistemas mistos de integração lavoura-pecuária em Jardim Olinda/PR, implantada sobre um solo arenoso, mostram uma tendência de a RP na camada de 0,05-0,15 m ser maior para a pastagem de *Brachiaria brizantha* de dois anos comparativamente a de um ano (Figuras 17b e 17c). Porém, tanto a pastagem de um ano quanto a de dois anos resultaram em menores valores de resistência à penetração comparativamente à sucessão milho + *Brachiaria brizantha*/soja (Figura 17a), avaliada no segundo ano. Isto evidencia que a implantação de pastagens perenes pode melhorar a qualidade física do

6.1.3. Aumento da resistência do solo à compactação

O principal fator que governa a resistência do solo à compactação é o teor de água do mesmo. A

susceptibilidade do solo à compactação não aumenta linearmente com o incremento da umidade do solo. Na verdade, essa relação é quadrática, de forma que existe um teor de água no solo em que a compactação é máxima (umidade crítica), o qual pode ser determinado pelo ensaio de Proctor. Este comportamento ocorre porque, quando o solo está seco, o aumento da umidade resulta na formação de filmes de água ao redor das partículas, o que reduz o atrito e facilita a compactação. No entanto, acima de um determinado valor (umidade crítica), parte da energia de compactação passa a incidir sobre a água que se acumula no espaço poroso, e não sobre os pontos de contato entre as partículas e agregados do solo. Com isso, a energia disponível para provocar o rearranjo e/ou ruptura dos agregados e partículas é menor, resultando numa menor compactação.

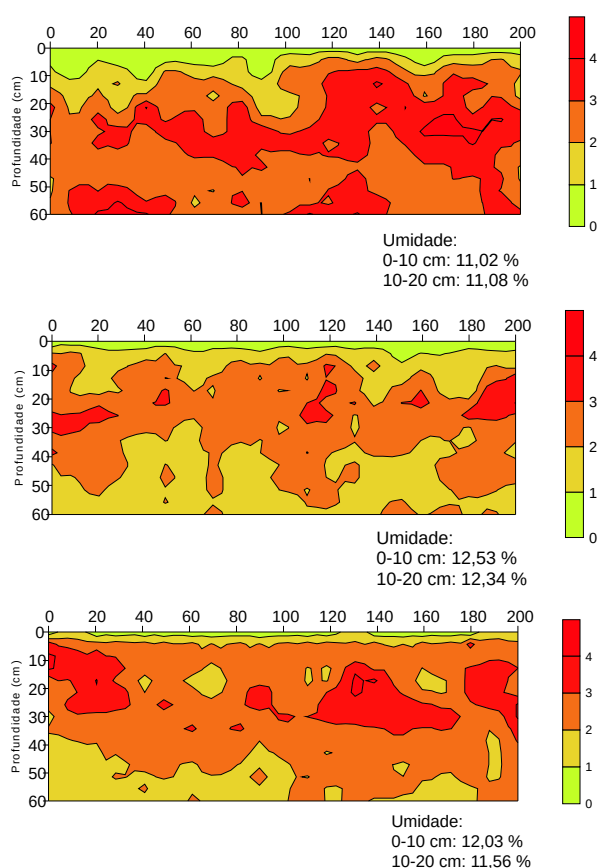


Figura 17. Perfis da resistência do solo à penetração, determinados em áreas ocupadas pela sucessão milho safrinha + *Brachiaria brizantha*/soja durante dois anos (a) e por pastagem de *Brachiaria brizantha* durante um (b) e dois anos (c).

Os valores de umidade de solo em que a compactação é máxima são bastante variáveis, sendo afetados principalmente pelo teor de argila e de matéria orgânica do solo e pela energia de compactação. Quanto maior a energia compactante e o teor de argila e de matéria orgânica do solo, maior será a umidade crítica. Em geral, a máxima compactação do solo ocorre em teores de água próximos aos equivalentes à capacidade de campo e ao limite de plasticidade. Isso significa, em termos práticos, que a intensidade do processo de compactação do solo pode ser minimizada se o tráfego

ou o pisoteio animal forem realizados em umidades do solo similares ou inferiores às correspondentes à consistência friável. Entretanto, é importante considerar que a compactação pode ocorrer mesmo quando o solo estiver com umidades inferiores à crítica, desde que a pressão aplicada seja maior que a resistência do mesmo à deformação. O teor de água do solo afeta ainda a forma com a qual as pressões aplicadas pelos rodados ou patas dos animais se distribuem no interior do solo. Quanto maior a umidade do solo, maior a profundidade atingida pelas pressões, porém, menor é o alcance horizontal das mesmas. Isso significa que a compactação pode ocorrer a maiores profundidades quando o solo for trafegado sob maiores umidades.

A resistência do solo à compactação pode ser aumentada também através de práticas de manejo adequadas, que incrementem a estabilidade estrutural. Entre essas medidas, merece destaque a adoção de sistemas de rotação de culturas que incluam plantas com alto potencial para produção de biomassa da parte aérea e raízes, o será discutido com maiores detalhes a seguir.

6.2. Preventivas/corretivas

6.2.1. Plantas de cobertura do solo

A inclusão, em sistemas de rotação de culturas com a soja, de plantas de cobertura com elevado potencial para a produção de fitomassa, dotadas de um sistema radicular abundante, profundo e agressivo, constitui-se em uma das principais práticas de controle da compactação do solo. A adição de resíduos orgânicos provenientes da parte aérea e raízes dessas plantas resulta no aumento do teor de matéria orgânica do solo e da atividade biológica que, em conjunto com a união mecânica das partículas e agregados do solo proporcionada pelo sistema radicular, resulta no aumento da estabilidade estrutural. Uma estrutura estável, por sua vez, confere ao solo maior resistência à compactação. Ao mesmo tempo, a matéria orgânica aumenta a elasticidade da matriz do solo, permitindo a recuperação de parte da sua porosidade a partir do momento em que a pressão aplicada ao mesmo cessa. Os resíduos das plantas de cobertura, uma vez mantidos em superfície (semeadura direta), evitam a desagregação pelo impacto da gota da chuva e pelo aumento da pressão interna dos agregados devido ao aprisionamento de ar ocasionado pelo umedecimento rápido dos agregados. Além disso, existem algumas evidências de que a presença de uma grande quantidade de palha na superfície do solo dissipa parte das pressões aplicadas pelos rodados e patas dos animais. Diante disso, fica comprovado que as plantas de cobertura constituem-se numa medida eficiente para a prevenção do processo de compactação do solo.

Além de prevenir a compactação, o uso de plantas de cobertura tem sido recomendado como alternativa à recuperação física de solos compactados. Tal recomendação baseia-se na abertura de novos poros e/ou aumento do diâmetro dos pré-existentes através do sistema radicular das plantas de cobertura, originando bioporos estáveis, longos e contínuos e, assim, de alta efetividade para a transmissão de água e ar. Bioporos também podem ser produzidos pela fauna do solo, cuja

atividade é estimulada pelo uso de plantas de cobertura, em virtude da maior disponibilidade de resíduos orgânicos e da formação de um ambiente favorável (temperatura e umidade) à mesma. Após a decomposição das raízes, os bioporos podem ser utilizados pelo sistema radicular das culturas comerciais para atravessar camadas compactadas e, desse modo, explorar um maior volume de solo.

É importante destacar que a abertura de bioporos não é o único processo envolvido na diminuição do grau de compactação do solo pelas plantas de cobertura. Essas, ao aumentar o teor de matéria orgânica do solo e a atividade biológica, bem como ao unir fisicamente agregados menores em unidades maiores, devido à ação do sistema radicular, resultam na formação de agregados maiores, o que aumenta o volume de poros e, conseqüentemente, diminui o grau de compactação do solo. Tal fato foi comprovado por um levantamento realizado pela Embrapa Soja, em conjunto com a EMATER/PR, englobando propriedades rurais localizadas na região de Arapongas/PR (dados não publicados). Os resultados obtidos nesse trabalho demonstram que o grau de compactação, estimado pela densidade do solo, diminui linearmente em função do incremento nos teores de matéria orgânica do solo, para todas as profundidades avaliadas (Figura 18).

A eficiência da adoção de sistemas de rotação de culturas envolvendo a implantação de plantas de cobertura como medida de controle da compactação do solo vem sendo comprovada em diversos trabalhos realizados pela Embrapa Soja (Torres & Saraiva, 1999). Os resultados de um deles são mostrados nas Figuras 19a e 19b. Verifica-se claramente que a substituição da sucessão trigo/soja por um sistema de rotação de culturas de quatro anos (tremço/milho – aveia/soja – trigo/soja – trigo/soja) diminuiu de forma significativa a RP, o que foi mais evidente na camada de 0,05-0,15 m.

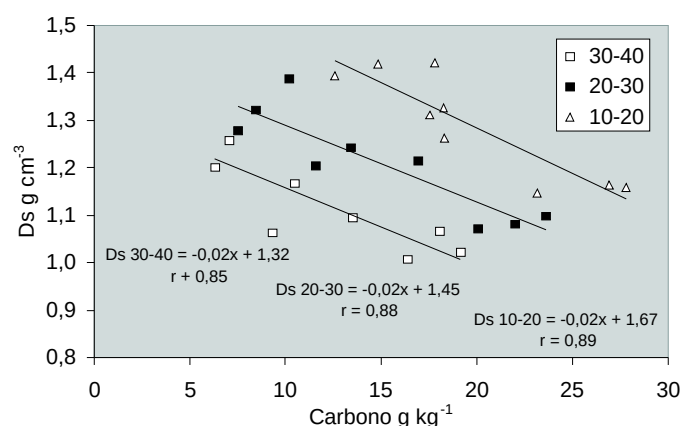


Figura 18. Relação entre o teor de matéria orgânica e a densidade do solo, em propriedades rurais da região de Arapongas/PR, safra 2006/07.

Características como a elevada produção e persistência dos resíduos orgânicos e o sistema radicular abundante e fasciculado, fazem das gramíneas, como a aveia preta, o azevém, o milheto, o sorgo forrageiro e as braquiárias, entre outras, as plantas mais adequadas quando o objetivo é prevenir a compactação excessiva do

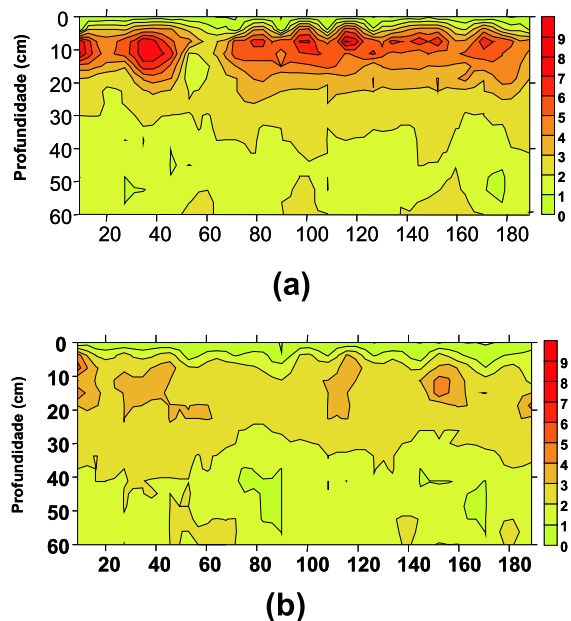


Figura 19. Perfis de resistência do solo à penetração, determinados em um Latossolo Vermelho distroférico manejado há doze anos sob semeadura direta em sistema de sucessão (trigo/soja) (a) e rotação (tremço/milho – aveia/soja – trigo/soja – trigo/soja) (b).

solo através do aumento da resistência do mesmo à deformação. Quando se pensa no rompimento de camadas compactadas por métodos biológicos, a solução normalmente recai sobre plantas com sistema radicular pivotante (Figura 20), como o nabo forrageiro e algumas espécies pertencentes à família das leguminosas, entre as quais se destacam o tremço, as crotalárias e o guandu. No entanto, as gramíneas também têm se mostrado eficientes na diminuição do grau de compactação do solo (Debiasi, 2008). Consórcios entre plantas de cobertura com características diferentes mas exigências climáticas semelhantes também podem ser utilizados, o que possibilita conciliar os aspectos positivos das espécies consorciadas. Como exemplo, pode-se citar, para o inverno, o consórcio aveia preta + nabo forrageiro e, para o outono, milheto + guandu.



Figura 20. Sistema radicular pivotante do guandu. Fonte: Torres & Saraiva (1999).

Os maiores entraves ao uso de plantas de cobertura sempre foram atribuídos à concorrência por área com as culturas comerciais, bem como às limitações de ordem climática durante o inverno (falta de chuvas) que ocorrem a partir do norte paranaense em direção à região centro-oeste do Brasil. Visando minimizar esses problemas, diversos consórcios entre culturas comerciais de verão e plantas de cobertura com potencial para recuperação de áreas compactadas vêm sendo desenvolvidos com a participação da Embrapa Soja. Uma das alternativas preconizadas envolve a implantação do consórcio milho + guandu (Figura 21) ou milho + crotalária, durante a primavera-verão. De acordo com Torres & Saraiva (1999), a semeadura do milho é realizada até o início do mês de outubro. O guandu ou a crotalária são implantados de forma mecanizada e nas entrelinhas do milho (Figura 22), cerca de 20 a 35 dias após a emergência dessa cultura. Recomenda-se utilizar duas linhas das espécies de cobertura em cada entrelinha do milho (semeado a um espaçamento de 0,9 m), a uma densidade de semeadura tal que se atinja, aproximadamente, 50-60 plantas m^{-2} para o guandu, e 20-30 plantas m^{-2} para a crotalária. Esses consórcios também podem ser utilizados na safrinha.



Figura 21. O consórcio milho-guandu é uma alternativa biológica para recuperar solos compactados. Foto: Celso A. Gaudêncio.



Figura 22. Semeadura do guandu de forma mecanizada, 25 a 30 dias após a emergência do milho. Foto: Celso A. Gaudêncio.

Outra maneira de viabilizar a inclusão de plantas de cobertura em sistemas de produção com a soja, sem que concorram por área com as culturas comerciais, envolve a implantação do consórcio milho safrinha + *Brachiaria ruziziensis* ou *Brachiaria brizantha* (Figuras 23 e 24). A semeadura das espécies componentes desse consórcio é realizada simultaneamente, sendo

linha de braquiária em cada uma das entrelinhas do milho. Nesse caso, pode-se utilizar a mesma semeadora empregada para a soja, sendo os depósitos das linhas de semeadura preenchidos de forma alternada com sementes de milho e braquiária. Nas linhas de semeadura da braquiária, recomenda-se utilizar discos dosadores adequados à semeadura do sorgo, se possível, com furos um pouco maiores. Um outro procedimento é misturar as sementes de braquiária junto ao adubo, de forma que a semeadura da forrageira é realizada a uma maior profundidade comparativamente ao milho, o que retarda a emergência da mesma. Assim, a semeadora deve ser equipada apenas com as linhas de semeadura do milho. A densidade de semeadura recomendada para o consórcio é de 200 a 250 pontos de valor cultural. Ou seja, para um valor cultural (% de germinação x % de sementes puras, sendo esse resultado dividido por 100) de 60, deve-se utilizar de 3 a 4 $kg\ ha^{-1}$ de sementes. Após a colheita do milho, as forrageiras podem ser utilizadas para pastejo, numa carga animal tal que a altura das plantas seja mantida em aproximadamente 0,45 m, no intuito de evitar compactação pelo pisoteio.



Figura 23. Consórcio milho safrinha + *Brachiaria ruziziensis*, implantado em Maria Helena/PR, safra 2008.



Figura 24. Sistema radicular da *Brachiaria ruziziensis*.

6.3. Corretivas

As medidas de controle da compactação aqui sugeridas, cuja natureza é estritamente corretiva, envolvem a mobilização mecânica do solo dentro do sistema de semeadura direta, através do emprego de hastes sulcadoras para deposição do adubo nas semeadoras e da escarificação. É importante salientar que essas medidas, especialmente no caso da escarificação, devem ser adotadas somente quando as demais práticas anteriormente sugeridas não forem suficientes para controlar o problema da compactação do solo.

6.3.1. Hastes sulcadoras

O uso de hastes sulcadoras para deposição do adubo em substituição aos discos duplos possibilita o rompimento localizado de camadas compactadas superficialmente, possibilitando que as raízes cresçam através delas. Além disso, o emprego de hastes sulcadoras permite a deposição do adubo a maiores profundidades, o que pode estimular o crescimento das raízes em profundidade, uma vez que os nutrientes, em semeadura direta, concentram-se na superfície do solo (0,0-0,1 m). De acordo com alguns trabalhos de pesquisa, o aumento da profundidade de atuação dos mecanismos sulcadores das semeadoras-adubadoras têm se refletido em maiores produtividade de grãos da soja, considerando áreas compactadas em superfície e sob condições de deficiências hídricas moderadas (Xavier, 2005; Beutler, 2005). Em termos econômicos, esse aumento tem compensado o maior consumo de combustível por unidade de área durante a semeadura quando do uso de hastes sulcadores trabalhando a maiores profundidades (Xavier, 2005). Por outro lado, a resposta da produtividade de grãos da soja ao aumento da profundidade de mobilização do solo durante a semeadura é pequena ou mesmo inexistente em solos com boa qualidade física em superfície e/ou quando não se observa deficiências hídricas pronunciadas em períodos críticos da cultura (Debiasi, 2008).

Além do aumento do consumo de combustível devido a maior exigência de força de tração e à diminuição da velocidade de trabalho, um dos principais problemas que podem ocorrer em decorrência do uso de hastes sulcadoras é a excessiva mobilização da superfície do solo (Figura 25). Isso resulta na exposição da superfície do solo ao impacto direto das gotas de chuva, o que pode acarretar na formação de crostas superficiais e em aumentos nas perdas de água e solo por erosão hídrica. A mobilização excessiva pode, ainda, prejudicar a germinação e a emergência das culturas e aumentar a infestação por plantas daninhas. A seleção de hastes sulcadoras com ponteiros estreitos (largura inferior a 2,5 cm) e caracterizadas por um ângulo de ataque em relação à superfície do solo próximo a 20° (Figura 26), constitui-se em uma das principais medidas para diminuir a mobilização da superfície do solo durante a semeadura com esse tipo de sulcador. Além de diminuir a mobilização da superfície do solo, hastes com essas características exigem uma menor força de tração e penetram no solo mais facilmente, podendo atingir profundidades de até 0,15 m, mesmo quando utilizadas em semeadoras leves.



Figura 25. Área cuja superfície do solo foi excessivamente mobilizada durante a semeadura da soja com sulcadores do tipo haste. Foto: Renato Levien.



Figura 26. Exemplo de haste sulcadora com ponteira estreita e ângulo de ataque próximo a 20°.

No entanto, para evitar a mobilização excessiva do solo, é importante a observação de outros cuidados durante a operação de semeadura. Velocidades de semeadura acima de 7 km h⁻¹ devem ser evitadas, pois resultam na expulsão do solo a uma distância grande demais para o sistema de recobrimento das semeadoras trazê-lo de volta ao sulco. Deve-se ainda, sempre que possível, realizar a semeadura com o solo em sua consistência friável. Altas umidades durante a semeadura resultam na adesão de solo e restos culturais à haste e à ponteira, aumentando a largura efetiva das mesmas e, em consequência, a mobilização do solo. A observação dessas medidas resulta na chamada “semeadura invisível”, mesmo quando da utilização de hastes sulcadoras (Figura 27).

Outro problema relacionado ao emprego das hastes sulcadoras é o aumento da ocorrência de embuchamentos, os quais prejudicam a qualidade da semeadura e diminuem a capacidade operacional do conjunto trator/semeadora. Além da correta manutenção e regulagem dos discos de corte de palha colocados à frente das hastes, a frequência dos embuchamentos pode ser significativamente reduzida evitando-se a semeadura em solos com umidade superior ao limite de plasticidade. Solos excessivamente úmidos não oferecem o suporte necessário para o corte do resíduo, de forma que, ao invés de ser segmentado, eles se aprofundam no solo. O trabalho do disco de corte também é dificultado quando os resíduos não se encontram completamente secos, mas sim “murchos”. Resíduos com essa característica, sob ação do disco de corte, deformam-se sem ser segmentados. Semeadoras com linhas desencontradas (alternância de linhas curtas e compridas) facilitam o fluxo da palha, diminuindo a ocorrência dos embuchamentos. Mesmo com esses cuidados, em alguns casos (grande quantidade de palha e/ou resíduos difíceis de cortar, como touceiras), o problema dos embuchamentos só será resolvido aplicando-se algum tipo de tratamento mecânico aos restos vegetais (rolo-faca, picadores de palha, entre outros).



Figura 27. Mesmo com a utilização de hastes sulcadoras, é possível obter uma semeadura “invisível”. Foto: Renato Levien.

6.3.2. Escarificação

Quando o grau de compactação do solo é muito elevado e/ou nenhuma das outras medidas de controle desse problema, aplicadas isoladamente ou em conjunto, foi suficiente para minimizá-lo, deve-se então optar pela mobilização mecânica do solo em área total. Dentre as opções de métodos de preparo do solo disponíveis, a escarificação é aquela que, se bem executada, resulta nos menores prejuízos à estrutura e ao teor de matéria orgânica do solo, sendo também capaz de manter a superfície do solo com uma cobertura por resíduos vegetais aceitável.

Para que a escarificação rompa camadas compactadas de maneira eficiente, mantendo a superfície do solo razoavelmente coberta e sem desagregação excessiva, deve-se utilizar, preferencialmente, escarificadores equipados com discos de corte de palha, rolo destorroador/nivelador, hastes com formato parabólico e ponteiras estreitas, com largura inferior a 7 cm (Figura 28). É muito importante também evitar a realização de gradagens de nivelamento e destorroamento após a escarificação. Para que isso seja possível, é necessário que, em adição ao uso de rolos destorroadores/niveladores, a escarificação seja realizada com o solo em sua consistência friável. Quando executada em solos secos, a escarificação produz torrões muito grandes, praticamente inviabilizando a implantação das culturas subsequentes sem gradagem, além de resultar num aumento expressivo da força de tração demandada pelo equipamento. Por outro lado, escarificar sob altos teores de água no solo é jogar dinheiro fora, pois, nessa condição, o solo não será mobilizado de forma adequada nas regiões posicionadas entre as hastes.



Figura 28. Exemplo de escarificador adequado para descompactação do solo em sistemas manejados sob semeadura direta.

Tendo em vista a ausência de gradagem, também é importante que a escarificação preceda a implantação de culturas que apresentem rusticidade para germinar e emergir, como o trigo e a aveia preta. Isso garante um bom estabelecimento da lavoura, mesmo que a superfície do solo não esteja perfeitamente nivelada e destorroadada. É recomendável também que o solo seja escarificado após a colheita da soja, devido ao fato dessa cultura produzir uma quantidade relativamente pequena de resíduos vegetais que, uma vez

fragmentados e distribuídos uniformemente sobre o solo, permitem que a escarificação seja realizada com uma baixa frequência de embuchamentos. Quando da semeadura sobre áreas escarificadas, o embuchamento da semeadora-adubadora pode se constituir em um grande problema, tendo em vista a presença de palha solta na superfície associada à baixa capacidade de suporte do solo. Para diminuir a frequência dos embuchamentos deve-se, além de não escarificar após a cultura do milho, esperar uma ou duas chuvas antes da semeadura, para que o solo se assente.

A escarificação esporádica dentro do sistema de semeadura direta nem sempre resulta em aumentos na produtividade das culturas. A resposta das plantas à escarificação parece depender da espécie vegetal, do tipo de solo, das condições climáticas e do grau de compactação inicial. Nesse sentido, resultados obtidos em um experimento de longa duração conduzido a partir da safra 88/89 até a safra 2006/07 na Embrapa Soja (dados não publicados), sobre um Latossolo muito argiloso, demonstram que, sob rotação de culturas, a escarificação a cada três anos proporcionou maiores produtividades de soja em sete (50%) das 14 safras cultivadas com essa oleaginosa (Figura 29). Em duas safras, a produtividade foi menor no sistema de semeadura direta escarificada e, nos outras cinco, as diferenças entre os tratamentos foram pequenas. No caso da sucessão de culturas, os resultados mostrados na Figura 29 evidenciam que em apenas uma das 19 safras avaliadas a escarificação aumentou a produtividade da soja. Em cinco ocasiões, essa prática diminuiu a produtividade da soja e, nas 13 safras restantes, as diferenças entre os sistemas de manejo estudados foram pequenas.

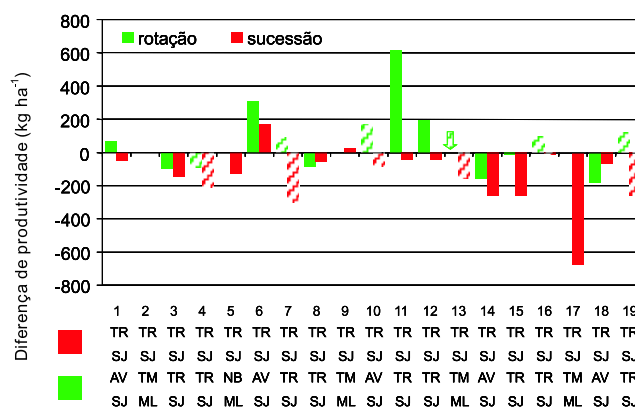


Figura 29. Diferença de produtividade da soja entre a semeadura direta com e sem escarificação a cada três anos, em função do sistema de culturas utilizado (rotação ou sucessão). Faixas diagonais indicam a safra em que a escarificação foi realizada.

Existem controvérsias na bibliografia quanto à duração dos efeitos da escarificação. Alguns trabalhos indicam que as melhorias proporcionadas por essa operação persistem por um curto período de tempo, correspondente a aproximadamente uma safra (Corsini & Ferraud, 1999; Botta et al., 2006) ou a um ano (Secco & Reinert, 1997; Tavares-Filho et al., 2006). Esse fato é respaldado por pesquisas que detectaram

recompactação em áreas escarificadas após um (Chan et al., 2006) ou dois tráfegos (Reeder et al., 1993; Veiga et al., 2007; Debiasi, 2008), mesmo com a utilização de tratores leves (Veiga et al., 2007; Debiasi, 2008). Em contrapartida, os resultados obtidos por Vieira & Klein (2007) e Rosa (2007) sugerem que os efeitos da escarificação podem perdurar por períodos de dois a três anos. De qualquer forma, fica claro que o principal fator responsável pela recompactação dos solos submetidos à escarificação é o tráfego de máquinas agrícolas, embora o entupimento dos poros, através do impacto das gotas de chuva e dos ciclos de umedecimento e secamento, também colabore para esse processo. Diante disso, os efeitos da escarificação podem ser prolongados mediante a adoção de práticas que estabilizem a estrutura formada, como a semeadura de plantas de cobertura dotadas de um sistema radicular agressivo, abundante e profundo. A racionalização do tráfego de máquinas agrícolas, obedecendo às recomendações descritas no item 6.1.1, também é importante para prolongar o efeito residual da escarificação.

7. Considerações finais

A importância do processo de compactação do solo é justificada tanto pela elevada frequência, quanto pela intensidade e amplitude dos prejuízos por ela ocasionados, que se estendem à produtividade das culturas, aos custos de produção, ao desempenho e à qualidade do trabalho executado pelos conjuntos mecanizados, bem como ao meio ambiente. Diminuições significativas na produtividade das culturas, em função da compactação do solo, somente ocorrem sob condições de deficiência ou excesso hídrico, de maneira que esse problema, muitas vezes, não é detectado.

Diante disso, torna-se necessária a adoção de práticas para o controle da compactação, as quais não modificam somente as propriedades físicas do solo, mas também a resistência do mesmo à recompactação, o desempenho das máquinas agrícolas e a produtividade das culturas. Assim, a opção por uma ou outra medida de redução do grau de compactação deve sempre levar em consideração os seus efeitos sobre o sistema solo-máquina-planta como um todo. É importante considerar que, na maioria das situações, o controle da compactação exige a integração de várias medidas. A melhor e mais barata forma de manejo da compactação é evitá-la. Deste modo, atenção especial deve ser dispensada às práticas de caráter preventivo, como a racionalização do tráfego de máquinas agrícolas, o controle da intensidade de pastejo, a realização das operações mecanizadas e do pisoteio sob baixos teores de água no solo, e o uso de sistemas de rotação de culturas que contemplem a implantação de plantas de cobertura. A mobilização mecânica do solo, através da escarificação, deve ser realizada somente quando o grau de compactação do solo for muito elevado e/ou nenhuma das demais alternativas de controle tenha sido suficiente para a solução do problema. Isto porque a escarificação não ataca a causa do problema, tornando o solo, inclusive, mais suscetível à recompactação. Além disso, essa operação nem sempre resulta em aumentos de produtividade e, em geral, seus efeitos são de curta

duração.

Sem dúvida, a etapa mais crítica dentro de um programa que vise ao controle da compactação do solo é a detecção e monitoramento desse problema, de modo a subsidiar uma correta tomada de decisão a respeito das medidas a serem adotadas. Conforme descrito nesse trabalho, existem diversos indicadores do estado de compactação do solo, porém, a maioria deles é de baixa aplicabilidade em nível de campo. Ao mesmo tempo, a determinação dos níveis críticos dos indicadores quantitativos é difícil, pois a magnitude dos mesmos varia em função do clima, do tipo de solo, da espécie vegetal e do estágio de desenvolvimento, das práticas de manejo adotadas, entre outros fatores. A melhor forma de se realizar um diagnóstico preciso é integrar diferentes indicadores, avaliados dentro de glebas uniformes em termos de histórico de uso, tipo de solo e relevo.

8. Referências

- ALAKUKKU, L.; WEISSKOPF, P.; CHAMEN, W.C.T.; TIJINK, F.G.J.; VAN DER LINDEN, J.P.; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review Part 1. Machine/soil interactions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1-2, p. 145-160, 2003.
- ALVARENGA, M. I. N.; DAVIDE, A. C. Características físicas e químicas de um Latossolo Vermelho-Escuro e a sustentabilidade de agroecossistemas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, n. 4, p.933-942, 1999.
- ASAE - AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **Soil Cone Penetrometer – ASAE S313.3**. Saint Joseph, 2004.
- 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, n. 3, p. 341-358, 1990.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Densidade relativa ótima de latossolos vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 843-849, 2005.
- BEUTLER, J. F. **Parâmetros de solo e máquinas na semeadura direta de milho e soja em duas coberturas de solo sobre campo natural** 2005. 107 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande Sul, Porto Alegre.
- 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 and Tillage Research**, Amsterdam, v. 91, n. 1-2, p.164-172, 2006.
- CEPIK, C.T.C. **Parâmetros de solo e máquinas em semeadura direta com doses de cobertura e configurações de deposição de fertilizante**. 104 f. 2006. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação

em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CHAN, K. Y.; OATES, A.; SWAN, A.D.; HAYES, R. C.; DEAR, B. S.; PEOPLES, M. B. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 89, n. 1, p. 13-21, 2006.

CONTE, O.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; CEPIK, C. T. C.; DEBIASI, H.; Demanda de tração em haste sulcadora na integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo e sua relação com o estado de compactação do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 220-228, 2007.

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

DEBIASI, H. **Recuperação física de um Argissolo compactado e suas implicações sobre o sistema solo-máquina-planta**. 263 f. 2008. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

EMBRAPA. **Manual de métodos e análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: CNPS, 1997. 212 p.

FLORES, J. P. C.; ANGHINONI, I.; CASSOL, L. C.; CARVALHO, P. C. F.; LEITE, J. G. dal B.; FRAGA, T. I. Atributos físicos do solo e rendimento de soja em sistema plantio direto em integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n.4, p. 771-780, 2007.

HAKANSSON, I. A model for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, n. 1-2, p. 105-120, 1990.

KELLER, T.; ARVIDSSON, J. Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, n. 2, p. 191-205, 2004.

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

LANZANOVA, M. E.; NICOLOSO, R. S.; LOVATO, T.; ELTZ, F. L. F.; AMADO, T. J. C.; REINERT, D. J. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 1131-1140, 2007.

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

MAZZETO, F. R.; LANÇAS, K. P. Quem compacta menos? **Cultivar Máquinas**, Pelotas, n.22, p.6-8, 2003.

NEVES, C.S.V.J.; FELLER, C.; GUIMARÃES, M. F.; MEDINA, C. C.; TAVARES-FILHO, J.; FORTIER, M. Soil bulk density and porosity of homogeneous morphological units identified by the Cropping Profile Method in clayey Oxisols in Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.71, n. 2, p. 109-119, 2003.

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

REEDER, R.; WOOD, R., FINCK, H. Five subsoiler designs and their effects on soil properties and crop yields. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 36, n. 6, p. 1525-1531, 1993.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J.A. Manejo, qualidade do solo e sustentabilidade: condições físicas do solo agrícola. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto, SBCS, 2003. 1 CD-ROM.

ROSA, D. P. **Comportamento dinâmico e mecânico sob níveis diferenciados de escarificação e compactação**. 2007. 1112 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SALTON, J. C.; HERNANI, L. C.; BROCH, D. L.; FABRÍCIO, A. C. **Alterações em atributos físicos do solo decorrentes da rotação soja-pastagem, no sistema plantio direto**. Dourados: EMBRAPA Agropecuária Oeste, 1999. 5 p. (EMBRAPA Agropecuária Oeste, Comunicado Técnico, 10).

SECCO, D.; REINERT, D. J. Efeitos imediato e residual de escarificadores em Latossolo Vermelho-Escuro sob plantio direto. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 16, n. 3, p. 52-61, 1997.

SÖHNE, W. H. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. **Agricultural Engineering**, v.39, p. 276-281, 290, 1958.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p. 533-542, 2004.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V. Recomendação para o uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsur-Stolf. **STAB-Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.1, n.3, 1983.

STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A.; KLUTHCOUSKI, J. Influência das pastagens na melhoria dos atributos físico-hídricos do solo. In: KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H. **Integração lavoura-pecuária**. Santo Antônio de Goiás : Embrapa Arroz e Feijão, 2003. p. 59-104.

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.

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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n.2, p. 393-399, 1999.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F.; GALERANI, P. R. **Manejo do solo para a cultura da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 1993. 71 p. (Embrapa Soja. Circular Técnica, 12).

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

VEIGA, M.; HORN, R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, n. 1-2, p. 104-113, 2007.

VIEIRA, M. L.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.6, p. 1271-1280, 2007.

XAVIER, A. **Comportamento da cultura da soja em função de resíduos culturais, mobilização do solo e irrigação, em semeadura direta**. 2005. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande Sul, Porto Alegre.

Patrocínio:



Circular Técnica, 63

Exemplares desta edição podem ser adquiridos na:
Embrapa Soja
Cx. Postal 231
86001-970 - Londrina, PR
Fone: (43) 3371-6000 - Fax: 3371-6100
Home page: <http://www.cnpso.embrapa.br>
e-mail: sac@cnpso.embrapa.br

1ª edição
1ª impressão (2008): tiragem 500 exemplares

Ministério da
Agricultura, Pecuária
e Abastecimento

Governo
Federal

Comitê de Publicações

Presidente: José Renato Bouças Farias
Secretário Executivo: Regina Maria Villas Bôas de Campos Leite
Membros: Antonio Ricardo Panizzi, Claudine Dinali Santos Seixas, Francismar Corrêa Marcelino, Ivan Carlos Corso, Maria Cristina Neves de Oliveira, Norman Neumaier, Rafael Moreira Soares, Sérgio Luiz Gonçalves
Supervisão editorial: Odilon Ferreira Saraiva
Normalização bibliográfica: Ademir Benedito Alves de Lima
Editoração eletrônica: Danilo Estevão

Expediente