

# **COMPACTAÇÃO DO SOLO EM SISTEMAS AGROPECUÁRIOS E FLORESTAIS: IDENTIFICAÇÃO, EFEITOS, LIMITES CRÍTICOS E MITIGAÇÃO**

José Miguel Reichert<sup>(1)</sup>; Luis Eduardo Akiyoshi Sanches Suzuki<sup>(1)</sup> &  
Dalvan José Reinert<sup>(1)</sup>

Introdução .....	50
Conceitode compactação .....	52
Causas da compactação .....	53
Localização espacial da compactação .....	55
Profundidade da compactação .....	57
Compactação e relação com as propriedades físicas e mecânicas do solo .....	60
Condutividade hidráulica, infiltração e armazenamento de água no solo .....	60
Estrutura do solo .....	64
Estabilidade de agregados .....	64
Resistência mecânica do solo à penetração .....	65
Densidade e porosidade do solo .....	70
Índice de saturação hídrica .....	73
Grau de compactação .....	76
Pressão de preconsolidação .....	78
Compactação e relação com o crescimento e produtividade de plantas .....	81
Crescimento radicular .....	81
Crescimento aéreo e produtividade .....	85
Compactação e relação com o meio ambiente .....	88
Valores críticos ou limitantes indicadores de compactação .....	90
Macroporosidade .....	92
Resistência mecânica do solo à penetração .....	93
Densidade do solo .....	95
Grau de compactação .....	99
Pressão de preconsolidação .....	99
Proposta para obtenção de valores indicadores de compactação do solo .....	101
Condutividade hidráulica do solo saturado .....	101
Condutividade hidráulica e macroporosidade do solo .....	102
Condutividade hidráulica e grau de compactação .....	103
Resistência mecânica do solo à penetração .....	103
Pressão de preconsolidação .....	105
Pressão de preconsolidação e resistência mecânica do solo à penetração .....	105
Pressão de preconsolidação e densidade do solo .....	106

---

---

---

Medidas preventivas para evitar a compactação .....	106
Recuperação de solos compactados .....	114
Considerações finais .....	119
Literatura citada .....	121

## INTRODUÇÃO

A compactação do solo é um problema antigo e intensificou-se com a modernização da agricultura, principalmente pelo uso de máquinas cada vez maiores e mais pesadas. A compactação em áreas agrícolas e em pastagens ocorre, geralmente, em uma camada encontrada até, no máximo, a 20 cm, enquanto, em áreas florestais, a compactação pode atingir maiores profundidades. No plantio convencional, essa camada compactada era rompida pelos implementos de preparo do solo, transferindo a compactação para maiores profundidades pelo tráfego e contato dos implementos com o solo subsuperficial. No sistema plantio direto ou em pastagens, como não há revolvimento, a compactação do solo fica mais restrita à sua superfície. Em áreas florestais, com o possível revolvimento do solo<sup>(2)</sup> a compactação é eliminada até à camada de ação dos implementos, porém, em áreas sob condução de rebrota, a compactação permanece.

O estudo da compactação é complexo, pois, assim como os solos (Brida, 2004; Silva et al., 2006b,c), as culturas também respondem diferentemente à compactação do solo (Foloni et al., 2006). As culturas da soja, milho, algodão e *Brachiaria brizantha* responderam diferentemente quanto à área foliar, produção de matéria seca da parte aérea e altura em relação aos níveis de compactação, representados pela densidade de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico (569 g kg<sup>-1</sup> de areia, 90 g kg<sup>-1</sup> de silte e 341 g kg<sup>-1</sup> de argila) em vaso (Silva et al., 2006a). Portanto, as decisões a serem tomadas em relação ao manejo do solo devem ser, muitas vezes, específicas para cada situação. Em função disso, há necessidade de estudar a compactação em diferentes solos, culturas, variedades e condições climáticas.

Quando o solo é compactado, sua resistência é aumentada e a porosidade total é reduzida às custas dos poros maiores. Com isso, o conteúdo volumétrico de água e a capacidade de campo são aumentados enquanto a aeração, a taxa de infiltração de água e a condutividade hidráulica do solo saturado são

reduzidas. Conseqüentemente, o escoamento superficial de água pode aumentar e o crescimento das plantas ser reduzido em virtude da diminuição da disponibilidade de água, restrição ao crescimento das raízes e aeração deficiente. Por outro lado, a compactação pode aumentar a tração e, conseqüentemente, a eficiência das máquinas movimentando-se na área (Greacen & Sands, 1980). Esse efeito benéfico da compactação no aumento da tração e, conseqüentemente, melhor desempenho das máquinas embora de grande relevância, é um assunto ainda pouco abordado na literatura, uma vez que o efeito da compactação na qualidade do solo e produtividade das culturas é o interesse principal.

Vários artigos, revisões e livros têm abordado extensivamente o problema da compactação. Contudo, poucos são os trabalhos relativos a esse assunto no Brasil, tanto na área agrícola, quanto pecuária e florestal. Além disso, avanços científicos, tais como: o intervalo hídrico ótimo e os valores referência das propriedades do solo, devem ser contextualizados para tomada de decisões relacionadas com o manejo. A maioria das revisões sobre a compactação do solo enfoca o tema para solos revolvidos anualmente, discutindo-se minimamente sobre a compactação em solos não revolvidos.

No exterior, Greacen & Sands (1980) fizeram uma revisão sobre a compactação em solos florestais. Modelagem, índices e métodos de avaliação da compactação foram abordados por Soane et al. (1980/1981), Gupta & Allmaras (1987), Canarache (1991), Hadas (1994) e Defossez & Richard (2002). A abordagem da compactação e do desenvolvimento das culturas foi realizada por Håkansson et al. (1988), Taylor & Brar (1991), Arvidsson & Håkansson (1991), Unger & Kaspar (1994), Vepraskas (1994) e Lipiec & Hatano (2003). Estratégias de prevenção e possíveis soluções para a compactação foram temas de revisões de Alakuku et al. (2003), Chamen et al. (2003) e Hamza & Anderson (2005). Soane & van Ouwerkerk (1995) editaram um livro sobre compactação do solo e produtividade das culturas, no qual vários autores destacaram o tema, desde o processo de compactação até seus efeitos no solo e nas plantas. O'Sullivan & Simota (1995) fizeram uma revisão sobre modelos de compactação do solo e sua combinação com modelos de impactos ambientais e produção de culturas. Horn et al. (2000) editaram um livro sobre a compactação subsuperficial do solo, em que pesquisadores relataram suas experiências sobre o tema, bem como os processos, conseqüências, modelagem e métodos de avaliação. Lipiec et al. (2003) realizaram uma revisão da modelagem do crescimento das culturas e movimento da água e substâncias químicas em relação à compactação na superfície e subsuperfície.

No Brasil, Seixas (1988) fez uma breve descrição sobre as causas, efeitos e práticas de controle da compactação do solo graças à mecanização florestal. Fernandes & Souza (2001) frisaram a escassez de informações sobre a compactação do solo causada pelas máquinas florestais. Dias Junior (2000) abordou a compactação em termos de mecânica do solo, apresentando modelos baseados no teste de compressão uniaxial e teste de Proctor normal. As causas e os efeitos da compactação foram abordados por Richart et al. (2005), em uma revisão sobre o assunto. Há dez anos, Camargo & Alleoni (1997) publicaram um livro dedicado à "Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas", dando uma noção abrangente do tema e chamando a atenção para pontos fundamentais do processo de compactação. Reichert et al. (2004) abordaram o problema da compactação em plantio direto, propondo alguns limites críticos e formas de mitigação. Silva & Giarola (2001) e Silva et al. (2004b) abordaram indiretamente o tema compactação do solo; enquanto os primeiros, Silva & Giarola (2001), estabeleceram um índice baseado na resistência dos solos para quantificação do grau de coesão em solos, os segundos, Silva et al. (2004b), descreveram o intervalo hídrico ótimo, desde sua origem até sua aplicação em estudos de qualidade física do solo.

Apesar de a compactação como processo físico estar relativamente bem caracterizado, ainda persistem questionamentos feitos por técnicos e produtores rurais a respeito da compactação do solo em sistema plantio direto: como identificar a compactação? É necessário revolver o solo periodicamente para eliminar a compactação? Com que frequência deve-se revolver o solo? Até qual profundidade deve-se revolvê-lo? Qual o impacto da compactação na produtividade? Essas são questões comuns feitas por produtores em várias regiões do mundo (Benjamin et al., 2003). Esta revisão, portanto, tem como escopo tentar responder algumas dessas e outras questões relacionadas com a compactação do solo.

## CONCEITO DE COMPACTAÇÃO

A compactação é definida como sendo o adensamento dos solos pela aplicação de energia mecânica (Holtz & Kovacs, 1981). Hillel (1998) afirma que a compactação do solo pode ser considerada do ponto de vista da engenharia civil ou da agronomia. Para este último, a compactação é uma consequência indesejada da mecanização que reduz a produtividade biológica do solo e, em casos extremos, o torna inadequado ao crescimento das plantas.

Tanto o fenômeno de compactação causado pelo manejo inadequado do solo como aquele causado por processos pedogenéticos (fragipans,

duripans, plintitas, petroplintitas, etc.), são denominados adensamento (Dias Junior, 2000). Contudo, Curi et al. (1993) definem compactação como sendo uma diminuição do volume do solo ocasionada por compressão, acarretando um rearranjo mais denso das partículas do solo e conseqüente redução da porosidade, enquanto adensamento é a redução natural do espaço poroso e conseqüente aumento da densidade de camadas ou horizontes do solo por dessecação, iluviação ou precipitação química. A compactação é resultado da ação antrópica e o adensamento é um fenômeno natural.

Naturalmente, o solo pode tornar-se adensado como conseqüência da sua composição textural, regime de umidade e gênese. Selo superficial pode ser formado pela exposição do solo à ação das gotas de chuva, impactando e dispersando o solo, seguido de secagem e endurecimento da camada superficial, constituindo a crosta superficial (Reichert & Cabeda, 1992; Reichert et al., 1992; Reichert & Norton, 1994, 1995). A compactação natural das camadas subsuperficiais pode ser devida ao empacotamento dos sedimentos granulares, parcialmente cimentados. Camadas endurecidas, chamadas de hardpans, podem, em casos extremos, exibir propriedades de uma rocha (nesse caso denominadas fragipans), tomando-se quase que completamente impenetráveis por raízes, água e ar (Hillel, 1998). O possível aumento da densidade do solo pela migração de argilas, portanto não causado pelo tráfego de máquinas e animais, é destacado por Denardin et al. (2001) em Latossolos no Sul do Brasil. De acordo com esses autores, o calcário aplicado superficialmente pode atuar na dispersão dos solos em microagregados, ou, em partículas unitárias. A água de percolação promove a eluviação dos minerais de argila dispersos na camada superficial do solo, bem como o rearranjo dessas partículas na zona de deposição, obstruindo a porosidade natural do solo e elevando a densidade. Contudo, esse problema ainda merece mais estudos.

Antropicamente, o solo pode tornar-se compactado principalmente pelo uso de máquinas e implementos agrícolas e pelo pisoteio de animais.

## CAUSAS DA COMPACTAÇÃO

As forças causadoras da compactação atuantes no solo podem ser classificadas em externas e internas. O tráfego de veículos, animais ou pessoas e o crescimento de raízes que aproximam as partículas do solo

para sua passagem são responsáveis pelas forças externas. Os ciclos de umedecimento e secagem, congelamento e degelo e expansão e contração da massa do solo respondem pelas forças internas (Camargo & Alleoni, 1997).

Os diferentes sistemas de manejo do solo têm a finalidade de criar condições favoráveis ao crescimento e desenvolvimento das culturas. Todavia, o desrespeito às condições mais favoráveis (solo úmido ou consistência friável) para o preparo do solo e o uso de máquinas cada vez maiores e pesadas para essas operações podem levar a modificações da sua estrutura, causando-lhe compactação, interferindo na densidade do solo, na porosidade, na infiltração de água e no crescimento radicular das culturas, e, conseqüentemente, na redução da produtividade (De Maria et al., 1999).

Embora a mecanização tenha contribuído para facilitar e agilizar o trabalho do homem no campo, associado a essa técnica, tem-se, em muitas situações, a compactação do solo. A mecanização tem sido uma constante na agricultura atual, sendo a produtividade comprometida muitas vezes pelo excesso ou pela inadequação de práticas a que o solo é submetido, desde o seu preparo até à colheita da cultura que nele se estabeleceu (Centurion & Demattê, 1992). O uso de tratores e implementos agrícolas proporcionou aumentos da produção, resultado de trabalho operacional e eficiente. No entanto, a mecanização é a responsável pela deterioração mais rápida das condições físicas do solo. O tráfego excessivo, sem o controle das diversas condições do solo, é o principal responsável pela compactação ocasionada por forças mecânicas, tanto pelo exagerado número de operações como pelo simples tráfego do trator sobre o solo (Beltrame & Taylor, 1980a), quando a carga aplicada for superior à capacidade de suporte do solo (Silva et al., 2002a; Lima et al., 2006b; Veiga et al., 2007). O peso das máquinas e equipamentos e a intensidade de uso do solo têm aumentado, não sendo acompanhado por um aumento proporcional do tamanho e largura dos pneus, resultando em significativas alterações nas propriedades físicas do solo. Além disso, com a adoção do plantio direto, o solo não sofre revolvimento e a compactação não é minimizada pelo preparo do solo nos cultivos sucessivos (Streck et al., 2004).

Trabalhos avaliando a ação de semeadoras (Rosa, 2007) são de grande importância, pois essa, junto com o preparo inicial do solo ou dessecação, é uma das fases iniciais para instalação de uma cultura. Na semeadura, o mecanismo de abertura do sulco tipo disco duplo pode compactar a região onde será colocada a semente, associado ao espelhamento lateral causado pelo disco ao ser introduzido no solo, dificultando a passagem de água até à semente e reduzindo o percentual de emergência de plantas, o que não acontece com o facão, que rompe o solo (Reis et al., 2006).

As especificações da máquina como tipo de rodado e pressão de inflação dos pneus, bem como peso da máquina e operações que ela realiza, são de grande importância para evitar ou minimizar a compactação. Máquinas que realizam várias operações de uma só vez evitam o tráfego intenso na área para realização de diferentes operações. Geralmente, o mecanismo de abertura do sulco tipo facão e que atinja maiores profundidades é preferível por colocar as sementes abaixo da camada de compactação, possibilitando o crescimento radicular.

No sistema silvipastoril, os solos podem ser compactados pelo pastejo de animais e pelas raízes das árvores, mas principalmente pelos veículos utilizados pelas várias operações florestais mecanizadas. A compactação de solos agrícolas tem recebido considerável atenção e muitas dessas pesquisas são relevantes para os estudos de compactação em solos florestais. Contudo, várias são as razões pelas quais a compactação em solos florestais merece atenção especial. As raízes das árvores permanecem e aplicam forças mecânicas no solo por longos períodos de tempo comparado às culturas anuais. A derrubada de grandes árvores impõe carga única no solo. As máquinas utilizadas na colheita podem ser muito pesadas e, combinadas com o arraste e levantamento dos troncos, podem exercer grandes pressões no solo. Algumas operações de colheita, como o corte e arraste, podem perturbar o solo. Muito de nosso suprimento de água é das florestas e a compactação pode afetar a qualidade da água (Greacen & Sands, 1980).

A mecanização, seja de áreas agrícolas seja florestais, constitui a principal causa da compactação dos solos, tanto pelo revolvimento do solo como pelo tráfego, determinando as relações entre ar, água e temperatura, que influenciam a germinação, a brotação e a emergência das plantas, o crescimento radicular e praticamente todas as fases de seu crescimento e desenvolvimento vegetal (Letey, 1985; Silva et al., 1994).

## LOCALIZAÇÃO ESPACIAL DA COMPACTAÇÃO

A variabilidade espacial da compactação ocorre em todos os sistemas de manejo agrícola, pecuária ou silvicultura, pois é difícil um controle rigoroso do tráfego de máquinas e animais nas áreas, concentrando a compactação em apenas um local. Em lavouras sob plantio direto em três solos (Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, Latossolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distroférrico típico) do Rio Grande do Sul, o tráfego de máquinas provocou distintos estados de compactação, sendo o maior na

região dita “cabeceira” da lavoura, onde as máquinas realizam as manobras, reduzindo-se para o centro da lavoura (Silva et al., 2004c). Em uma área sob pomar de laranja, a compactação causada na projeção da copa da planta, no rodado e no entre rodado do trator foi semelhante e elevada, e diferiu da linha de plantio (Lima et al., 2004a). Em áreas sob pastagem, os pontos mais compactados (correspondentes às marcas dos cascos dos bovinos) são distribuídos desuniformemente no solo, pelo fato de os animais não permanecerem estáticos na área. Porém, espera-se que, com os sucessivos ciclos de pastejo, os animais pisoteiem toda área pastejada, levando à maior compactação e uniformidade das condições físicas do solo (Lima et al., 2004b).

Em sistema de pastoreio contínuo, os animais permanecem na área durante todo o período, independentemente da ocorrência de chuvas. Além de favorecer a compactação do solo, há constante depreciação da pastagem nesse sistema, pois os animais percorrem maiores distâncias em busca de alimento selecionado, maximizando o pisoteio, além do fato de o animal necessitar ruminar o alimento após determinado tempo, sendo feito geralmente em posição de repouso (Lanzanova, 2005).

As operações de colheita florestal, geralmente, não atingem toda área como nas operações agrícolas, conseqüentemente, o grau de variabilidade e a heterogeneidade da compactação e a perturbação do solo é grande nas florestas (Greacen & Sands, 1980). Analisando a pressão de preconsoidação em função da umidade do solo antes e após o tráfego das máquinas, verificou-se que, em média, as operações de colheita florestal realizadas com o Feller-Bünchere Skidder (Pneu 30.5L.32) e o Feller-Büncher e Skidder (Pneu 66.43.00.26) foram as que menos degradaram a estrutura do solo, enquanto as operações realizadas com o Harvester e Forwarder foram as que mais degradaram a estrutura de um Latossolo Vermelho-Amarelo, em três áreas com teor de areia, silte e argila variando, respectivamente, de 410 a 510 g kg<sup>-1</sup> de areia, 80 a 90 g kg<sup>-1</sup> de silte a 400 a 500 g kg<sup>-1</sup> argila (Dias Junior et al., 2003). Os autores salientam que, apesar de as operações realizadas com o Harvester e Forwarder terem causado maior degradação da estrutura do solo, esses impactos são sistemáticos, abrangendo posições definidas e menor área, enquanto os impactos causados pelas operações com o Feller-Büncher e Skidder não são sistemáticos, têm distribuição aleatória e abrangem maior área.

Conhecendo-se locais críticos de compactação em uma área, manejo específico pode ser realizado, considerando apenas a área afetada, o que poderia diminuir custos de operações e gasto de tempo.



## PROFUNDIDADE DA COMPACTAÇÃO

A mecanização facilitou o trabalho do homem no campo, porém, o tráfego intenso para semeadura, tratamentos culturais e colheita trouxeram aos solos a compactação, principalmente superficial. Contudo, como os solos eram constantemente revolvidos para semeadura das culturas, essa compactação superficial era desfeita; porém, graças ao contato dos implementos de corte com o solo e pressão do rodado no sulco em aração, camadas mais profundas eram compactadas, denominando-se “pé-de-grade” ou “pé-de-arado”, como constatado por Stone & Silveira (1999), Silva et al. (2003), Reichert et al. (2003) e Alves & Suzuki (2004). O “pé-de-grade” ou “pé-de-arado” ocorre, portanto, abaixo da camada arável, que é a aproximadamente 20 cm de profundidade (Silva, 2003). Na superfície do solo, o principal problema era a erosão, pois o solo desprotegido e totalmente desestruturado ficava totalmente susceptível ao impacto das gotas de chuva. No plantio direto, a camada de maior impedimento ao crescimento radicular está localizada entre 8 e 15 cm (Silva, 2003; Genro Junior et al., 2004; Suzuki, 2005), formando o “pé-de-plantio direto”. Atualmente, com o avanço das áreas sob plantio direto, o agricultor e a pesquisa têm um novo desafio, a compactação superficial em solo não revolvido. Silva (2003) salienta que tanto a compactação subsuperficial no preparo convencional como a compactação superficial no plantio direto são prejudiciais, mas no plantio direto as raízes ficam confinadas em um menor volume de solo do que no convencional, tornando-as mais susceptíveis às variações climáticas e dependentes de água e nutrientes nesse menor volume de solo.

Geralmente, a camada superficial de 0-5 cm do solo sob plantio direto apresenta baixa densidade e elevada porosidade total, graças à ação dos discos da semeadora-adubadora, maior concentração de raízes e de matéria orgânica, maior atividade biológica e mais ciclos de umedecimento e secagem (Silva, 2003). A menor densidade observada na camada superficial de solos manejados sob plantio direto está associada, basicamente, às mobilizações que ocorrem nas operações de semeadura das culturas de verão e inverno (Genro Junior, 2002). Segundo o autor, considerando que o espaçamento médio usado nas culturas de inverno é de 17 cm e que os mecanismos sulcadores para colocação de semente e adubo mobilizam uma camada de 5 cm ou mais, observa-se que 30% da área é mobilizada em uma única operação. Incluindo as culturas de verão e com o cultivo sucessivo, em pouco tempo toda a camada superficial dos solos sob plantio

direto é mobilizada e o efeito das cargas se acumula dessa camada para baixo no perfil.

A profundidade de compactação é variável com as especificações da máquina e seu rodado, condições do solo, número de vezes em que o solo é trafegado e com seu histórico de pressões, além do manejo (se pastagem, floresta ou agricultura). Na agricultura, a profundidade de compactação é variável graças, principalmente, ao manejo do solo: se plantio direto ou convencional, se escarificação ou subsolagem. Por exemplo, as maiores pressões de contato do pneu causaram maiores mudanças na densidade de um Latossolo Vermelho-Escuro álico de textura argilosa revolvido; maior umidade causou acréscimo significativo da densidade, e repetição de passagem de carga sobre o solo torna maior o efeito da compactação, podendo chegar a profundidades mais elevadas do que as que normalmente são movimentadas pelos implementos de preparo do solo (Novak et al., 1992). O efeito mais significativo do aumento da densidade em profundidade foi no tratamento com 15 passadas do trator na maior pressão de contato do pneu (91 kPa no pneu dianteiro e 100 kPa no traseiro) e no maior nível de umidade (33 %), que é um valor próximo à umidade na capacidade de campo. Nesse tratamento, o aumento da densidade foi próximo a 60 cm de profundidade.

Um aumento significativo na densidade do solo, a uma profundidade de 11 cm, e no índice de cone, nas camadas de 0-11 e 13-18 cm, foi observado por Radford et al. (2000), quando uma máquina com 10 e 2 t, respectivamente no eixo dianteiro e traseiro, trafegou uma vez em um Vertissolo. A resistência do solo à penetração logo após a aplicação da compactação por uma máquina carregadeira de 10 t apresentou aumento significativo até à profundidade de 12 cm em um Latossolo Vermelho distroférrico típico (Suzuki, 2005), enquanto em um solo franco-arenoso houve aumento da resistência até 28 cm em tratamentos com e sem tráfego (Strecker et al., 2004).

A presença de palha na superfície do solo pode dissipar a energia da compactação pelo tráfego de máquinas (Braidá et al., 2006). A palha atua como agente amortecedor do impacto das máquinas. A resistência à penetração aumentou até à profundidade de 10 cm, quando o solo estava com 12 t ha<sup>-1</sup> de palha de milho na superfície, e até 50 cm, quando o solo estava sem palha, após seis passadas de um trator com 2.080 kg no eixo dianteiro e 2.980 kg no eixo traseiro em um Argissolo Vermelho-Amarelo distroférrico arenoso com aproximadamente 92 g kg<sup>-1</sup> de argila (Brandt, 2005).

Em áreas florestais, é possível que a profundidade de compactação seja maior do que em áreas agrícolas ou de pecuária. Isso ocorre porque o peso de máquinas é maior; o tráfego durante a colheita é mais intenso e há possibilidade de maior umidade do solo graças ao sombreamento causado pela espécie florestal e ao maior acúmulo de resíduos vegetais e de matéria orgânica no solo.

Considerando o grande número de passadas de um trator florestal autocarregável (Forwarder) (peso da máquina de 100.000 N; peso médio da carga de 10.460 N e pressão de contato carregado por rodado de 0,152 MPa) ao longo da trilha para retirar todo volume de madeira preestabelecido, verificou-se na avaliação da densidade do solo que houve compactação na camada de 0-15 cm, enquanto que pela avaliação da resistência à penetração ocorreu compactação nas camadas de 0-15 e 15-30 cm, em um Latossolo Vermelho eutrófico de textura argilosa com reflorestamento de *Eucalyptus grandis* de sete anos (Fernandes & Souza, 2003). Na camada superficial do solo (0-15 cm), uma ou duas passadas de um tracked-skidder (trator arrastador com esteiras metálicas e massa de 21,5 kN) sem carga não produziu efeito significativo em relação à área não trafegada; para a camada de 30-50 cm, duas passadas pelo clambunk (trator arrastador com esteiras metálicas nos rodados do pneu e massa de 20,8 kN) e tracked-skidder carregados aumentaram a densidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura argilosa (Lopes et al., 2006). O guincho arrastador, o Harvester e o Forwarder utilizados na colheita florestal provocaram compactação até à camada de 30-50 cm, tendo o guincho provocado o maior incremento da densidade de um Latossolo Vermelho-Escuro de textura argilosa após seu tráfego (Fernandes & Vitória, 1998). A recuperação da compactação em florestas é mais difícil que na agricultura, pela presença de galhos e grandes raízes e pela ocorrência de camadas compactadas em maior profundidade (Greacen & Sands, 1980).

A compactação em pastagem é menos problemática de ser aliviada do que nos demais sistemas, pois a compactação concentra-se na superfície (Silva et al., 2000a). Em áreas sob pastagem, a compactação causada pelo pisoteio bovino concentra-se até 10 cm. Esse fato foi observado por Collares (2005), com pisoteio por bovinos de leite em solos com teor de areia variando de 68 a 224 g kg<sup>-1</sup> e com teor de argila variando de 411 a 702 g kg<sup>-1</sup>, bem como por Lanza Nova (2005) em um Argissolo Vermelho-Amarelo aluminico típico (248,70 g kg<sup>-1</sup> de areia, 406,76 g kg<sup>-1</sup> de silte e 344,58 g kg<sup>-1</sup> de argila), por pisoteio de bovino de corte no sistema de integração lavoura-pecuária.

## COMPACTAÇÃO E RELAÇÃO COM AS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO SOLO

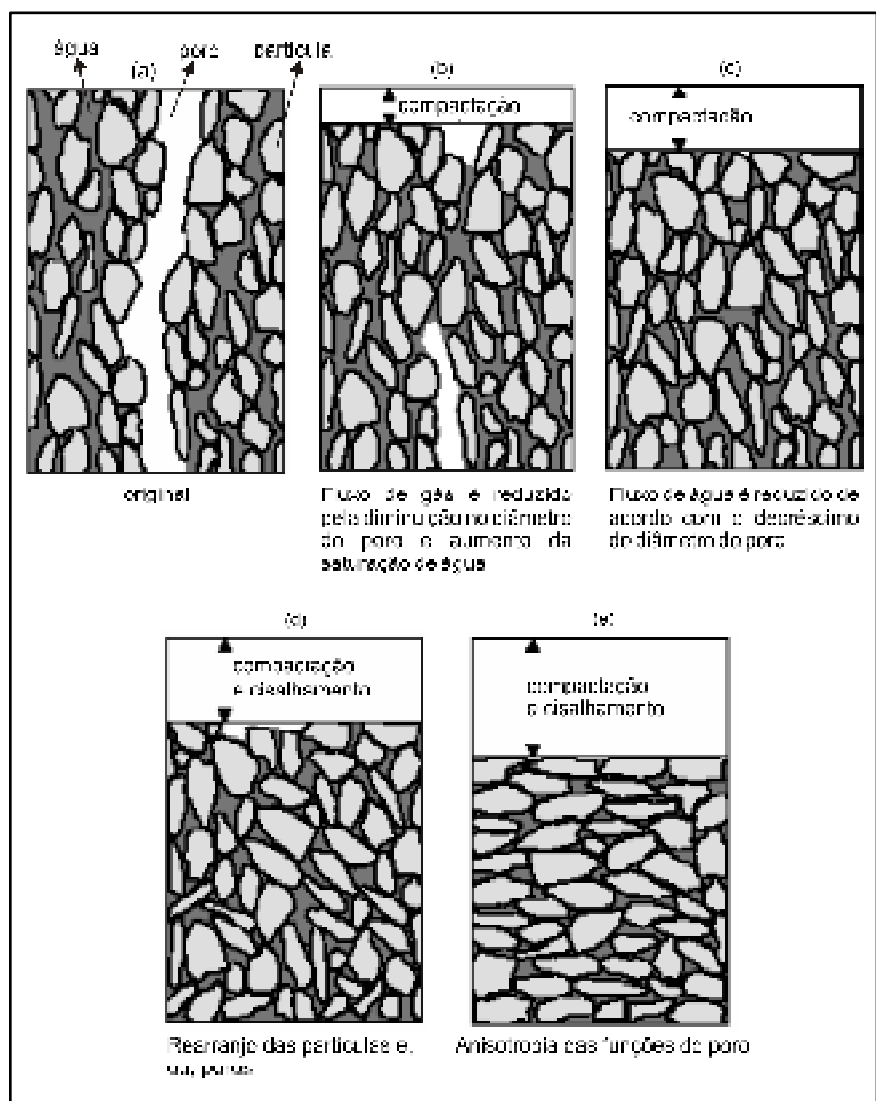
A compactação do solo tem estreita relação com algumas propriedades físicas e mecânicas do solo, principalmente aquelas que apresentam maior relação massa/volume, já que a compactação é um aumento da massa ou redução do espaço poroso do solo, para determinado volume de solo.

### Condutividade hidráulica, infiltração e armazenamento de água no solo

As consequências da deformação do solo nas alterações no volume total de poros e no funcionamento do solo encontram-se na figura 1. Primariamente, os fluxos de água e gás são reduzidos pela compactação do solo. O fluxo de água é reduzido de acordo com o decréscimo do diâmetro do poro, enquanto o fluxo de gás é reduzido pela diminuição no diâmetro do poro e aumento da saturação de água. Com aumento da compactação do solo, as partículas, ou, poros do solo se reorganizam, causando anisotropia das funções do poro (Horn, 2003).

A condutividade hidráulica do solo saturado, de modo geral, apresenta alta variabilidade dos dados, acusando elevado coeficiente de variação (Silva, 2003). Lima et al. (2006a) obtiveram, para condutividade hidráulica do solo saturado em laboratório, um coeficiente de variação entre 111,5 e 247,9%. Genro Junior (2002) e Abreu et al. (2004) obtiveram, respectivamente, um coeficiente de variação de 104% e 52,8% para a condutividade hidráulica do solo saturado obtida no campo. O coeficiente de variação da condutividade pode atingir valores maiores do que 420% (Warich & Nielsen, 1980). Dada a grande variabilidade, Gurovich (1982) afirma ser comum não encontrar diferenças significativas entre os tratamentos, concordando com resultados de Lal (1999) e Lima et al. (2006a). Portanto, sugere-se que essa propriedade seja analisada juntamente com outros indicadores (Lima et al., 2006a).

O aumento da compactação reduziu a condutividade hidráulica do solo saturado, avaliada no campo com o permeâmetro de Guelph, nas profundidades de 8 e 15 cm, e com alto coeficiente de correlação negativo para a densidade do solo e positivo para a porosidade total e macroporosidade em um Latossolo Vermelho distrófico ( $271 \text{ g kg}^{-1}$  argila) (Beutler et al., 2003). A microporosidade apresentou correlação negativa e não-significativa com a condutividade hidráulica, demonstrando ser uma propriedade pouco sensível às variações na compactação do solo.



**Figura 1. Efeitos da pressão e tensão nas funções do poro.**

Fonte: modificado de Horn (2003).

O fluxo de água em solo saturado ocorre preferencialmente nos macroporos (volume de poros de diâmetro maior que 50  $\mu\text{m}$ ); portanto, espera-se correlação entre a condutividade hidráulica do solo saturado e a macroporosidade (Mesquita & Moraes, 2004). Contudo, a presença de um "megaporo" numa amostra de solo afetará pouco a macroporosidade, mas

muito sua condutividade. Adensidade de fluxo que passa por um poro é proporcional à quarta potência de seu diâmetro (lei de Poiseuille) e, por essas razões, é “fácil” obter valores discrepantes (altos) para condutividade (graças a um “megaporo”), enquanto a macroporosidade não apresenta a mesma tendência.

A microporosidade é responsável pela retenção de água no solo, enquanto a macroporosidade é responsável pela aeração e drenagem de água. Foi ajustado um modelo exponencial entre a macroporosidade e a condutividade hidráulica do solo saturado avaliada em laboratório para um Latossolo Vermelho distrófico com  $500 \text{ g kg}^{-1}$  de argila e um Latossolo Vermelho distroférico com  $600 \text{ g kg}^{-1}$  de argila (Silva, 2003). No campo, avaliando a condutividade hidráulica pelo permeâmetro de carga constante de Guelph, o autor verificou que o maior estado de compactação reduziu em cerca de três vezes a condutividade em relação a um baixo estado de compactação. Avaliando a infiltração de água pelo método dos anéis concêntricos, não foi verificada diferença estatística na infiltração de água entre diferentes níveis de compactação, porém houve diferença entre os solos avaliados, fato associado, principalmente, ao teor de argila, manejo, tempo de implantação do plantio direto e rotação de culturas (Silva, 2003). O autor verificou efeito benéfico da rotação de culturas na infiltração de água no solo, mesmo em condições de alta densidade e resistência à penetração.

Efeito negativo da compactação adicional na porosidade, densidade e condutividade de um Argissolo Vermelho distrófico arênico foi constatado por Lima et al. (2006a). Menor condutividade hidráulica do solo saturado, avaliada em laboratório, esteve associada à maior densidade do solo. No processo de compactação, os poros maiores, responsáveis pela aeração do solo, tendem a diminuir, sendo substituídos por poros menores (Boone & Veen, 1994). Aqueles autores também verificaram que, durante o ciclo do feijoeiro cultivado no verão, o plantio direto que recebeu compactação adicional apresentou uma faixa estreita de umidade ótima ao crescimento e desenvolvimento das plantas comparado ao plantio direto sem compactação adicional.

O efeito da compactação subsuperficial na redução da taxa de infiltração de água no solo, avaliada pelo método dos anéis concêntricos, foi demonstrado por Alves et al. (2005). Eles observaram taxa constante de infiltração de água no solo no valor de  $116,50 \text{ cm h}^{-1}$ , em área sob mata, e  $8,48$  e  $9,52 \text{ cm h}^{-1}$ , respectivamente, em área recém-preparada convencionalmente e preparada após nove meses.

A compactação residual causada por quatro passadas de uma máquina de 10 t, após um ano, reduziu a retenção de água no solo até à tensão de 6 kPa, para a camada de 10-15 cm e até 33 kPa, para a camada de 15-20 cm, em relação ao plantio direto há doze anos e escarificação em um Argissolo Vermelho distrófico arênico (Collares, 2005). Para uma compactação adicional imediata, o autor observou que as camadas mais profundas (20-30 cm) apresentaram menor conteúdo de água.

Não foi observada diferença na quantidade total de água armazenada para níveis de compactação e área escarificada para um Latossolo Vermelho distrófico e um Latossolo Vermelho distroférrico (Silva, 2003). Contudo, para três solos distintos, a água disponível, considerada classicamente como o volume de água compreendida entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, diminuiu com o aumento da densidade do solo. O tamanho dos poros determina o potencial de água neles retida e, portanto, a sucção necessária para esvaziá-los. Quanto maior o tamanho do poro, menor a sucção necessária para a retirada de água, e quanto menor o tamanho do poro, maior sucção é necessário para esvaziá-lo (Camargo & Alleoni, 1997).

Embora a compactação causada pelo pisoteio animal seja superficial (0-10 cm), a taxa de infiltração e a lâmina de infiltração de água acumulada também são afetadas (Lanzanova, 2005). Segundo o autor, o manejo do solo, atuando diretamente na sua estrutura, e o sistema radicular das plantas, atingindo diferentes profundidades de exploração e alterações químicas, físicas e biológicas no solo, podem proporcionar diferentes comportamentos na taxa de infiltração de água. A condutividade hidráulica do solo saturado, avaliada em laboratório, foi 38 vezes menor em um sistema integração lavoura-pecuária sob plantio direto do que em uma área de mata, atribuído à diminuição dos macroporos em um Nitossolo ( $550 \text{ g kg}^{-1}$  de argila) (Albuquerque et al., 2001). O aumento da densidade e a redução dos macroporos da condutividade hidráulica deveriam não só à compactação causada pelo trânsito de máquinas e implementos agrícolas utilizados no plantio do milho, mas também ao pisoteio animal no período de inverno, quando a umidade do solo é, geralmente, elevada. A compactação pelo pisoteio bovino (20 e 40 animais  $\text{ha}^{-1}$ ) em um Vertissolo aumentou a densidade e reduziu a porosidade total, refletindo em maiores conteúdos de água nas tensões de 33 e 100 kPa (Pérez Gomar, 2005). Essa situação mostra o efeito benéfico da compactação no aumento do armazenamento de água, contudo, a compactação excessiva pode ser prejudicial tanto para o armazenamento de água quanto para a estrutura do solo e crescimento das plantas.

Em área agrícola, pecuária ou florestal, o processo com que a compactação afeta as propriedades hidráulicas do solo é o mesmo, podendo diferir apenas na intensidade com que essas alterações ocorrem.

## **Estrutura do solo**

### **Estabilidade de agregados**

A avaliação da estrutura do solo pode ser feita indiretamente, por meio da estabilidade de agregados ou pela avaliação da densidade, porosidade e resistência à penetração, por exemplo. Este tópico é dedicado à estabilidade de agregados do solo, sendo as demais avaliações indiretas da estrutura do solo apresentadas nos tópicos seguintes.

É importante que se avalie não apenas uma propriedade física do solo, como a estabilidade de agregados, mas um conjunto delas que possam auxiliar no diagnóstico do solo, evitando, dessa forma, conclusões ou interpretações errôneas. Por exemplo, Carpenedo & Mielniczuk (1990) verificaram que o plantio direto causou aumento do diâmetro médio ponderado dos agregados estáveis em água na camada de 0-10 cm, porém a avaliação da estrutura interna dos agregados mostrou que eles foram formados por forças de compressão e não por ação biológica das raízes e microrganismos. Roth et al. (1991) observaram que a compactação dos agregados na camada de 0-10 cm, no preparo convencional e plantio direto, reduziu principalmente os macroporos, enquanto os meso e microporos dos agregados foram semelhantes ao da mata natural. O diâmetro médio geométrico de agregados estáveis em água não diferiu entre os níveis de compactação na camada de 0-5 cm do plantio direto, variando de 6,42 mm no maior estado de compactação até 4,94 mm no menor estado de compactação (Silva, 2003). Porém, o maior nível de compactação diferiu da área escarificada, fato que o autor associou a não inversão das camadas de solo pela escarificação, degradando menos a estrutura de um Latossolo Vermelho distrófico (500 g kg<sup>-1</sup> de argila) quando comparada com o arado de discos e a grade. Na camada de 8-13 cm, houve maior diâmetro médio geométrico de agregados para o maior estado de compactação no Latossolo Vermelho distrófico (500 g kg<sup>-1</sup> de argila) e no Latossolo Vermelho distroférrico (600 g kg<sup>-1</sup> de argila), o que poderia significar uma condição de solo mais favorável ao crescimento radicular; porém, essa suposta melhoria não foi confirmada pelos resultados de densidade, resistência à penetração e macroporosidade do solo. O autor salienta



que o efeito compressivo do tráfego de máquinas tem relevante importância no diâmetro médio dos agregados nessa camada.

O preparo convencional propiciou menor estabilidade de agregados graças ao revolvimento anual, no qual os agregados vão diminuindo de tamanho em um Podzólico Vermelho-Amarelo distrófico (Albuquerque et al., 1994) e Argissolo Vermelho distrófico típico de textura franco-argilo-arenosa (Marcolan & Anghinoni, 2006). Segundo os autores, além das forças disruptivas da ação mecânica, o solo revolvido fica exposto à desagregação pelo impacto das gotas da chuva que, somado à mineralização da matéria orgânica, diminui a estabilidade dos agregados.

O elevado diâmetro médio ponderado dos agregados, por peneiramento via seco, da camada de 0-15 cm de áreas cultivadas, foi atribuído à formação dos agregados por aproximação de partículas provocada pela ação compressiva de máquinas e implementos agrícolas, sem a ocorrência do processo de estabilização, pois, quando umedecidos, a entrada de água nesses arranjos de partículas associada à ação mecânica do peneiramento foram suficientes para desfazer a ligação entre os agregados (Silva & Mielniczuk, 1997). No método de determinação do diâmetro médio ponderado dos agregados por peneiramento seco, não se distinguem os agregados formados daqueles que já sofreram um processo de estabilização. Esses resultados foram obtidos em solos com variação de textura (Latosolo Roxo distrófico de textura argilosa, 80 g kg<sup>-1</sup> de areia, 240 g kg<sup>-1</sup> de silte e 680 g kg<sup>-1</sup> de argila; Latossolo Vermelho-Escuro distrófico de textura argilosa, 400 g kg<sup>-1</sup> de areia, 150 g kg<sup>-1</sup> de silte e 450 g kg<sup>-1</sup> de argila; Latossolo Vermelho-escuro distrófico de textura média, 700 g kg<sup>-1</sup> de areia, 100 g kg<sup>-1</sup> de silte e 200 g kg<sup>-1</sup> de argila; Podzólico Vermelho-Escuro distrófico de textura argilosa, 540 g kg<sup>-1</sup> de areia, 240 g kg<sup>-1</sup> de silte e 220 g kg<sup>-1</sup> de argila) e diferentes manejos (tais como: mata, pastagem nativa, pastagem plantada, plantio convencional, plantio direto).

O efeito do denso sistema radicular das gramíneas constituintes da vegetação foi mais pronunciado do que do pisoteio bovino contínuo nos valores de diâmetro médio geométrico de agregados em uma área de campo nativo em um Argissolo Vermelho-Amarelo aluminico típico (248,70 g kg<sup>-1</sup> de areia, 406,76 g kg<sup>-1</sup> de silte e 344,58 g kg<sup>-1</sup> de argila) (Lanzanova, 2005).

### **Resistência mecânica do solo à penetração**

A resistência do solo à penetração pode ser avaliada por meio de penetrógrafos ou penetrômetros automáticos (Reinert et al., 2007), de anel dinamométrico ou de impacto (Stolf et al., 1983). Comparando o penetrômetro

de anel dinamométrico (resistência estática) com o de impacto (resistência dinâmica), foi observado para um solo com  $110 \text{ g kg}^{-1}$  de argila, uma resistência de 2,47 e 2,17 MPa; para um solo com  $450 \text{ g kg}^{-1}$  de argila, os valores foram de 2,96 e 4,38 MPa, respectivamente, para o penetrômetro de anel dinamométrico e de impacto (Stolf, 1991). Segundo o autor, em meios incompressíveis de pouca elasticidade (solos arenosos), a força estática e a dinâmica são semelhantes, enquanto, nos meios sujeitos a compressões elásticas (solos argilosos), a resistência dinâmica deve ser maior que a estática e a diferença percentual aumentar com a resistência do meio. Para um solo com  $271 \text{ g kg}^{-1}$  de argila foi obtida diferença de 0,53 MPa com aumento do nível de compactação e menor umidade ( $0,078 \text{ kg kg}^{-1}$ ) comparando o penetrômetro de anel dinamométrico e de impacto, enquanto, para um solo com  $517 \text{ g kg}^{-1}$  de argila, essa diferença foi de 1,29 MPa no maior nível de umidade ( $0,280 \text{ kg kg}^{-1}$ ) (Beutler et al., 2002). Para um solo com aproximadamente  $248 \text{ g kg}^{-1}$  de argila, resultados semelhantes foram observados entre o penetrômetro de anel dinamométrico e de impacto (Roque et al., 2003).

Alguns cuidados devem ser tomados nesse tipo de determinação para que não ocorram erros de interpretação. A resistência à penetração é dependente da umidade e densidade do solo e da distribuição do tamanho de partículas (Busscher, 1990; Canarache, 1990; Pabin et al., 1998). Portanto, um solo seco ou mais denso apresenta maior resistência se comparado a um solo úmido ou menos denso, enquanto, para uma mesma umidade, um solo argiloso apresenta maior resistência que um solo arenoso. Além disso, a resistência à penetração não é capaz de identificar e integrar o efeito de rachaduras e de poros biológicos existentes no solo; todavia, são nessas regiões de menor resistência que as raízes crescem, mesmo em solos com elevada resistência à penetração (Silva, 2003). Recomenda-se a avaliação da resistência à penetração com teor de água próximo à capacidade de campo (Bauder et al., 1981; Lowery & Morrison, 2002). Klein et al. (1998), porém, verificaram que sua determinação apenas quando o solo se encontra próximo à capacidade de campo não é recomendável, visto que grandes variações de densidade poderão não ser detectadas.

Para caracterizar a compactação entre camadas de solo, a resistência à penetração apresentou melhores resultados do que a densidade do solo (De Maria et al., 1999). Avaliando a compactação do solo pela porosidade, densidade e resistência à penetração, esta última melhor evidenciou o efeito do tráfego de máquina sobre o solo (Streck et al., 2004). Os trabalhos de Genro Junior et al. (2004) e Suzuki (2005) expressam a importância da

resistência à penetração em identificar camadas compactadas. Talvez essa determinação seja mais sensível que a densidade e porosidades do solo na detecção dessas diferenças (Abreu et al., 2004). Porém, como a resistência é dependente da umidade e densidade do solo, determinar valores ou faixas de valores críticos ou restritivos torna-se difícil, sendo mais fácil obter esses valores para propriedades como a densidade do solo. Contudo, esses valores ou faixas devem ser buscados dada a importância dessa propriedade.

Embora relatos tenham evidenciado a importância da resistência do solo à penetração, Abreu et al. (2004) dizem que nem sempre o limitante da produtividade das culturas é a resistência mecânica do solo, mas um conjunto de fatores, tais como: a própria resistência do solo à penetração de raízes, o espaço aéreo destinado às trocas gasosas e a quantidade de água disponível para as plantas (Letey, 1985; Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998; Silva, 2003).

A determinação da resistência à penetração é um método fácil e de rápida obtenção dos dados, mas apresenta o inconveniente de ser dependente de alguns fatores já mencionados, causando a opção, muitas vezes, pela avaliação de outras propriedades como a densidade do solo, que revela menor interferência desses fatores, especialmente da umidade. Silva (2003), porém, ressalta a maior sensibilidade da resistência à penetração em detectar diferenças entre manejos do solo em comparação a determinações que consideram a relação massa/volume.

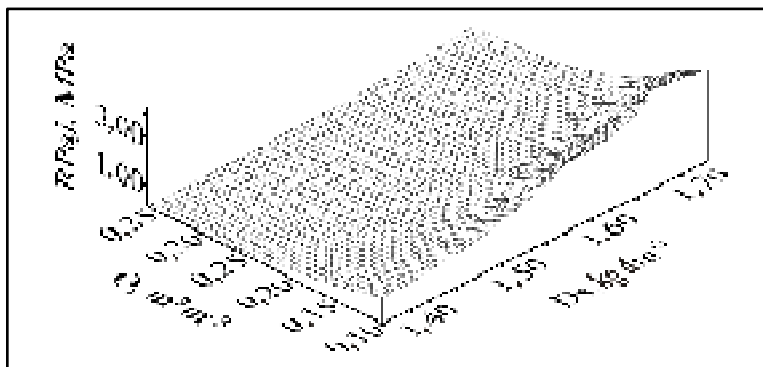
Na literatura, os trabalhos têm apresentado diferentes valores de resistência à penetração considerados críticos ou restritivos ao desenvolvimento e produtividade de plantas. Essa variação pode estar associada ao tipo de solo, espécie ou variedade envolvida e umidade do solo no momento da avaliação. Talvez seja importante padronizar a inclusão da umidade durante a avaliação da resistência à penetração, de modo que os resultados obtidos nas diferentes pesquisas possam ser comparados. Uma possibilidade de padronização seria por meio de equações de ajuste, como as desenvolvidas por Busscher (1990) ou Canarache (1990).

O modelo não-linear desenvolvido por Busscher (1990)  $RP = a\theta^b D_s^c$  considera, no ajuste da resistência à penetração (MPa), a umidade volumétrica ( $\theta$ ,  $m^3 m^{-3}$ ), a densidade do solo ( $D_s$ ,  $kg dm^{-3}$ ) e os parâmetros empíricos ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ). Esse modelo tem sido amplamente utilizado em estudos de compactação e qualidade do solo (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998; Tormena et al., 1999; Silva, 2003; Genro Junior et al., 2004; Barreto Riquelme, 2004; Bervaldo, 2005; Collares et al., 2006).

O modelo desenvolvido por Canarache (1990) considera a resistência à penetração dependente da textura, representada pela argila, e da densidade do solo. A umidade não foi induzida no modelo pelo fato de as amostras terem sido mantidas em igual conteúdo de água. Esse modelo foi desenvolvido em laboratório utilizando amostras de solo com estrutura preservada. Busscher et al. (1997), avaliando algumas equações que relacionaram a resistência à penetração e umidade do solo, verificaram que apenas uma equação simples não se ajustou aos dados para todos os tratamentos, que incluíam diferentes culturas e manejos do solo. Correções individuais para cada tratamento, teriam de ser realizadas. Quando foram utilizadas equações múltiplas, diferenças poderiam não ser reais ou serem atribuídas a manifestações das diferenças nas correções, não sendo a correção, nesse caso, possível.

O modelo desenvolvido por Busscher (1990) relacionou melhor o efeito da densidade e umidade do solo com os valores de resistência à penetração em trabalho realizado por Silva (2003) para um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico ( $120 \text{ g kg}^{-1}$  de argila), Latossolo Vermelho distrófico ( $500 \text{ g kg}^{-1}$  de argila) e Latossolo Vermelho distroférrico ( $600 \text{ g kg}^{-1}$  de argila), comparado aos modelos lineares que relacionam a resistência à penetração com a umidade (Martino & Shaykewich, 1994; Genro Junior et al., 2004).

A relação entre resistência à penetração com a umidade e densidade do solo (Figura 2), como proposto por Busscher (1990), foi estimada por Lima et al. (2007). Com diminuição da umidade e aumento da densidade do solo, ocorre aumento da resistência à penetração, enquanto com aumento da umidade e diminuição da densidade ocorre redução da resistência à penetração.



**Figura 2. Resistência à penetração ajustada ( $R_{Pa}$ ) pelo modelo de Busscher (1990) considerando a umidade volumétrica ( $\theta$ ) e a densidade do solo ( $D_s$ ).**

Fonte: Lima et al. (2007).

Funções lineares entre resistência à penetração e umidade do solo, considerando diferentes profundidades e densidades do solo, foram estimadas por Genro Junior et al. (2004). Diferentemente de Busscher (1990), a densidade do solo não entrou nos modelos, o que dificulta seu uso para diferentes condições de densidade. Houve decréscimo da resistência à penetração com aumento da umidade e, para uma mesma umidade, houve aumento da resistência à penetração com aumento da densidade. Por meio de equações lineares, a umidade explicou apenas 20% da variação da resistência à penetração, e um modelo não-linear, utilizando dados de resistência à penetração, densidade e umidade do solo, indicou que apenas 23% da variação da resistência à penetração foi explicada por essas duas propriedades para um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico (Barreto Riquelme, 2004).

Um modelo de regressão linear múltipla para avaliação da resistência do solo à penetração no campo (RP, kPa) como variável da densidade do solo ( $D_s$ ,  $\text{kg dm}^{-3}$ ) e umidade volumétrica ( $\theta$ ,  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) foi definido por Beltrame et al. (1981) para Planossolo (471  $\text{g kg}^{-1}$  de areia, 410  $\text{g kg}^{-1}$  de silte e 119  $\text{g kg}^{-1}$  de argila) e um Latossolo Vermelho-Escuro álico (330  $\text{g kg}^{-1}$  de areia, 186  $\text{g kg}^{-1}$  de silte e 484  $\text{g kg}^{-1}$  de argila). Para o Planossolo, eles definiram a função  $RP = 9,80665(-421,61 + 358,51 D_s - 109,82 \theta)$  ( $R^2 = 0,90$ ) e, para o Latossolo, definiram a função  $RP = 9,80665(-155,85 + 245,33 D_s - 384,90 \theta)$  ( $R^2 = 0,90$ ).

A umidade varia de modo espacial e temporal no solo (Libardi et al., 1996; Gonçalves et al., 1999). Portanto, as plantas são sujeitas a períodos de maior ou menor resistência à penetração de raízes durante seu ciclo, como demonstrado por Silva (2003), Barreto Riquelme (2004), Collares et al. (2006) e Lima et al. (2006a) para um Argissolo de textura arenosa com a cultura do feijoeiro. É importante que se façam avaliações da resistência à penetração em períodos estratégicos, como nas fases iniciais de crescimento radicular e fase vegetativa, uma vez que as raízes estarão com maior crescimento.

Em médio prazo, a “escarificação biológica”<sup>(3)</sup> (cultivo mínimo de crotalaria) foi mais eficaz na criação de poros condutores de água, avaliada pela condutividade hidráulica do solo saturado no campo pelo permeâmetro de Guelph, do que a escarificação mecânica de um Argissolo Vermelho-

Amarelo distrófico arênico (Abreu et al., 2004). Em contrapartida, se o indicador for a resistência à penetração, o resultado é inverso. Assim, segundo os autores, a propriedade hídrica ou mecânica do solo a ser empregada como indicadora na avaliação da eficácia da ruptura da camada compactada do solo depende do processo físico priorizado: a infiltração e redistribuição de água ou a penetração e o crescimento de raízes. Esses resultados de Abreu et al. (2004) confirmam o que já foi constatado por outros autores (De Maria et al., 1999; Genro Junior et al., 2004; Streck et al., 2004) que a resistência à penetração é uma medida eficiente para caracterizar camadas compactadas, mas não para identificar rachaduras e poros biológicos (Silva, 2003).

Nesse sentido, a avaliação da resistência à penetração aliada a outras avaliações ou observações de campo, é interessante. Sua avaliação, juntamente com a determinação da densidade do solo ou abertura de trincheiras para observação do crescimento radicular, é fundamental para melhor embasamento dos resultados de resistência à penetração.

### **Densidade e porosidade do solo**

A densidade e a porosidade do solo são propriedades relacionadas com alterações no volume de solo; portanto, altamente relacionadas com a compactação do solo. A densidade apresenta relação inversa com a porosidade. Geralmente, a redução da porosidade ocorre com os poros maiores (macroporos), responsáveis pela infiltração de água e aeração do solo. Poros maiores que 50  $\mu\text{m}$  são considerados macroporos e são os primeiros a serem destruídos no processo de compactação.

Poros do solo sob plantio direto geralmente conduzem água mais eficientemente do que poros do solo sob preparo convencional, mesmo com porosidade total inferior à do preparo convencional (Wu et al., 1992), consequência dos poros biológicos ou bioporosidade<sup>(4)</sup> no plantio direto (Costa et al., 2003). A redução de volume do solo ocorre quando sua capacidade de suporte é vencida e acontecem o deslocamento e a ordenação das partículas sólidas nos espaços vazios.

Durante a compactação, os poros maiores responsáveis pela aeração do solo, diminuem e são substituídos por poros menores, principalmente pelos que retêm água. Esse decréscimo da porosidade de aeração pode

ser 1,5 a 2 vezes maior que o decréscimo no espaço poroso total (Boone & Veen, 1994). A diminuição do coeficiente de difusão do  $O_2$  vai depender da geometria e estabilidade dos canais de poros de aeração e do grau de deformação durante a compactação (Boone & Veen, 1994).

Houve relação entre o volume de macroporos e porosidade total com a densidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico franco-argilo-arenoso. Um aumento da densidade do solo causou redução da macroporosidade e porosidade total (Alves et al., 2005). Um decréscimo da macroporosidade com aumento da densidade foi verificado em um Latossolo Vermelho distrófico típico com  $680 \text{ g kg}^{-1}$  de argila (Genro Junior, 2002) e um aumento na densidade do solo acarretou maiores valores de microporosidade e menores de macroporosidade em um Latossolo Vermelho distrófico com  $427 \text{ g kg}^{-1}$  de argila (Secco et al., 2004). Uma pequena variação no volume de microporos em relação à variação ocorrida no volume de macroporos foi observada entre sistemas de manejo do solo e cultivo de culturas em um Cambissolo Húmico aluminóclético ( $443 \text{ g kg}^{-1}$  de argila) (Bertol et al., 2004).

De modo geral, a porosidade e a densidade do solo foram menos influenciadas pelos diferentes sistemas de manejo, predominantemente plantio direto, sendo as maiores alterações verificadas quando se compararam as profundidades, em solos com teor de argila variando de 86 a  $664 \text{ g kg}^{-1}$  (Suzuki, 2005). O efeito do preparo sobre os valores de porosidade do solo pode ser pouco evidente, sendo mais comuns os efeitos na forma e distribuição dos poros ao longo do perfil do solo (Schaefer et al., 2001).

Com  $12 \text{ t ha}^{-1}$  de palha de milho sobre a superfície do solo, não foi observado efeito significativo na redução da densidade e porosidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico com aproximadamente  $92 \text{ g kg}^{-1}$  de argila quando este foi revolvido e traçado por um trator com  $2.080 \text{ kg}$  no eixo dianteiro e  $2.980 \text{ kg}$  no eixo traseiro (Brandt, 2005). O número de passadas (0, 2 e 6) apresentou efeito significativo, sendo duas passadas o efeito mais significativo até à camada de 10-20 cm, com aumento da densidade e redução da macroporosidade e porosidade total, não tendo efeito na microporosidade. Para seis passadas, o aumento da densidade mostrou-se nulo ou pequeno em relação a duas passadas do trator.

Diferente número de passadas de um trator com peso de 11 t aumentou a compactação após a escarificação de um Latossolo Vermelho distrófico típico textura média ( $635 \text{ g kg}^{-1}$  de areia,  $35 \text{ g kg}^{-1}$  de silte e  $330 \text{ g kg}^{-1}$  de argila), verificada pelo aumento da resistência à penetração, da densidade

do solo e da microporosidade, e redução da macroporosidade, sendo mais pronunciada a alteração do diâmetro de porose da densidade após uma passada do trator, com menores efeitos com o aumento do número de passadas (Beutler et al., 2006). Segundo os autores, os poros de maior diâmetro (macroporos) são menos resistentes e se deformam, formando poros de menor diâmetro, que são mais resistentes e suportam maiores pressões.

Houve redução da porosidade total e macroporosidade e um aumento da microporosidade com o aumento do estado de compactação de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico (89 g kg<sup>-1</sup> de argila) (Streck et al., 2004). Nesse mesmo solo, a compactação adicional causada pelo tráfego de uma máquina de 10 t elevou os valores de densidade do solo e reduziu a porosidade total pela diminuição da macroporosidade (Collares, 2005).

O solo sob a projeção da copa, em um pomar de laranja submetido ao tráfego de máquinas agrícolas, foi a área mais afetada pelo uso agrícola, possivelmente em razão da ausência de cobertura vegetal nesse ponto de amostragem e pelo fato de ter servido como linha de passagem de máquinas no início do plantio. Na projeção da copa, os bioporos permaneceram, mas tiveram seu tamanho reduzido pela compactação, e houve redução de 50 % da porosidade total, quando comparado a uma área sob mata, aumentando, dessa forma, a diversidade de poros (cavidades, canais, fissuras, vesículas, câmaras e empacotamento), em um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura franco-argilo-arenosa (Lima et al., 2005).

Enquanto nas áreas agrícolas ou florestais as máquinas podem reduzir a porosidade e aeração do solo, na pecuária, o pisoteio animal também pode afetar essas propriedades. Em um sistema de integração lavoura-pecuária, o pisoteio animal alterou a densidade, macroporosidade e porosidade total, principalmente na camada superficial do solo (0-5 cm), com redução da macroporosidade também na camada de 5-10 cm em um Argissolo Vermelho-Amarelo aluminico típico (248,70 g kg<sup>-1</sup> de areia, 406,76 de silte e 344,58 de argila) (Lanzanova, 2005).

Com exclusão do pastoreio bovino, houve menor densidade e maior porosidade total e macroporosidade na camada de 0-3 cm, em relação às áreas com carga baixa (20 animais ha<sup>-1</sup>) e alta (40 animais ha<sup>-1</sup>) de lotação bovina em um Vertissolo (Pérez Gomar, 2005).



## Intervalo hídrico ótimo

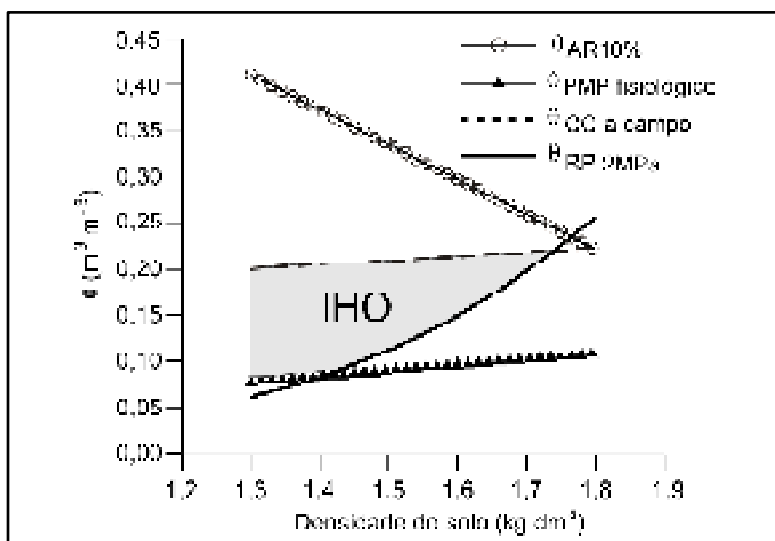
Considerando que a temperatura, aeração, umidade e resistência à penetração influem diretamente no crescimento e desenvolvimento das plantas, a umidade é o fator controlador dominante, sendo os outros três fatores influenciados pelo conteúdo de água. Nesse sentido, Letey (1985) propôs o conceito de faixa de umidade não-limitante (NLWR – “non limiting water range”). É definido como uma faixa de umidade no solo em que não há limitações ao crescimento das plantas relacionado com a aeração, resistência à penetração e água disponível. Seguindo a linha de pensamento de Letey (1985), Silva et al. (1994) propuseram um índice para quantificar essas relações, modificando o conceito de NLWR para faixa de umidade menos limitante (LLWR – “least limiting water range”). No Brasil, Tomena et al. (1998) utilizaram o índice proposto por Silva et al. (1994), denominando-o intervalo hídrico ótimo (IHO).

O conhecimento de qual propriedade do solo está limitando o crescimento das plantas é importante para definir estratégias de manejo do solo com vistas a aumentar o intervalo hídrico ótimo (Silva, 2003). Segundo o autor, quando o limite superior for a porosidade de aeração e o limite inferior for a resistência à penetração, ações relacionadas com o manejo do solo podem aumentar ou diminuir o intervalo hídrico ótimo. Quando o limite superior e o inferior do intervalo hídrico ótimo são a umidade na capacidade de campo e ponto de murcha permanente, o manejo dado ao solo tem menor influência sobre essas propriedades (Figura 3).

O intervalo hídrico ótimo pode ser uma avaliação útil dos efeitos do manejo na produtividade do solo. As práticas de manejo do solo que maximizam o intervalo hídrico ótimo aumentam o potencial produtivo do solo para as plantas. O conhecimento do intervalo hídrico ótimo de um solo pode auxiliar o produtor a otimizar as condições de crescimento e desenvolvimento para as plantas, auxiliando no momento adequado de aplicar irrigação e na tomada de decisões referentes ao manejo (Benjamin et al., 2003).

Avaliando a variação do intervalo hídrico ótimo para três níveis de compactação em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico (120 g kg<sup>-1</sup> de argila), Latossolo Vermelho distrófico (500 g kg<sup>-1</sup> de argila) e Latossolo Vermelho distroférico (600 g kg<sup>-1</sup> de argila) sob plantio direto, Silva (2003) verificou, para os respectivos solos, valores de densidade de 1,80, 1,43 e 1,40 kg dm<sup>-3</sup>, quando o intervalo hídrico ótimo foi igual a zero e considerando uma resistência à penetração de 2 MPa. Quando foi utilizada uma resistência

à penetração de 3 MPa, os valores da densidade do solo no intervalo hídrico ótimo igual a zero foram de 1,88, 1,50 e 1,42  $\text{kg dm}^{-3}$ , para os respectivos solos. Quando se considerou a resistência à penetração de 1 MPa, esses valores foram, respectivamente, de 1,60, 1,30 e 1,28  $\text{kg dm}^{-3}$ . Na condição de plantas mais sensíveis à compactação (resistência à penetração = 1 MPa), os valores de intervalo hídrico ótimo para os solos mostraram-se baixos, aumentando esse intervalo para plantas mais resistentes à compactação (resistência à penetração = 3 MPa). O autor verificou que os níveis de compactação não influenciaram os valores de intervalo hídrico ótimo. Os diferentes valores de resistência à penetração alteraram a amplitude do intervalo hídrico ótimo e a densidade crítica quando o intervalo hídrico ótimo foi igual a zero, corroborando os resultados de Beutler et al. (2004a).

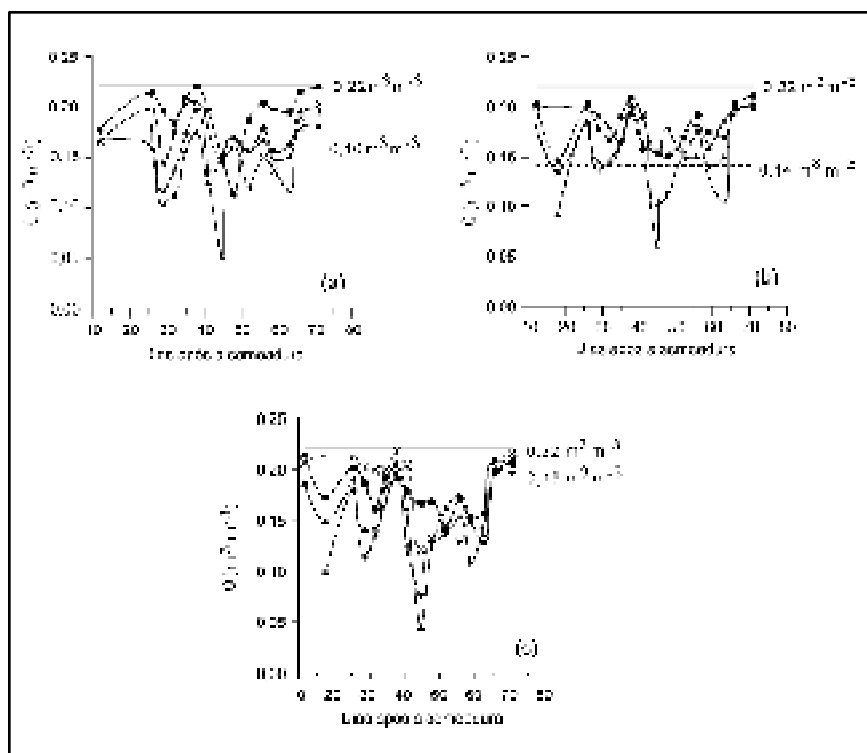


**Figura 3. Variação da umidade ( $\theta$ ) e da densidade do solo, com reflexo nos níveis críticos da porosidade de aeração ( $\theta_{AR 10\%}$ ), capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ), ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) e resistência do solo à penetração ( $\theta_{RP}$ ) para um Argissolo Vermelho distrófico. Área hachurada representa o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO).**

Fonte: Collares et al. (2006).

Utilizando a estratégia do intervalo hídrico ótimo, na qual a umidade na capacidade de campo ou na porosidade de aeração seja o limite superior e a umidade no ponto de murcha permanente ou na resistência à penetração seja o limite inferior, Collares et al. (2006) determinaram a

umidade entre o limite superior e inferior onde a condição física do solo seria ideal para o crescimento e desenvolvimento do feijoeiro, sem ocorrência de restrições severas em um Argissolo Vermelho distrófico arênico (89 g kg<sup>-1</sup> de argila). Em todas as camadas onde foi realizada a compactação, a umidade do solo esteve 22 dias abaixo do limite inferior do intervalo hídrico ótimo, sendo esse período durante fases importantes do ciclo de crescimento e reprodutivo do feijoeiro (Figura 4). A escarificação foi eficiente em aumentar a faixa de umidade ideal para o feijoeiro. Essa estratégia também foi utilizada por Silva (2003) para o mesmo solo e cultura.



**Figura 4.** Umidade volumétrica do solo ( $\theta$ ), limite superior e inferior do intervalo hídrico ótimo para os tratamentos plantio direto há doze anos (PD) (a), escarificado (Esc) (b) e plantio direto que recebeu quatro passadas de uma máquina de 9 t (PDc) (c) com a cultura do feijoeiro. Linha pontilhada representa o limite inferior e a linha cheia representa o limite superior do intervalo hídrico ótimo. +: 0-6 cm; ▲: 6-12 cm; ●: 12-24 cm; x: 24-48 cm de profundidade.

Fonte: Collares et al. (2006).

## Graude compactação

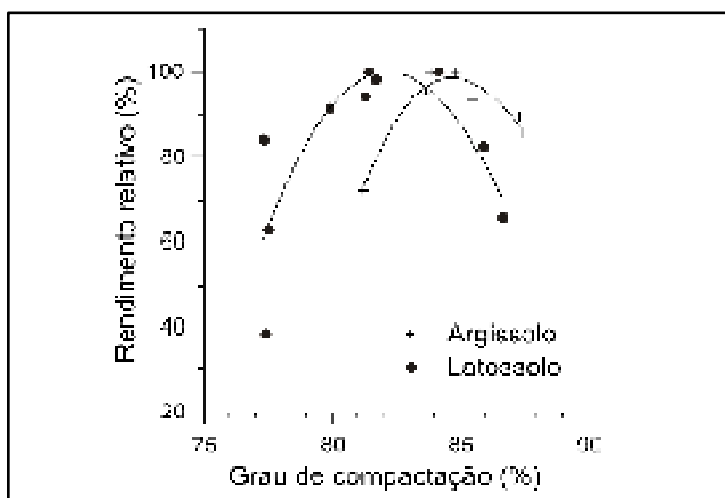
A expressão da relação entre densidade atual do solo e algum estado padrão ou de compactação máxima tem-se mostrado útil na caracterização da compactação do solo e resposta das culturas em diferentes tipos de solo (Carter, 1990; Håkansson, 1990; Lipiec et al., 1991; Silva et al., 1997; Suzuki et al., 2007), especialmente para solos minerais (Håkansson, 1990). Essa relação é denominada grau de compactação ou compactação relativa e é expressa em porcentagem. A vantagem do grau de compactação é que diferentes solos podem ser comparados, visto que o efeito da granulometria do solo é eliminado quando se relaciona a densidade atual do solo com a densidade referência. Além disso, o grau de compactação tem apresentado boa relação com características do solo e da planta.

Três formas de obtenção da densidade-referência têm sido utilizadas na literatura. Uma delas é pelo teste de Proctor (Carter, 1990; Twedoff et al., 1999), utilizando amostras com estrutura de solo não preservada. Nas outras duas, obtém-se a densidade-referência pelo teste de compressão uniaxial; uma delas em amostras com estrutura de solo não preservada e aplicando uma pressão de 200 kPa (Håkansson, 1990), e outra aplicando uma pressão de 1.600 kPa em amostra de solo com estrutura preservada (Suzuki, 2005; Suzuki et al., 2007).

A faixa de tensão de água, na qual a porosidade de aeração e a resistência à penetração não são restritivas ao crescimento das plantas, torna-se mais estreita à medida que o grau de compactação aumenta (Lipiec et al., 1991). Nesse sentido, Suzuki (2005) verificou que o aumento do grau de compactação reduziu linearmente a macroporosidade e o crescimento radicular da soja e aumentou linearmente a resistência do solo à penetração. Uma macroporosidade de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  correspondeu a um grau de compactação de aproximadamente 89 % para solos com  $100 \text{ g kg}^{-1}$  de argila, 80 % para solos com  $200\text{-}300 \text{ g kg}^{-1}$  de argila e 75 % para solos com  $300\text{-}700 \text{ g kg}^{-1}$  de argila. No horizonte Ap de dois solos com  $120$  e  $70 \text{ g kg}^{-1}$  de argila e  $300$  e  $290 \text{ g kg}^{-1}$  de silte (solos franco-arenosos), numa macroporosidade de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , o grau de compactação correspondeu a um valor de 89 % (Carter, 1990).

Uma concentração de raízes na superfície do solo (0-10 cm) e um decréscimo da profundidade radicular com aumento do grau de compactação foram observados por Lipiec et al. (1991). Esses autores verificaram que raízes crescidas em solo altamente compactado caracterizaram-se por maior diâmetro, alto grau de achatamento e superfície irregular com células da epiderme deformadas.

As maiores produtividades de soja foram obtidas no grau de compactação de aproximadamente 85 % para Argissolos (três Argissolos com argila variando de 86 a 449 g kg<sup>-1</sup>) e 82 % para Latossolos (três Latossolos com argila variando de 428 a 664 g kg<sup>-1</sup>) do sul do Brasil (Figura 5) (Suzuki, 2005). Segundo o autor, o alto grau de compactação pode reduzir a porosidade do solo, diminuindo sua aeração e aumentando a densidade e a resistência do solo à penetração, dificultando o crescimento radicular. Por outro lado, um grau de compactação muito baixo pode ser indicativo de um solo sem estrutura, comprometendo a retenção de água e o contato solo-semente na sementeira. De modo geral, o crescimento da cultura é afetado adversamente pela compactação do solo; contudo, a máxima produção não será obtida em um solo após seu revolvimento, pois o solo estará muito solto (Arvidsson & Håkansson, 1991). O grau de compactação ótimo para a soja, medindo a densidade referencial pelo teste de Proctor, foi de 80 % em um Latossolo Vermelho de textura média (Beutler et al., 2005). O índice de área foliar e a produtividade de grãos da cultura da cevada decresceram, quando o grau de compactação foi aproximadamente 88 e 91 %, respectivamente, para dois solos com 60 e 70 g kg<sup>-1</sup> de argila e 680 e 150 g kg<sup>-1</sup> de síte (Lipiec et al., 1991). Uma compactação entre 77,5 e 84 % apresentou uma produtividade relativa superior ou igual a 95 %, para as culturas de trigo e cevada (Carter, 1990). Em mais de 100 experimentos de compactação em vários tipos de solo da Suécia com a cultura da cevada, obteve-se um grau de compactação de 87 % como sendo ótimo para essa cultura (Håkansson, 1990).



**Figura 5. Rendimento relativo da cultura da soja considerando o grau de compactação.**

Fonte: Suzuki (2005).

O estudo do grau de compactação em pastagem e áreas florestais ainda é incipiente, e seu estudo em áreas agrícolas ainda apresenta grandes lacunas. Portanto, dada a potencialidade de compactação nesses solos, devem ser feitas mais pesquisas para essas condições considerando o grau de compactação do solo.

## Pressão de preconsolidação

Por meio da curva de compressão do solo, que considera o índice de vazios ou a densidade do solo com o logaritmo da pressão aplicada, obtém-se a pressão de preconsolidação, que é um indicativo da capacidade de suporte de carga do solo (Holtz & Kovacs, 1981; Dias Junior & Pierce, 1996). A aplicação de pressões menores que a pressão de preconsolidação causa deformações elásticas (recuperáveis) no solo e as propriedades físicas mantêm-se constantes, enquanto a aplicação de pressões mais elevadas causa deformações plásticas (não-recuperáveis) e as propriedades físicas do solo alteram-se consideravelmente (Holtz & Kovacs, 1981; Lebert & Horn, 1991).

A redução do volume do solo, conseqüentemente aumentando sua densidade, pode ou não causar compactação adicional ao solo. A aplicação de pressões menores do que a maior pressão à qual o solo foi submetido no passado pode ter efeitos benéficos, enquanto pressões maiores do que a maior pressão sofrida pelo solo no passado podem ter efeitos prejudiciais. Isso mostra a importância de serem conhecidos os níveis de pressão que o solo sofreu no passado e, ou, a umidade do solo no momento das operações agrícolas, evitando, dessa forma, compactação adicional (Dias Junior & Pierce, 1996).

A deformação do solo tem relação direta com a sua porosidade total, especialmente a macroporosidade, indicando que, quanto maior a deformação do solo, maiores serão as reduções de macroporosidade e de porosidade total do solo (Silva et al., 2000b). Como conseqüência, alguns prejuízos para as plantas e meio ambiente, tal como a redução da aeração e da infiltração de água no solo, podem ocorrer.

Por exemplo, segundo Horn & Lebert (1994), a compressibilidade do solo, definida como sendo a resistência do solo em diminuir seu volume quando submetido à pressão, é menos pronunciada em solos arenosos e menos agregados. Os autores afirmam que, dentre os fatores de que depende a resistência do solo, encontram-se a distribuição do tamanho de partículas, o tipo de argilomineral, o conteúdo e tipo de substâncias

orgânicas, a distribuição de raízes, a densidade do solo, a distribuição do tamanho de poros, a continuidade dos poros no solo e nos agregados simples e o conteúdo de, ou, potencial de água no solo. A uma mesma densidade do solo e a um mesmo potencial de água, o solo é mais compressivo quanto maior o conteúdo de argila e menor o conteúdo de substâncias orgânicas. A um mesmo conteúdo de argila, o solo é mais compressivo quanto menor a densidade e menor o potencial de água. Solos arenosos apresentam maior atrito entre as partículas, o que dificulta a movimentação das partículas sólidas para posições de maior proximidade (deformação) (Lima et al., 2004a). Solos formados por partículas de diferentes tamanhos normalmente são mais facilmente compactados, pois as partículas menores podem ser encaixadas nos espaços formados entre as partículas maiores (Torres et al., 1993).

A redução linear da pressão de preconsolidação com aumento da umidade foi observado por Reinert (1990), Imhoff et al. (2001) e Dias Junior et al. (2002), enquanto Dias Junior et al. (2002, 2004), Lima et al. (2006c) e Mosaddeghi et al. (2006) verificaram relação exponencial ou logarítmica. Silva et al. (2002b) também observaram relação entre umidade do solo e pressão de preconsolidação. Além da umidade, que apresentou relação negativa com a pressão de preconsolidação, Imhoff et al. (2001) verificaram que a pressão de preconsolidação é relacionada positivamente com a densidade do solo. Reinert (1990), Alexandrou & Earl (1998) e Silva et al. (2002a) também verificaram dependência da pressão de preconsolidação pela densidade do solo.

Vários trabalhos têm apresentado relação significativa entre pressão de preconsolidação e resistência à penetração (Canarache et al., 2000; Mosaddeghi et al., 2003; Dias Junior et al., 2004; Lima et al., 2006c). Aumento da compactação do solo, representado pela sua resistência à penetração, aumenta a pressão de preconsolidação. A relação significativa da pressão de preconsolidação e umidade, densidade e resistência do solo à penetração são importantes, pois, a partir dessas propriedades de maior simplicidade de determinação pode-se estimar a pressão de preconsolidação que é uma propriedade de difícil obtenção, exige equipamento específico e demanda longo tempo.

Houve incremento médio da pressão de preconsolidação à medida que ocorreu aumento da densidade e o solo sofreu redução no grau de saturação de água de 91 para 58 % para um Latossolo Vermelho distrófico típico (550 g kg<sup>-1</sup> argila), e de 93 para 68 % para um Latossolo Vermelho distroférrico típico (610 g kg<sup>-1</sup> argila), sugerindo que, quanto mais seco e compactado estiver o solo, maior será a capacidade de suporte do mesmo

estando as partículas, ou, agregados mais coesos (Secco, 2003). Para um grau de saturação inferior a 45 e 60 %, respectivamente, para o primeiro e segundo solo, a pressão de preconsolidação foi pouco influenciada pela umidade e densidade do solo. Em solo úmido, segundo o autor, a água atua como lubrificante entre as partículas, deixando o solo mais macio, alterando o estado de consistência do mesmo e, conseqüentemente, reduzindo a capacidade de suporte de carga do solo.

A pressão de preconsolidação foi sensível na avaliação da heterogeneidade da compactação em um pomar de laranja (Lima et al., 2004a). Os autores observaram que a pressão de preconsolidação não diferiu estatisticamente quando avaliada na projeção da copa da planta (316 kPa), no rodado do trator (309 kPa) e no entre rodado (298 kPa), mas diferiu do valor obtido na linha de plantio (174 kPa). Houve aumento significativo da pressão de preconsolidação na camada de 0-5 cm em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico com aproximadamente 92 g kg<sup>-1</sup> de argila, trafegado duas vezes com um trator com 2.080 kg no eixo dianteiro e 2.980 kg no eixo traseiro; na camada de 5-10 cm, houve diferença significativa em relação à área sem tráfego apenas quando submetida a seis passadas. Nas camadas de 10-20 e 20-30 cm, o número de passadas não afetou a pressão de preconsolidação (Brandt, 2005).

Embora a densidade do solo tenha sido influenciada pelos níveis de compactação, os valores de pressão de preconsolidação de um Argissolo Vermelho distrófico arênico (81 g kg<sup>-1</sup> de argila) não o foram (Lima et al., 2006b). Talvez a alta variabilidade dos dados (representada pelo coeficiente de variação de 19,4 a 34,7 %) tenha contribuído para a não-significância da pressão de preconsolidação. Lima et al. (2004b) também não observaram diferença significativa da pressão de preconsolidação entre sistemas de pastejo e atribuíram tal fato à variabilidade dos dados (coeficiente de variação de 32,25 e 33,44 %).

A passada do rodado traseiro (pressão de inflação de 137,90 kPa) de um trator com massa total com lastro de 7.324 kg aumentou os valores de pressão de preconsolidação na superfície (0-5 cm) de um Latossolo Vermelho distrófico (Silva et al., 2003). O tráfego subsequente, necessário ao cultivo, elevou esses valores em subsuperfície, tanto na profundidade média de trabalho (24 a 27 cm) como na profundidade de corte dos implementos (arado de aivecas, arado de disco e grade aradora). As soleiras dos órgãos ativos do arado de discos e da grade aradora foram as que mais elevaram a pressão de preconsolidação, consolidando a estrutura do solo na profundidade de corte dos implementos.



Em áreas sob pecuária, a pressão de preconsolidação causada pelos animais parece inferior à das máquinas. Contudo, também é importante haver monitoramento da pressão de preconsolidação nessas áreas sob pastejo para que a estrutura do solo seja mantida. Em áreas sem pastejo bovino e com 20 e 40 animais  $ha^{-1}$ , a área sem pastejo apresentou menor pressão de preconsolidação (38,96 e 32,48 kPa, respectivamente para as tensões de 33 e 10 kPa) para amostras da camada de 0-3 cm em relação às áreas pastejadas (45,53 e 43,00 kPa para a área com 20 animais  $ha^{-1}$  e 47,53 e 40,05 kPa para a área com 40 animais  $ha^{-1}$ , respectivamente, para as tensões de 33 e 10 kPa) em um Vertissolo (Pérez Gomar, 2005). A área submetida ao pisoteio animal estava mais compactada, representada pela elevada densidade e baixa porosidade, apresentando maiores valores de pressão de preconsolidação.

Em áreas sob pastagem, foram observados valores médios de 268 e 246 kPa, respectivamente, para pastejo intensivo rotacionado irrigado e não irrigado (Lima et al., 2004b). Segundo os autores, esses valores em áreas sob pastagem são elevados, porém justificados pelo fato de o peso dos animais ser distribuído em uma área muito pequena, além da energia cinética transmitida ao solo quando os animais estão em movimento.

## COMPACTAÇÃO E RELAÇÃO COM O CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DE PLANTAS

A compactação do solo em níveis intermediários é benéfica às plantas em relação a um solo solto e desagregado. Em níveis elevados, porém, a compactação é extremamente prejudicial às plantas.

### Crescimento radicular

O efeito da compactação na planta inicia-se na restrição ao crescimento radicular, com consequências para o crescimento da parte aérea e produtividade. O sistema radicular talvez seja o primeiro componente da planta a sentir os efeitos da compactação. Um solo pode ser quimicamente bom, mas, ocorrendo a compactação, as plantas não se beneficiam adequadamente dos nutrientes disponíveis, uma vez que o desenvolvimento de novas raízes fica prejudicado e é nelas que ocorre a maior taxa de absorção. Além disso, com a compactação, diminuem os espaços livres do solo e, conseqüentemente, a quantidade de  $O_2$  disponível na rizosfera,

podendo ser limitante para o desempenho dos processos metabólicos das plantas (Queiroz-Voltan et al., 2000).

O sistema radicular percebe e integra todas as condições, no espaço e tempo, de modo semelhante à parte aérea das plantas, que está exposta a trocas constantes de ambiente, indicando claramente que estresse na parte aérea e sistema radicular são igualmente importantes (Reichert et al., 2003). Nesse sentido, Suzuki (2005) afirma que a avaliação do sistema radicular, mesmo que apenas visual, é um bom indicativo da condição física do solo. Diversos são os fatores que causam crescimento deficiente do sistema radicular das plantas (Camargo & Alleoni, 1997), incluindo danos causados por insetos e doenças, deficiência nutricional, acidez do solo, drenagem deficiente, temperatura e compactação do solo, acarretando esta última, ao causar restrições ao crescimento e desenvolvimento radicular, problemas que afetam, direta e indiretamente, a produção das plantas.

A avaliação da compactação do solo, seja pela densidade, seja pela resistência à penetração, apresenta boa relação com crescimento radicular. Geralmente, com aumento da densidade ou resistência à penetração, há redução do crescimento radicular. Sendo assim, o potencial de crescimento da cultura e as condições físicas do solo determinam o tamanho da raiz e a taxa de crescimento radicular (Boone & Veen, 1994). Gerard et al. (1982) e Veen & Boone (1990) apontam uma relação inversa entre a resistência mecânica à penetração e o crescimento de raízes.

A densidade de raízes de milho correlacionou-se inversamente com a densidade do solo na camada de 10-25 cm em um Podzólico Vermelho-Amarelo (Silva et al., 2000a). A densidade de comprimento radicular da soja não diferiu entre o maior e menor estado de compactação, tendo metade da densidade de comprimento radicular confinada na camada de 0-7,5 cm em um Latossolo Vermelho distrófico (500 g kg<sup>-1</sup> de argila) (Silva, 2003). Num Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico (120 g kg<sup>-1</sup> de argila no horizonte A), as raízes do feijão preto apresentaram maior quantidade e melhor distribuição lateral e em profundidade no preparo convencional do que no plantio direto e preparo reduzido. No plantio direto, as raízes concentraram-se na camada de 5-15 cm, porém algumas ultrapassaram a camada compactada e cresceram em profundidades maiores que 30 cm. No preparo reduzido, as raízes concentraram-se até à profundidade de 25 cm.

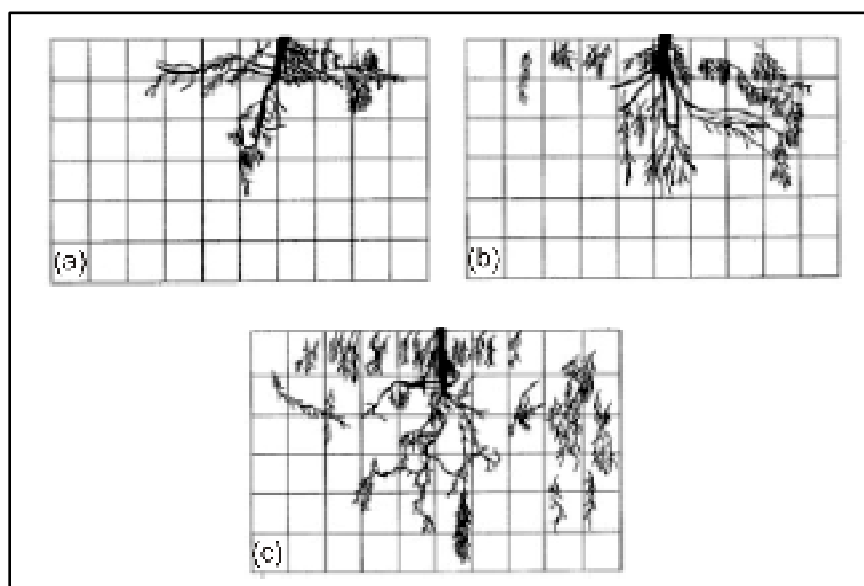
O crescimento radicular de feijão foi menos vigoroso e as raízes concentraram-se nas camadas superficiais (até 10 cm), apresentando deformações, com a compactação adicional causada por quatro passadas

de uma pá carregadeira de peso total de 16,6 t, e a raiz principal produziu várias ramificações nas primeiras camadas de um Latossolo Vermelho com 607 g kg<sup>-1</sup> de argila (Collares, 2005). Nos tratamentos que não receberam compactação adicional, as raízes atingiram maiores profundidades e tiveram melhor crescimento e distribuição mais uniforme no solo. O crescimento radicular do feijoeiro restringiu-se às camadas superficiais de um Argissolo Vermelho distrófico arênico (89 g kg<sup>-1</sup> de argila) em decorrência da compactação adicional causada por quatro passadas de uma máquina de 9 t (Figura 6a), assim como no plantio direto há 12 anos (Figura 6b), enquanto no escarificado as raízes se distribuíram mais uniformemente no perfil (Figura 6c) (Collares et al., 2006). No campo, os autores observaram que no plantio direto há 12 anos, as raízes conseguiram penetrar nos poros do solo, por eles serem maiores e contínuos; no plantio direto com compactação adicional, as raízes cresceram entre as fissuras dos pontos de fratura dos agregados e se concentraram na linha de semeadura, na qual o mecanismo sulcador da semeadora rompeu a camada superficial compactada.

Em uma área cultivada há três anos sob plantio direto houve restrição ao crescimento de raízes de milho em profundidade, abaixo de 30-40 cm, em razão do tráfego intensivo de uma colheitadeira carregada com peso de 117.680 N e em outra área em razão do tráfego intenso de um trator agrícola com peso de 39.227 N, enquanto, na área que recebeu subsolagem e na área sob plantio direto as raízes foram até 50 e 80 cm, respectivamente (Seixas et al., 2005).

A sucessão de culturas utilizada (soja ou milho no verão) não influenciou o crescimento radicular do trigo em um Latossolo argiloso (Suzuki, 2005). Contudo, em relação aos três níveis de compactação avaliados (plantio direto com compactação adicional, plantio direto e escarificação), notou-se no plantio direto com compactação adicional um sistema radicular mais superficial, com maior concentração até os 10 cm de profundidade. Cada cultura apresenta um potencial de resistir aos efeitos da compactação. Há culturas ou até mesmo cultivares que apresentam sistema radicular mais agressivo, enquanto outras podem resistir a maior período ao déficit hídrico.

Os solos não são uniformemente compactados pelo tráfego de máquinas (Unger & Kaspar, 1994). Segundo esses autores, pelo fato de a direção do tráfego para muitas operações no campo ser paralela à linha de plantio, o tráfego tende a concentrar-se nas entrelinhas, e algumas entrelinhas são compactadas enquanto outras não. Como resultado, o tráfego pode causar grandes diferenças nas condições físicas do solo nas entrelinhas trafegadas e não trafegadas.



**Figura 6. Distribuição radicular da cultura do feijoeiro em um Argissolo Vermelho distrófico arênico ( $89 \text{ g kg}^{-1}$  de argila) com diferentes níveis de compactação (a - plantio direto com compactação adicional; b – plantio direto há 12 anos; c – escarificado). Perfil cultural de  $50 \times 30 \text{ cm}$ , com malha de  $5 \times 5 \text{ cm}$ .**

Fonte: Collares et al. (2006).

Na entrelinha da cultura, geralmente, encontra-se a maior resistência à penetração, pois na linha o disco de corte ou a haste tipo sulcador ou facão da semeadora rompe a camada de maior resistência, permitindo o crescimento do sistema radicular até os primeiros centímetros do solo. Além disso, os diferentes níveis de resistência à penetração não formam uma camada uniforme, ocorrendo espaços de maior e menor resistência, permitindo que as raízes cresçam entre esses espaços (Suzuki, 2005).

Portanto, como no campo a compactação não se apresenta como uma massa contínua, as raízes procuram os espaços livres no solo para crescer (Queiroz-Voltan et al., 2000). Assim, quando uma raiz encontra no solo um poro de diâmetro menor que o seu, ela se expandirá somente se for capaz de exercer pressão suficiente para dilatar o poro (Camargo & Alleoni, 1997).

O impedimento no crescimento da raiz principal em solo compactado faz com que as plantas criem mecanismos de defesa, expandindo as raízes laterais de diâmetro suficiente para penetrar nos poros. Porém, como as raízes

laterais respondem à compactação de forma semelhante à de raízes principais quando há obstáculo ao crescimento, todo o sistema radicular ficará definido e inteiramente coberto por pêlos radiculares (Camargo & Alleoni, 1997).

Embora, em algumas situações, possa ocorrer crescimento radicular em camadas abaixo da compactada, isso é associado à heterogeneidade do solo, com regiões de maior e menor resistência ao crescimento das raízes, e aos mecanismos que a planta apresenta para penetrar nessas camadas compactadas. Contudo, a energia gasta pelas plantas, na procura dessas camadas de menor resistência e para criar esses mecanismos de defesa, deve refletir negativamente na planta, dificultando a expressão de seu potencial produtivo.

Alteração da morfologia da raiz de *Araucária angustifolia*, com raízes superficiais, raízes laterais finas e comprimento da raiz principal reduzido, que foi compensado por aumento em diâmetro da raiz principal, resultando em similar acúmulo de biomassa, foi verificada em diferentes níveis de compactação (Mósen & Dillenburg, 2004). O estresse hídrico reduziu o crescimento das plantas e os autores observaram que, no menor nível de compactação, não houve um adequado contato entre as raízes da planta e as partículas do solo, o que pode ter reduzido a disponibilidade de nutrientes para as plantas e o movimento de água e nutrientes na zona radicular, apresentando, nesse caso, efeito favorável da compactação para o crescimento das plantas.

Houve redução da produção de matéria seca de raízes e densidade radicular de *Eucalyptus urophylla* pela compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo oxidico-gibítico (440 g kg<sup>-1</sup> de areia, 90 g kg<sup>-1</sup> de silte e 470 g kg<sup>-1</sup> de argila) em vaso, na umidade de 0,20 kg kg<sup>-1</sup>, em relação às demais umidades (0,05 e 0,10 kg kg<sup>-1</sup>). Em um Latossolo Amarelo caulínico (450 g kg<sup>-1</sup> de areia, 40 g kg<sup>-1</sup> de silte e 510 g kg<sup>-1</sup> de argila), houve redução apenas da densidade radicular com a compactação nas umidades de 0,10 e 0,20 kg kg<sup>-1</sup> (Silva et al., 2006c).

A compactação é um problema, seja em áreas agrícolas, seja em áreas sob pastagem e floresta; portanto, todas as culturas, anuais ou perenes, estão sujeitas a sofrer os impactos da compactação.

## **Crescimento aéreo e produtividade**

É indesejável que a planta apresente menor crescimento da parte aérea, pois é por meio dela que a planta realiza fotossíntese. O menor crescimento

da parte aérea do feijoeiro, avaliada pela área foliar, foi associado a restrições ao acesso à água e a nutrientes pela redução do crescimento radicular causado pela compactação (Collares, 2005). O autor observou que a compactação adicional, causada por quatro passadas de uma máquina de 10 t, reduziu a altura do feijoeiro em 19,6 e 19,1 %, respectivamente em relação ao plantio direto de 12 anos e escarificação, em um Argissolo Vermelho distrófico arênico com 81 g kg<sup>-1</sup> de argila. O crescimento da área foliar foi mais lento até os 23 dias após a emergência nas parcelas com compactação adicional.

A compactação, principalmente superficial, causada por quatro passadas de uma carregadeira pesando 10 t reduziu a altura das plantas de soja e milho em um Latossolo Vermelho distroférrico típico (Suzuki, 2005). Contudo, o alívio da compactação pela escarificação também não favoreceu a altura dessas culturas, sendo as plantas mais altas verificadas no plantio direto a seis anos. A altura do milho aumentou com o acréscimo da porosidade de aeração em anos úmidos e decresceu com o aumento da resistência à penetração em anos secos, em estudo realizado em uma propriedade agrícola com solos variando de 58 a 374 g kg<sup>-1</sup> de argila, durante três anos, sob os sistemas plantio direto e convencional (Silva et al., 2004a). A altura do milho foi relacionada, positiva e exponencialmente, com a porosidade de aeração e, negativa e exponencialmente, com a resistência do solo à penetração, considerando coleta de dados na camada superficial do solo (0-20 cm).

A produtividade das culturas é dependente de vários fatores, como propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, manejo dado à cultura, espécie de planta e fator climático. Alguns solos podem apresentar condições inadequadas, mas uma condição climática e de precipitação adequada para as culturas pode minimizar esses efeitos. Numa adversidade climática, um solo em boas condições facilita o manejo e planejamento agrícola, pois as variações na produtividade são menores devido à redução dos riscos de queda de produção (Lipiec & Simota, 1994; Suzuki, 2005). De modo geral o produtor só percebe o efeito da compactação quando contabiliza a produtividade e esquece que o crescimento radicular é o melhor indicador da qualidade do solo e o primeiro a sofrer os efeitos da compactação.

A compactação do solo e seus efeitos negativos na produtividade das culturas têm aumentado, resultado do revolvimento reduzido do solo, uso de equipamentos pesados, aumento da carga por eixo e operações de campo quando o solo está úmido. Uma limitada compactação na superfície do solo, entretanto, é considerada benéfica para a semeadura porque não

só promove melhor contato semente-solo e rápida emergência, mas também reduz a taxa de secamento do solo. Compactação excessiva, por outro lado, pode impedir o crescimento radicular, limitar a absorção de nutrientes e causar estresse por falta de umidade, resultando em redução na produtividade das culturas (Bicki & Siemens, 1991).

As gramíneas (trigo cultivado no inverno e milho no verão) foram mais susceptíveis à compactação que a leguminosa (soja cultivada no verão) num Latossolo Vermelho distrófico típico (550 g kg<sup>-1</sup> argila), há quatorze anos sob plantio direto, e num Latossolo Vermelho distroférrico típico (610 g kg<sup>-1</sup> argila), há sete anos sob plantio direto, ambos com três níveis de compactação avaliados previamente pela resistência à penetração e densidade do solo (Secco, 2003).

Níveis de compactação não acarretaram efeito significativo na produtividade de cultivares de soja em um Latossolo Vermelho distroférrico com 427 g kg<sup>-1</sup> de argila (Secco et al., 2004). Esses autores atribuíram esse resultado ao fato de a compactação do solo propiciada pelo rolo compactador ter ocorrido na superfície do solo (0-10 cm) e ter sido de baixa intensidade, em virtude do pouco peso (2 t) e, ou, que o nível de compactação estabelecido tenha sido eliminado pelo efeito do mecanismo sulcador para deposição de sementes da semeadora-adubadora.

A produtividade do feijoeiro, cultivado no verão, foi reduzida em 17 % e a do trigo em 14 %, comparada à do plantio direto há seis anos, considerando a compactação causada por quatro passadas de uma pá carregadeira de peso total de 16,6 t em um Latossolo Vermelho (607 g kg<sup>-1</sup>) (Collares, 2005). A compactação adicional reduziu em 29,4 % a produtividade do feijoeiro em relação ao plantio direto há doze anos em um Argissolo Vermelho distrófico arênico (89 g kg<sup>-1</sup> de argila) (Collares et al., 2006). Em outros dois experimentos, essa redução foi de 61,8 e 54,4 %.

A escarificação, com o objetivo de aliviar a compactação do solo, e a compactação adicional, principalmente superficial, reduziram a produtividade das culturas da soja e milho em relação ao plantio direto há seis anos em um Latossolo Vermelho distroférrico típico (Suzuki, 2005), indicando a necessidade de um valor intermediário de compactação para favorecimento das culturas. Para a cultura do trigo no inverno, além de a sucessão leguminosa (soja)/gramínea (trigo) ter sido favorável à produtividade, a compactação adicional e a escarificação não afetaram a produtividade nessa sucessão. O déficit hídrico durante o período de desenvolvimento das culturas fez com que as produtividades fossem baixas, porém essa condição

foi ideal para que o plantio direto mostrasse sua capacidade em favorecer o crescimento e desenvolvimento das culturas sob condições críticas, em relação aos demais tratamentos.

## COMPACTAÇÃO E RELAÇÃO COM O MEIO AMBIENTE

Os efeitos negativos nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo não influenciam apenas o crescimento e o desenvolvimento das plantas, mas seu efeito é mais extenso, abrangendo o meio ambiente, seja pontualmente, seja numa macroescala. A planta é apenas um sensível indicador da qualidade do solo; contudo, o monitoramento de todo o ambiente, podendo incluir avaliação da qualidade da água e ar, coleta de sedimentos e avaliação de perdas de solo e nutrientes também são fundamentais para subsídio à avaliação da qualidade do solo.

Um breve relato sobre as conclusões obtidas em um Workshop da ISTRO intitulado “Os efeitos da compactação do solo sobre os fatores físicos, químicos e biológicos no ambiente”, foi feito por Håkansson et al. (1995). Dentre as conclusões, eles apontaram a prioridade no estudo dos efeitos do manejo do solo e compactação induzida pelo tráfego de máquinas sobre os seguintes itens: a) eficiência do uso de nutrientes pelas plantas e transporte de agroquímicos para os sedimentos e sistemas aquáticos; b) processos biológicos no solo como decomposição da matéria orgânica e desnitrificação; c) conteúdo e distribuição da matéria orgânica nos solos; d) erosão e assoreamento de rios e lagos; e) capacidade de os solos atuarem como fonte ou dreno de gases do efeito estufa ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CH}_4$ ) e gases acidificantes ( $\text{NO}_x$ ); f) consumo de energia na agricultura pelo uso de combustíveis, fertilizantes e agroquímicos e emissões para a atmosfera e g) viabilidade dos métodos conservacionistas de manejo.

Em uma revisão sobre as consequências ambientais da compactação, particularmente na absorção e perdas de nutrientes, Lipiec & Stepniewski (1995) consideraram que alterações nas propriedades hidráulicas e difusivas do solo, aeração e crescimento e configuração do sistema radicular, causadas pela compactação, afetam a absorção de nutrientes. À semelhança do verificado por Suzuki (2005), em que as maiores produtividades da soja são obtidas em um grau de compactação intermediário, Lipiec & Stepniewski (1995) constataram, em sua revisão, que uma compactação moderada aumenta o fluxo de nutrientes por unidade



de comprimento ou superfície radicular, aumentando a absorção de nutrientes, enquanto em solos mais compactados as perdas de N para a água subsuperficial e para a atmosfera são maiores. O tráfego destrói os poros dos inter e intra-agregados do solo, resultando em um sistema poroso denso e massivo e, ou, em perda da resistência do solo, podendo acarretar um fluxo horizontal de água mais pronunciado e, conseqüentemente, erosão do solo. Os fluxos verticais são menores e podem aumentar a formação de  $N_2O$  no solo e impedir a troca de gases com a atmosfera (Horn et al., 1995). Em outra revisão sobre compactação do solo, Hamza & Anderson (2005) afirmaram que a compactação prejudica as propriedades físicas e a fertilidade do solo, particularmente o armazenamento e fornecimento de água e nutrientes, pelo aumento da densidade do solo e resistência à penetração e decréscimo da porosidade, infiltração e capacidade de armazenamento de água. Esses efeitos adversos reduzem a eficiência da fertilização e produtividade das culturas e aumentam o escoamento superficial e a erosão do solo, com problemas de poluição ambiental indesejáveis.

O escoamento superficial, sedimentos, pesticidas, erosão, destruição da paisagem e degradação física, química e biológica são os principais meios pelos quais a compactação do solo pode afetar os quatro componentes ambientais (atmosfera, água superficial, água subsuperficial e recursos do solo) (Soane & van Ouwerkerk, 1995). Esses autores também indicam as possíveis contribuições adicionais exigidas para a produção de culturas em solos compactados, como a energia adicional exigida para o cultivo e adubação extra para manter a produtividade das culturas. Em relação à atmosfera, a compactação, influenciando a aeração e a permeabilidade do solo e o desenvolvimento das culturas, pode alterar o fluxo de gases do solo para a atmosfera e vice-versa. A compactação pode resultar em redução da taxa de infiltração e aumento do escoamento superficial, contribuindo para poluição da água superficial. Onde a concentração de  $NO_3^-$  excede a capacidade com que a planta pode absorver, como pode ocorrer em solos compactados que limitam o crescimento radicular, o excesso pode lixiviar para águas subsuperficiais ou ser perdido por desnitrificação. Em termos de recursos do solo, a compactação pode alterar todos os aspectos físicos, químicos e biológicos do solo (Soane & van Ouwerkerk, 1995).

O manejo pode alterar a relação massa/volume do solo, afetando os fluxos de ar e água (Corcini et al., 2007; Rosa et al., 2007). Quanto mais compactado o solo, menor a taxa de infiltração de água e fluxo de gases, com possibilidade de escoamento superficial e assoreamento de rios.

Dentre os impactos ambientais decorrentes da atividade de colheita de madeira, os danos às rebrotas e à estrutura do solo merecem atenção especial, em virtude dos reflexos negativos que podem provocar sobre a floresta, caso a brotação seja conduzida para formação da futura floresta (Andrade et al., 2000).

Os solos sofrem intensas mudanças nas suas propriedades físicas, químicas e biológicas durante sua formação natural e como resultado de processos antropogênicos. Na atividade agrícola e florestal, a deformação e o cisalhamento do solo pela compactação e a erosão hídrica são considerados os processos mais prejudiciais. Esses processos resultam não apenas na redução da produtividade do local, mas também contribuem para a poluição da água com escoamento superficial, emissão de gases e alta exigência energética para obter elevadas produtividades (Horn, 2003).

Percebe-se que a compactação pode causar um problema não apenas pontual, mas difuso, podendo afetar toda uma região, pela contaminação das águas e assoreamento dos rios. É importante avaliar a capacidade de o solo ser usado para práticas agrícolas, florestais ou pastagem, podendo-se, dessa forma, manejá-lo da melhor forma possível e evitar sua degradação. Solos de floresta natural com baixos valores de densidade do solo, pressão de preconsolidação e alta permeabilidade, por exemplo, são altamente vulneráveis à compactação (Horn et al., 2004).

Maiores aplicações de fertilizantes em solos compactados para compensar as reduções na produtividade causadas pela compactação aumentam o potencial de perdas de nutrientes (Lipiec & Stepniewski, 1995), aumentando os riscos de contaminação do ambiente.

## VALORES CRÍTICOS OU LIMITANTES INDICADORES DE COMPACTAÇÃO

Com vistas em avaliar níveis de compactação do solo e sua relação com as propriedades físicas e produtividade de plantas, trabalhos vêm sendo realizados (Secco et al., 2004; Collares, 2005; Suzuki, 2005; Lima et al., 2006a). No entanto, ainda existem dúvidas sobre a intensidade de compactação na qual sistemas de manejo influenciam negativamente os atributos físico-hídrico-mecânicos do solo, o desenvolvimento e a produtividade das culturas (Secco et al., 2004; Lima et al., 2006a).

A resistência à penetração, macroporosidade e densidade do solo são as propriedades físicas mais comumente apresentadas na literatura com

valor indicativo de ocorrência de problemas para a planta. No início, as pesquisas, em sua maioria, limitavam-se à comparação de manejos com alguma área-referência, como uma mata, campo ou floresta nativa (Gomes et al., 1978; Cintra et al., 1983; Silva et al., 1986; Carpenedo & Mielniczuk, 1990; Cavenage et al., 1999; Alves et al., 2005). Com o surgimento do plantio direto, os trabalhos passaram a comparar os sistemas de preparo do solo, como cultivo mínimo e convencional, com o plantio direto (Albuquerque et al., 1995; De Maria et al., 1999; Alves & Suzuki, 2004; Suzuki & Alves, 2004; Lima et al., 2006a). Atualmente, os trabalhos buscam valores considerados críticos, limitantes ou restritivos ao crescimento das plantas não apenas a comparação de sistemas de manejo (Genro Junior, 2002; Reichert et al., 2003; Secco et al., 2004; Reinert et al., 2006). É importante definir a diferença entre esses três termos: a) crítico é um valor de alguma propriedade que retardaria alguma função ou o crescimento da planta, mas que não limitaria nem restringiria tal função; b) limitante ou restritivo é um valor que interrompe ou impede alguma função ou o crescimento da planta.

A resistência do solo à penetração de raízes e a densidade do solo estão relacionadas com o estado de compactação do solo e muitos trabalhos têm buscado valores que causem restrições ao crescimento das raízes das plantas e diminuição de produtividade. A dificuldade está em isolar o efeito dessas propriedades físicas da umidade do solo; portanto, dúvidas persistem sobre a propriedade do solo que melhor caracterize o estado de compactação e que seja sensível a variações de manejo do solo (Silva, 2003).

A dificuldade para a definição e, conseqüentemente, para a adoção de um valor crítico para propriedades e atributos de solo reside no fato de que esses não são determinantes diretos do crescimento das plantas, diferentemente do ar, água e temperatura, que influenciam diretamente o crescimento das plantas. Além disso, as propriedades e atributos do solo atuam de forma conjunta e complexa sobre os fatores de crescimento e, assim, a definição de um valor específico para uma propriedade pode não ter significado, quando analisado isoladamente (Reichert et al., 2003). Outra dificuldade é que solos (Braidá, 2004; Silva et al., 2006b,c), culturas (Silva et al., 2006a; Foloni et al., 2006) e até mesmo os cultivares dentro de uma mesma espécie (Guimarães et al., 2002; Beutler et al., 2006) respondem diferentemente aos níveis de compactação do solo.

Relacionando o crescimento de milho com porosidade de aeração e resistência do solo à penetração, foi constatada a importância dos bioporos para o crescimento das plantas (Silva et al., 2004a). No entanto, segundo

esses autores, as técnicas utilizadas na avaliação das propriedades físicas do solo não consideram esse tipo de poros. Os bioporos estão além da faixa usada pelas técnicas padrão para medir a distribuição do tamanho de poros. Eles afirmam que, para os casos específicos de porosidade de aeração e resistência à penetração, seria mais realístico obter limites baseados no crescimento relativo das plantas em vez de buscar limites associados ao crescimento/não crescimento ou produtividade/não produtividade.

## Macro porosidade

O valor crítico de macro porosidade parece estar bem estabelecido. Vários autores consideram o valor de macro porosidade de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  como sendo crítico para o crescimento das plantas (Baver, 1949; Vomocil & Flocker, 1961; Grable & Siemer, 1968; Kiehl, 1979; Gupta & Allmaras, 1987). No entanto, van Lier (2001) afirma que a porosidade total do solo, a profundidade a ser aerada e o nível de consumo de  $\text{O}_2$  influem significativamente na porosidade de aeração mínima necessária para uma oxigenação completa de um sistema radicular. Pelo equacionamento, em termos físicos do processo de oxigenação para estimativa da porosidade de aeração mínima, e utilizando valores obtidos na literatura para substituição na equação, esse autor verificou que, para culturas com um sistema radicular pouco profundo (em torno de 10 cm), os valores de porosidade de aeração seriam ao redor de  $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , enquanto em condições de maior profundidade do sistema radicular e alto consumo de  $\text{O}_2$ , associadas a climas tropicais, a necessidade de porosidade de aeração atingiria valores próximos de  $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ .

Por meio de relação positiva e não-linear entre altura de milho e porosidade de aeração, em sistemas plantio direto e convencional, o crescimento do milho não foi rapidamente inibido no valor de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  de porosidade de aeração (Silva et al., 2004a). Houve uma faixa de porosidade de aeração entre  $0,05$  e  $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , em que o crescimento da planta aumentou com o acréscimo da porosidade de aeração e seu crescimento foi alterado de afetado para não afetado, em ambos os sistemas de manejo. No estudo, uma porosidade de aeração de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  representou um crescimento relativo de 80 e 75 %, respectivamente, para o plantio direto e convencional. Uma macro porosidade mínima de  $0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  foi estimada por Hodgson & MacLeod (1989) para que ocorresse difusão de gases em um solo argiloso.

## Resistência mecânica do solo à penetração

Vários são os trabalhos que buscam um valor ou uma faixa de valores críticos de resistência à penetração que restringem o crescimento das plantas. Contudo, ainda há incertezas quanto a esses valores, mesmo por que diferentes plantas respondem diferentemente aos valores críticos e, embora essa avaliação seja mais sensível em identificar camadas de solo compactadas, ela não considera a bioporosidade do solo, que é tão importante para o crescimento das raízes em solos compactados. Buscando identificar um valor ou faixa de resistência à penetração que seja restritiva ao crescimento radicular, trabalhos vêm sendo realizados no campo e em laboratório ou em casa de vegetação, sob condições controladas.

De modo geral, em condições experimentais controladas em laboratório ou casa de vegetação, os níveis de compactação são criados artificialmente, como uma camada homogênea, e isso não ocorre no campo. Além disso, o controle da umidade do solo em laboratório é um fato que dificilmente se consegue no campo, mesmo em condições irrigadas. Canarache (1990) sugeriu alguns limites de resistência à penetração (RP) considerando o crescimento radicular, sob condições de laboratório. Valores < 2,5 MPa não apresentariam limitações ao crescimento radicular; valores entre 2,6 e 10 MPa causariam algumas limitações e valores superiores a 10 MPa não possibilitariam o crescimento radicular. Além de Taylor et al. (1966) que, trabalhando em condições controladas, indicaram  $RP > 2$  MPa como restritiva; Meroto Jr. & Mundstock (1999), trabalhando em vaso, verificaram que uma resistência de 2 MPa ocasionou uma mínima redução da massa de raízes secas, parte aérea e comprimento radicular do trigo, enquanto para uma resistência de 3,5 MPa, as restrições foram severas.

O diâmetro médio e a massa de matéria seca da raiz da soja aumentaram até um valor de resistência à penetração de, respectivamente, 2,07 e 1,99 MPa, em amostras de um Latossolo Vermelho distrófico (271 g kg<sup>-1</sup> de argila), com estrutura preservada e equilibradas à tensão de 0,01 MPa (Beutler & Centurion, 2004a). A redução da produtividade da soja ocorreu a um valor de resistência à penetração de 0,85 MPa, na camada de 5-15 cm, associado ao decréscimo de 18 % da densidade radicular.

Houve redução da produtividade da cultura do arroz a partir da resistência do solo à penetração de 2,38 e 2,07 MPa, respectivamente, para um Latossolo Vermelho distrófico típico textura média (687 g kg<sup>-1</sup> de areia, 42 g kg<sup>-1</sup> de silte e 271 g kg<sup>-1</sup> de argila) e um Latossolo Vermelho eutroférico típico textura argilosa (227 g kg<sup>-1</sup> de areia, 256 g kg<sup>-1</sup> de silte e 517 g kg<sup>-1</sup> de argila), para os respectivos teores de água de 0,14 kg kg<sup>-1</sup> e 0,27 kg kg<sup>-1</sup>, correspondentes à

tensão de 0,01 MPa, em casa de vegetação (Beutler & Centurion, 2004b). A produtividade de matéria seca da parte aérea foi restringida a partir de 2,30 e 2,90 MPa, respectivamente, para o Latossolo Vermelho distrófico típico textura média e Latossolo Vermelho eutroférico típico textura argilosa.

Uma resistência à penetração de 1,66 e 2,22 MPa, para a cultura da soja, e de 0,27 e 2,38 MPa, para a cultura do arroz, respectivamente, para os conteúdos de água de 0,11 kg kg<sup>-1</sup> (tensão de 50 kPa) e de 0,14 kg kg<sup>-1</sup> (tensão de 10 kPa), reduziu a produtividade dessas culturas em um Latossolo Vermelho distrófico típico textura média (687 g kg<sup>-1</sup> de areia, 42 g kg<sup>-1</sup> de silte e 271 g kg<sup>-1</sup> de argila) em vaso (Beutler et al., 2004a). Uma resistência de 3,05 e 2,81 MPa, para a cultura da soja, e de 0,43 e 2,06 MPa, para a cultura do arroz, respectivamente, para os teores de água de 0,24 kg kg<sup>-1</sup> (tensão de 50 kPa) e de 0,27 kg kg<sup>-1</sup> (tensão de 10 kPa), reduziu a produtividade em um Latossolo Vermelho eutroférico típico textura argilosa (227 g kg<sup>-1</sup> de areia, 256 g kg<sup>-1</sup> de silte e 517 g kg<sup>-1</sup> de argila). Com o aumento do teor de água, pode-se tolerar um maior valor de resistência à penetração, e o menor valor crítico de resistência à penetração com a redução do conteúdo de água pode ser indicativo de uma interação com efeito do potencial da água no solo, restringindo a atividade fisiológica da planta (Beutler et al., 2004a).

Trabalhos experimentais realizados no campo com vistas em obter uma resistência crítica ou restritiva às plantas expressam, com mais segurança, a situação a que realmente as plantas estão sujeitas, como condições climáticas diferenciadas durante seu ciclo e heterogeneidade e bioporosidade do solo. Trabalhando no campo, Laboski et al. (1998) estabeleceram como valor restritivo 3,0 MPa. Uma resistência à penetração de 2,09 MPa avaliada no campo poderia estar determinando redução do crescimento radicular da soja em um Latossolo Roxo distrófico (750 g kg<sup>-1</sup> de argila) (De Maria et al., 1999).

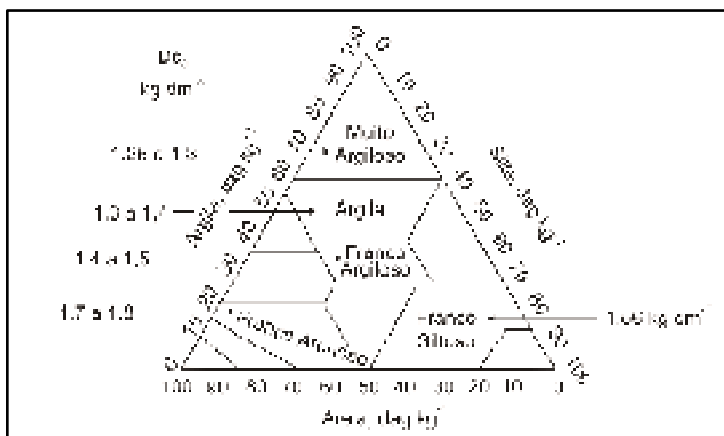
Assim como para porosidade de aeração, a altura do milho não foi reduzida bruscamente no valor de 2 MPa obtido no campo, considerado crítico por alguns autores. Embora tenha sido determinado para crescimento radicular, talvez não seja adequado relacionar tal valor com crescimento foliar (Silva et al., 2004a). Uma resistência à penetração de 2 MPa apresentou um crescimento relativo da parte aérea de 69 % para o plantio direto e de 65 % para o plantio convencional. O valor de resistência à penetração, avaliada em laboratório com um penetrômetro eletrônico e teor de água retida à tensão de 10 kPa, a partir do qual ocorreu redução da produtividade, variou entre os cultivares de soja, com valores entre 2,24 e 2,97 MPa em um Latossolo Vermelho distrófico típico textura média (635 g kg<sup>-1</sup> de areia, 35 g kg<sup>-1</sup> de silte e 330 g kg<sup>-1</sup> de argila) (Beutler et al., 2006).

Percebe-se grande diversidade de valores críticos de resistência à penetração para as plantas. Portanto, a busca desse valor ainda é um campo aberto para pesquisas. A dificuldade é padronizar, nos trabalhos, a umidade ou tensão em que são realizadas as avaliações de resistência à penetração, bem como os tipos de equipamentos utilizados. Além disso, trabalhos realizados no campo e em casa de vegetação fornecem condições diferenciadas para condução da pesquisa, dificultando comparações. Em casa de vegetação, as condições são controladas, enquanto no campo há grande influência das variações climáticas e da estrutura do solo englobando a bioporosidade, que não é detectada pela resistência à penetração. Uma estratégia para padronizar a resistência à penetração (RP, MPa) de acordo com a umidade volumétrica ( $\theta$ ,  $m^3 m^{-3}$ ) e densidade do solo ( $D_s$ ,  $kg dm^{-3}$ ) é o modelo não-linear desenvolvido por Busscher (1990) ( $RP = a\theta^b D_s^c$ ), como já apresentado.

### Densidade do solo

Dentre as propriedades utilizadas para avaliar a compactação do solo, talvez a densidade seja a mais segura, pois apresenta menor ou nenhuma dependência de outros fatores, como a umidade.

Utilizando dados de densidade do solo crítica quando o intervalo hídrico ótimo é igual a zero (Silva & Kay, 1997; Klein, 1998; Tormena et al., 1998, 1999; Imhoff et al., 2001; Silva, 2003; Silva et al., 2004c), Reichert et al. (2003) propuseram valores críticos de densidade de acordo com classes texturais (Figura 7).



**Figura 7. Variação de valores de densidade do solo quando o intervalo hídrico ótimo é zero, para distintas classes texturais.**

Fonte: Reichert et al. (2003).

A partir dos dados de intervalo hídrico ótimo obtidos em artigos e dissertações/teses publicados, Reinert et al. (2006) apresentaram uma relação entre a densidade crítica ( $D_{sc}$  IHO) e o teor de argila dos solos, com alta capacidade preditiva (Figura 8), e outra relação entre a densidade do solo restritiva ( $D_{sc}$  Rest) e o teor de argila (Quadro 1).

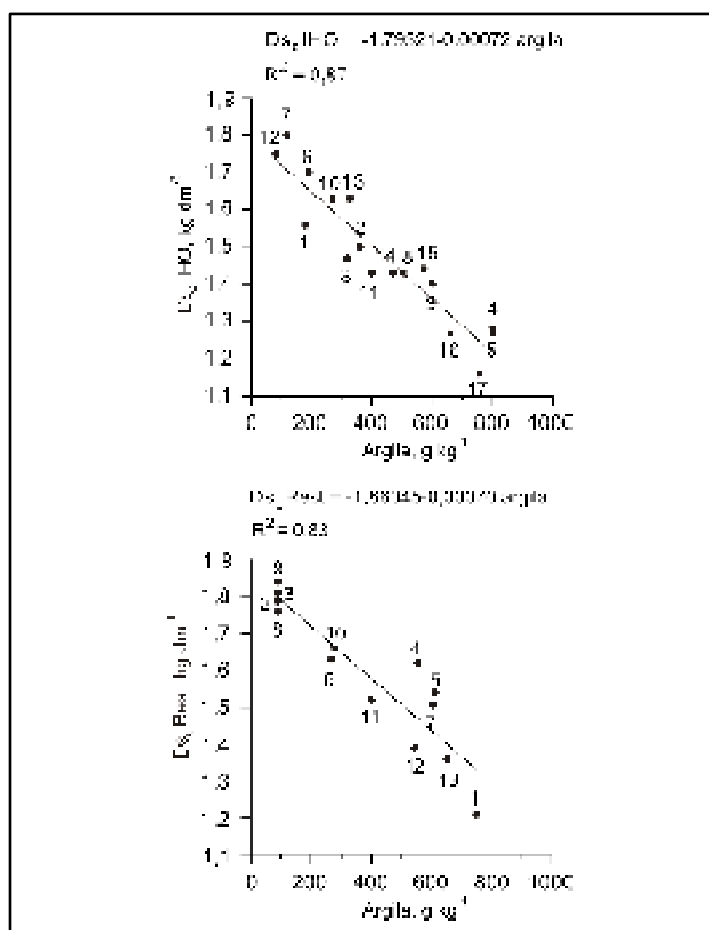


Figura 8. Densidade ( $D_{sc}$ ) crítica a partir de dados de intervalo hídrico ótimo (IHO)- $D_{sc}$  IHO (<sup>1</sup>Silva et al. (1994); <sup>2</sup>Silva & Kay (1997); <sup>3</sup>Betz et al. (1998); <sup>4</sup>Tormena et al. (1998); <sup>5</sup>Tormena et al. (1999); <sup>6</sup>Imhoff et al. (2001); <sup>7,8,9</sup>Silva (2003); <sup>10</sup>Beutler et al. (2004b); <sup>11</sup>Leão et al. (2004); <sup>12</sup>Collares et al. (2006); <sup>13,14,15,16,17</sup>Marcolin (2006)) (a) e a partir da densidade do solo restritiva ( $D_{sc}$  Rest) (<sup>1</sup>De Maria et al. (1999); <sup>2,3</sup>Streck (2003); <sup>4,5</sup>Secco (2003); <sup>6</sup>Beutler et al. (2004b); <sup>7,8,9</sup>Collares (2005); <sup>10,11,12,13</sup>Suzuki (2005)) ( $D_{sc}$  Rest.) (b), em função teor de argila. <sup>\*</sup>números representados nas figuras.

Fonte: Reinert et al. (2006).



**Quadro 1. Valores críticos de densidade do solo ( $D_{sc}$ ) e macroporosidade ( $Ma_c$ ) baseados na observação de restrições em experimentos de campo.**

Autor	Granulometria	$D_{sc}$	$Ma_c$	Restrição
	g kg <sup>-1</sup>	Mg m <sup>-3</sup>	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	
De Maria et al. (1999)	750 argila 200 silte 50 areia	1,21	-	Redução do crescimento radicular da soja
Streck (2003)	89,3 argila 297 silte	1,79	0,06	Redução do crescimento radicular e produtividade do feijoeiro
	614 areia	1,81	0,05	Redução do crescimento radicular e produtividade da soja
Secco (2003)	555 argila 224 silte 221 areia	1,62	-	Redução da produtividade do trigo, mas não da soja e do milho
	610 argila 290 silte 100 areia	1,54	-	Redução da produtividade do trigo e do milho, mas não da soja
Beutler et al. (2004b)	271 argila 42 silte 687 areia	1,63	-	Redução do crescimento radicular e produtividade do arroz
Collares (2005)	607 argila 176 silte 217 areia	1,49 a 1,53	0,07-0,12	Redução do crescimento radicular e produtividade do feijoeiro
	89,3 argila 297 silte	1,76	0,09	Redução do crescimento radicular do feijoeiro
	614 areia	1,84	0,08	Redução do crescimento radicular e produtividade do feijoeiro
Suzuki (2005)	278 argila 331 silte 391 areia	1,66	0,07	
	400 argila 457 silte 143 areia	1,52	0,06	Redução do crescimento radicular da soja
	546 argila 341 silte 114 areia	1,39	0,10	
	654 argila 261 silte 86 areia	1,36	0,05	Redução do crescimento radicular e produtividade da soja e redução da produtividade do milho

Fonte: Reinert et al. (2006).

A densidade crítica obtida com relação ao teor de argila é menor do que o valor obtido considerando a densidade restritiva, pelas funções propostas por Reinert et al. (2006). Pode-se considerar que a densidade crítica seja

um alerta de que medidas preventivas ou recuperadoras devem ser tomadas para que a densidade não alcance maiores valores tornando-se restritiva.

Outra estratégia utilizada para obter uma densidade crítica é relacionar a macroporosidade com a densidade do solo. A maioria dos trabalhos considera  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  como sendo a macroporosidade mínima para o adequado crescimento das plantas. Portanto, pela relação entre macroporosidade de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , obtém-se a densidade crítica. Genro Junior (2002) verificou que essa macroporosidade correspondeu a uma densidade de  $1,48 \text{ kg dm}^{-3}$ , em um Latossolo Vermelho distroférico típico com  $680 \text{ g kg}^{-1}$  de argila. Para essa mesma relação, Secco et al. (2004) observaram uma densidade de  $1,36 \text{ kg dm}^{-3}$  em um Latossolo Vermelho distroférico ( $427 \text{ g kg}^{-1}$  de argila). Argenton et al. (2005) obtiveram uma densidade de  $1,30 \text{ kg dm}^{-3}$ , em sistemas de preparo convencional e reduzido para um Latossolo Vermelho distroférico muito argiloso ( $65 \text{ g kg}^{-1}$  de areia,  $265 \text{ g kg}^{-1}$  de silte e  $670 \text{ g kg}^{-1}$  de argila). Contudo, assim como verificado por Reinert et al. (2006) para a densidade estimada pelos dados de intervalo hídrico ótimo, os valores de densidade obtidos por Secco et al. (2004) e Argenton et al. (2005) foram menores do que aqueles estimados por Reinert et al. (2006), considerando redução do crescimento radicular ou produtividade das culturas.

Valores de resistência à penetração limitantes à produtividade das culturas da soja e arroz, nas tensões de 50 e 10 kPa, em um Latossolo Vermelho distrófico típico textura média ( $687 \text{ g kg}^{-1}$  de areia,  $42 \text{ g kg}^{-1}$  de silte e  $271 \text{ g kg}^{-1}$  de argila) e um Latossolo Vermelho eutroférico típico textura argilosa ( $227 \text{ g kg}^{-1}$  de areia,  $256 \text{ g kg}^{-1}$  de silte e  $517 \text{ g kg}^{-1}$  de argila) em vaso, foram obtidos por Beutler et al. (2004a). A partir desses valores de resistência à penetração, utilizando a estratégia do intervalo hídrico ótimo, os autores verificaram que valores de densidade de  $1,55$  e  $1,63 \text{ kg dm}^{-3}$  no Latossolo Vermelho distrófico típico textura média e  $1,22$  e  $1,24 \text{ kg dm}^{-3}$  e no Latossolo Vermelho eutroférico típico textura argilosa seriam críticos para a cultura da soja nas respectivas tensões de 50 e 10 kPa. Para a cultura do arroz, valores de densidade de  $1,12$  e  $1,66 \text{ kg dm}^{-3}$  no Latossolo Vermelho distrófico típico textura média e  $0,97$  e  $1,17 \text{ kg dm}^{-3}$  no Latossolo Vermelho eutroférico típico textura argilosa, nas respectivas tensões de 50 e 10 kPa, seriam críticos para a cultura.

Os trabalhos de Reichert et al. (2003) e Reinert et al. (2006) apresentaram valores semelhantes de densidade crítica do solo, considerando o conteúdo de argila. Esses valores estão próximos dos valores restritivos e podem servir como indicadores para futuras pesquisas.

## Grau de compactação

Assim como a densidade do solo, o grau de compactação também é independente de fatores, como a umidade, que podem contribuir para sua variação. Além disso, essa propriedade tem a possibilidade de comparar solos de diferentes granulometrias, o que facilitaria a comparação de resultados entre diferentes locais. Pelos resultados obtidos na literatura (Håkansson, 1990; Carter, 1990; Lipiec et al., 1991; Beutler et al., 2005; Suzuki, 2005; Suzuki et al., 2007), o grau de compactação ótimo para as culturas, considerando a produtividade, encontra-se entre 77 e 88 %. Contudo, a relação entre grau de compactação e propriedades do solo como resistência à penetração, macroporosidade e condutividade hidráulica, ou mesmo a relação entre grau de compactação e medidas de crescimento aéreo e radicular da planta, como altura, área foliar e crescimento radicular, são altamente dependentes da densidade do solo e ainda precisam ser mais bem estudadas.

Outra questão de grande importância são as formas de obtenção da densidade-referência. As três formas de obtenção (teste de Proctor, teste de compressão uniaxial com aplicação de 200 kPa em amostras com estrutura não preservada e aplicação de 1.600 kPa em amostras de solo com estrutura preservada) geram valores de densidade-referência diferenciados, e, conseqüentemente, o valor de grau de compactação também poderá ser diferente entre os diferentes métodos, dificultando a comparação de resultados entre os trabalhos.

## Pressão de preconsolidação

É importante definir ou estabelecer valores ou faixas de pressão de preconsolidação que sejam favoráveis para manutenção da estrutura do solo visando a um adequado crescimento de plantas e evitando a compactação adicional pelo tráfego de máquinas ou pisoteio animal. Sistemas de manejo com maior densidade (mais compactados), resultado do acúmulo de pressões que o solo já sofreu e continua sofrendo pelo tráfego de máquinas, apresentaram menor deformação em diferentes solos com teor de argila variando de, aproximadamente, 97 a 657 g kg<sup>-1</sup> de argila (Suzuki, 2005). Em contrapartida, manejos com menor estado de compactação apresentaram maior deformação e foram mais susceptíveis à compactação. É importante que o solo apresente resistência à deformação, quando submetido ao tráfego de máquinas; porém, essa resistência à deformação pode não ser favorável para o adequado crescimento das plantas.

Uma classificação para a pressão de preconsolidação, baseada em solos revolvidos da Alemanha, foi apresentada por Horn & Fleige (2003). Essa classificação foi obtida por meio de funções de pedotransferência, considerando umidade, densidade e medidas de resistência ao cisalhamento. Os autores classificaram a pressão de preconsolidação em muito baixa (< 30 kPa), baixa (30-60 kPa), média (60-90 kPa), alta (90-120 kPa), muito alta (120-150 kPa) e extremamente alta (> 150 kPa).

Valores de pressão de preconsolidação para um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e um Latossolo Vermelho distrófico típico sob plantio direto foram apresentados por Silva et al. (2002a), como variável do estado inicial de compactação ou densidade do solo (Quadro 2), e por Silva et al. (2002b), como variável do grau de saturação em água (Quadro 3). Esses valores servem como indicadores para manter a estrutura do solo, evitando uma compactação adicional, ou fazer um planejamento em relação ao tráfego de máquinas e animais, evitando ou prevenindo uma compactação adicional.

Valores de pressão de preconsolidação entre 360 e 500 kPa podem ser aplicados a um Podzólico Vermelho-Amarelo (190 g kg<sup>-1</sup> de argila) sem provocar condições restritivas ao crescimento radicular e sem promover compactação adicional (Imhoff et al., 2001). Esses autores consideram altos esses valores tendo em vista a pressão aplicada ao solo pelos equipamentos motomecanizados tradicionais.

**Quadro 2. Valores médios de pressão de preconsolidação (kPa) em função do estado inicial de compactação de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e um Latossolo Vermelho distrófico típico. Amostras com grau de saturação em água na faixa de 50 a 80 %.**

Profundidade (m)	Densidade do solo (kg dm <sup>-3</sup> )			
	1,31-1,45	1,46-1,60	1,61-1,75	1,76-1,80
	<b>Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico</b>			
0,00-0,02	70,9	73,1	115,6	132,6
0,10-0,12	62,3	91,7	98,5	105,4
	<b>Latossolo Vermelho distrófico típico</b>			
	1,15-1,30	1,31-1,45	1,46-1,60	
0,00-0,02	50,8	99,4	168,3	
0,10-0,12	70,5	100,5	131,9	

Fonte: Silva et al. (2002a).

**Quadro 3. Valores médios de pressão de pressão de preconsolidação (kPa) em função grau de saturação em água de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e um Latossolo Vermelho distrófico típico.**

Profundidade (m)	Grau de saturação (%)						
	<15	16-30	31-45	46-60	61-75	76-90	91-100
<b>Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico</b>							
0,00-0,02 <sup>(1)</sup>	160,2	136,4	72,4	69,6	70,4	67,9	nd
0,10-0,12 <sup>(2)</sup>	139,0	156,0	156,2	141,2	119,3	112,1	87,0
<b>Latossolo Vermelho distrófico típico</b>							
0,00-0,02 <sup>(3)</sup>	176,8	nd	159,4	128,7	78,2	88,6	76,6
0,10-0,12 <sup>(3)</sup>	86,9	140,4	152,8	160,7	98,7	76,4	53,9

<sup>(1)</sup> Densidade do solo = 1,46-1,60 kg dm<sup>-3</sup>; <sup>(2)</sup> Densidade do solo = 1,61-1,75 kg dm<sup>-3</sup>; <sup>(3)</sup> Densidade do solo = 1,30 a 1,45 kg dm<sup>-3</sup>; nd = não determinado.

Fonte: Silva et al. (2002b).

## PROPOSTA PARA OBTENÇÃO DE VALORES INDICADORES DE COMPACTAÇÃO DO SOLO

Neste tópico são apontadas algumas formas para estimar valores críticos de propriedades físicas e mecânicas do solo. Os valores aqui estimados ainda são preliminares, necessitando de maiores informações para aumentar sua confiabilidade e adoção em larga escala. Contudo, a proposta para obtenção desses valores é o início para que eles sejam alcançados.

### Condutividade hidráulica do solo saturado

Para avaliar a condutividade hidráulica do solo saturado, são propostas duas formas de obtenção de um valor crítico: a) a partir de uma macroporosidade de 0,10 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, valor considerado crítico para o crescimento das plantas (Vomocil & Flocker, 1961; Grable & Siemer, 1968; Kiehl, 1979; Baver, 1949; Gupta & Allmaras, 1987), já mencionado na seção "Valores críticos ou limitantes indicadores de compactação"; b) considerando 85 % como sendo um valor ótimo de grau de compactação para as culturas, como discutido naquela mesma seção, será estimado um valor de condutividade crítico como variável desse valor de grau de compactação.

Essas relações são realizadas com dados de condutividade hidráulica do solo saturado apresentados por Silva (2003), Streck (2003), Barreto Riquelme (2004) e Lima et al. (2006a). Streck (2003) e Barreto Riquelme (2004) obtiveram a condutividade hidráulica no campo, com um permeâmetro de Guelph (Elrick et al., 1987), e Silva (2003) e Lima et al. (2006a) utilizaram um permeâmetro de carga constante (Libardi, 2005), para obter a condutividade hidráulica do solo saturado, em laboratório.

### Condutividade hidráulica e macroporosidade do solo

Com a equação  $\log K_{\theta s} = -0,40809 + 15,52553 \text{ macro}$ , há possibilidade de estimar a condutividade hidráulica crítica, considerando uma macroporosidade de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Figura 9). O valor da condutividade hidráulica correspondente a essa macroporosidade é de  $13,8 \text{ mm h}^{-1}$ , sendo esse o valor crítico considerando uma macroporosidade de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Na figura 9, foram utilizados os dados de macroporosidade e condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{\theta s}$ ) de Streck (2003), Barreto Riquelme (2004) e Lima et al. (2006a).

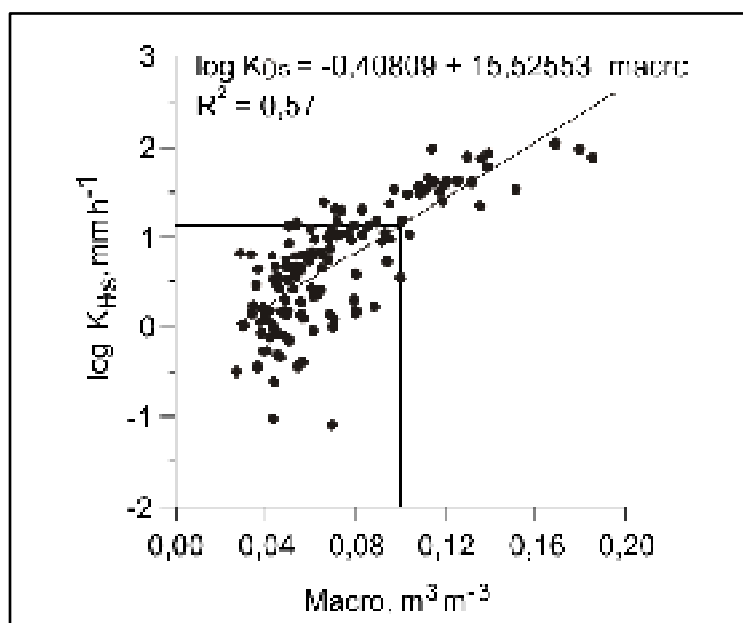


Figura 9. Logaritmo da condutividade hidráulica do solo saturado ( $\log K_{\theta s}$ ) e como variável da Macroporosidade (Macro).

### Condutividade hidráulica e grau de compactação

Para calcular a relação entre grau de compactação e condutividade hidráulica do solo saturado, foram utilizados dados de Silva (2003), Streck (2003), Barreto Riquelme (2004) e Lima et al. (2006a). A densidade-referência para cálculo do grau de compactação foi obtida a partir de um banco de dados para os solos utilizados nos trabalhos citados anteriormente. Considerou-se como densidade-referência aquela obtida por uma pressão de 1.600 kPa no teste de compressão uniaxial, em amostras com estrutura preservada, conforme Suzuki (2005). O valor de condutividade hidráulica do solo saturado correspondente a um grau de compactação de 85 %, considerado ótimo para as culturas, foi de 27,5 mm h<sup>-1</sup> (Figura 10).

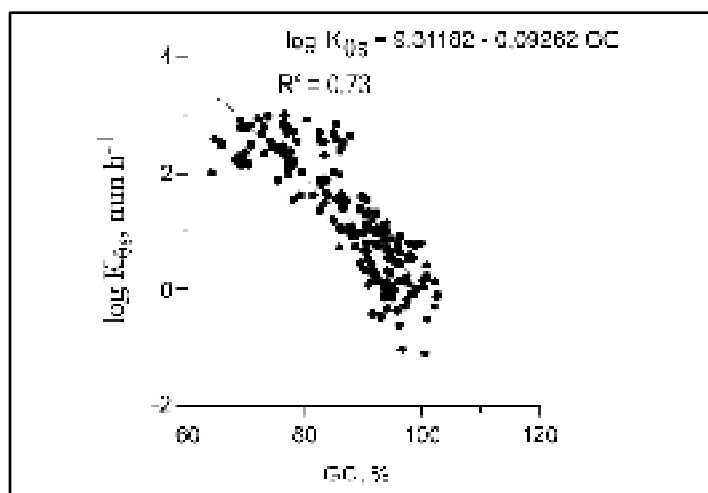


Figura 10. Logaritmo da condutividade hidráulica do solo saturado ( $\log K_{0.5}$ ) como variável do grau de compactação (GC).

O valor de condutividade hidráulica do solo saturado indicado pelos dois métodos propostos mostrou-se diferenciado, não sendo ainda possível definir um valor crítico. Assim, resultados experimentais que possam ser inseridos nessas funções devem ser buscados com vistas em obter um valor crítico de condutividade hidráulica.

### Resistência mecânica do solo à penetração

Uma proposta para estimar um valor crítico ou restritivo de resistência à penetração consiste em utilizar resultados da literatura com diferentes

valores de resistência à penetração para obtenção do intervalo hídrico ótimo (IHO) e a equação proposta por Reinert et al. (2006), que relaciona a densidade do solo restritiva ( $D_{s_c}$  Rest) com o teor de argila (Figura 8). Três trabalhos na literatura (Silva et al., 1994; Tomena et al., 1998; Silva, 2003) relacionaram diferentes valores de resistência à penetração e o intervalo hídrico ótimo. Silva et al. (1994), para um solo com 300 g kg<sup>-1</sup> de areia, 520 g kg<sup>-1</sup> de silte e 180 g kg<sup>-1</sup> de argila, relacionaram o IHO com valores de resistência à penetração de 2, 3, 4 e 5 MPa; contudo, para resistência à penetração de 4 e 5 MPa, não houve IHO=0. Tomena et al. (1998), em um solo com 50 g kg<sup>-1</sup> de areia, 150 g kg<sup>-1</sup> de silte e 800 g kg<sup>-1</sup> de argila, relacionaram o intervalo hídrico ótimo com valores de resistência de 1,5, 2 e 3 MPa; porém, para resistência à penetração de 3 MPa, não houve IHO=0. Silva (2003) relacionou três solos (660 g kg<sup>-1</sup> de areia, 220 g kg<sup>-1</sup> de silte e 120 g kg<sup>-1</sup> de argila; 250 g kg<sup>-1</sup> de areia, 250 g kg<sup>-1</sup> de silte e 500 g kg<sup>-1</sup> de argila; 100 g kg<sup>-1</sup> de areia, 300 g kg<sup>-1</sup> de silte e 600 g kg<sup>-1</sup> de argila) com valores de 1, 2 e 3 MPa.

Comparando as duas equações propostas por Reinert et al. (2006), utilizando dados de IHO obtidos em trabalhos e dissertações/teses publicadas e a densidade do solo restritiva (Figura 8), verificou-se que os valores críticos de densidade do solo obtidos pelo intervalo hídrico ótimo ( $D_{s_c}$  IHO), utilizando valores de resistência à penetração de 2 MPa, foram menores aos de densidade do solo restritivo ( $D_{s_c}$  Rest), indicando ser o valor de resistência à penetração restritiva ao crescimento radicular, particularmente em solos sob plantio direto, superior a 2 MPa. Dessa forma, utilizando os resultados de Silva et al. (1994) que obtiveram para um solo com 180 g kg<sup>-1</sup> de argila uma densidade de 1,64 kg dm<sup>-3</sup>, quando o IHO=0, considerando uma resistência à penetração de 3 MPa, e os resultados de Silva (2003), que, utilizando resistência à penetração de 3 MPa, obteve densidades de 1,88, 1,50 e 1,42 kg dm<sup>-3</sup> quando o IHO=0, respectivamente, para solos com 120, 500 e 600 g kg<sup>-1</sup> de argila, relacionaram-se esses valores de densidade com seus respectivos teores de argila (Figura 11).

Comparando os valores de densidade do solo estimados pelas equações da figura 11, que considera o intervalo hídrico ótimo (Densidade do solo = 1,88530-0,00079 argila) e restrições à planta ( $D_{s_c}$  Rest = 1,86045-0,00070 argila) (Figura 8), observaram-se valores de densidade do solo semelhantes. Isso indica que os valores de resistência à penetração que restringem o crescimento radicular ou produtividade das culturas estão próximos ao valor de 3 MPa. Contudo, considerando o reduzido número de resultados na literatura relativos a valores de resistência à penetração diferenciados no IHO, mais trabalhos devem ser realizados para que essa relação quantitativa seja confirmada.



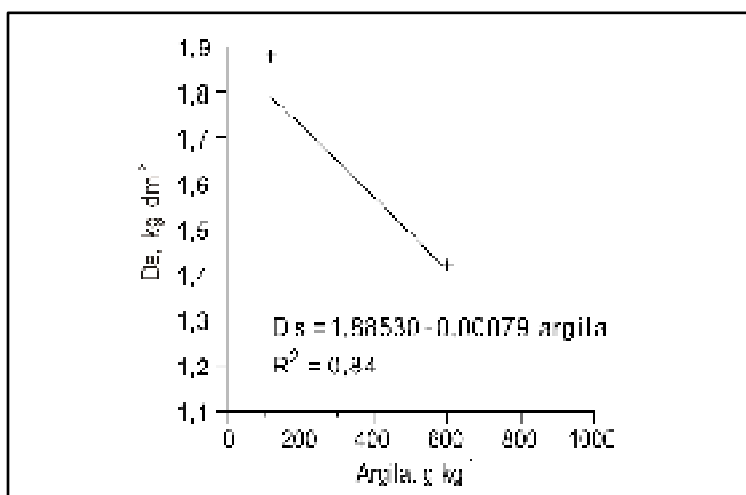


Figura 11. Densidade (Ds) crítica a partir de dados de intervalo hídrico ótimo (IHO), utilizando resistência à penetração de 3 MPa como variável do teor de argila.

## Pressão de preconsolidação

### Pressão de preconsolidação e resistência mecânica do solo à penetração

A estimativa de um valor crítico de pressão de preconsolidação pela resistência à penetração constitui uma alternativa promissora. Vários trabalhos têm apresentado relação significativa entre pressão de preconsolidação e resistência à penetração (Canarache et al., 2000; Mosaddeghi et al., 2003; Dias Juniores et al., 2004; Lima et al., 2006c).

Trabalhando com solos revolvidos, Canarache et al. (2000), para um solo com aproximadamente 228 g kg<sup>-1</sup> de argila, e Mosaddeghi et al. (2003), para um solo com 348 g kg<sup>-1</sup> de argila, verificaram uma relação entre resistência à penetração e pressão de preconsolidação de 10:1. Outrossim, em um pomar de laranja Lima et al. (2006c) verificaram uma relação de 17:1 para um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico com estrutura preservada e 170 g kg<sup>-1</sup> de argila. Portanto, pela relação de 17:1 obtida por Lima et al. (2006c) para solo com estrutura preservada, considerando que um valor de 3 MPa de resistência à penetração em plantio direto seja restritivo ao crescimento de plantas, esse valor corresponderia a uma pressão de preconsolidação de 176 kPa.

Um valor crítico de pressão de preconsolidação estimado pela resistência à penetração facilitaria a tomada de decisão no campo; todavia, mais trabalhos

em diferentes solos e umidades devem ser realizados considerando a relação resistência à penetração e pressão de preconsolidação.

### **Pressão de preconsolidação e densidade do solo**

Outra estratégia para definir um valor ou faixa de pressão de preconsolidação crítico seria por meio de valores críticos, já definidos, de densidade do solo. Silva et al. (2002a) definiram valores médios de pressão de preconsolidação como variável do estado inicial de compactação, representado pela densidade do solo (Quadro 2). Para um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico (79 g kg<sup>-1</sup> de argila), eles definiram as seguintes faixas de densidade: 1,31-1,45; 1,46-1,60; 1,61-1,75 e 1,76-1,80 kg dm<sup>-3</sup>. Para um Latossolo Vermelho distrófico típico (492 g kg<sup>-1</sup> de argila), foram definidas as faixas 1,15-1,30; 1,31-1,45 e 1,46-1,60 kg dm<sup>-3</sup>.

Pela função ( $D_s \text{ Rest} = 1,86045 - 0,00070 \text{ argila}$ ) estabelecida por Reinert et al. (2006), já discutida, pode-se estabelecer a densidade crítica para esses solos. Para o Argissolo, esta densidade seria de 1,80 e de 1,52 kg dm<sup>-3</sup> para o Latossolo. Esses valores estão compreendidos na última faixa de densidade estabelecida por Silva et al. (2002a), correspondente a uma pressão de preconsolidação de 105,4 kPa, para o Argissolo, e de 131,9 kPa, para o Latossolo.

Por meio de estudos usando essa abordagem, poder-se-iam estabelecer faixas para outros solos e, dessa forma, definir valores de pressão de preconsolidação críticos para diferentes solos.

## **MEDIDAS PREVENTIVAS PARA EVITAR A COMPACTAÇÃO**

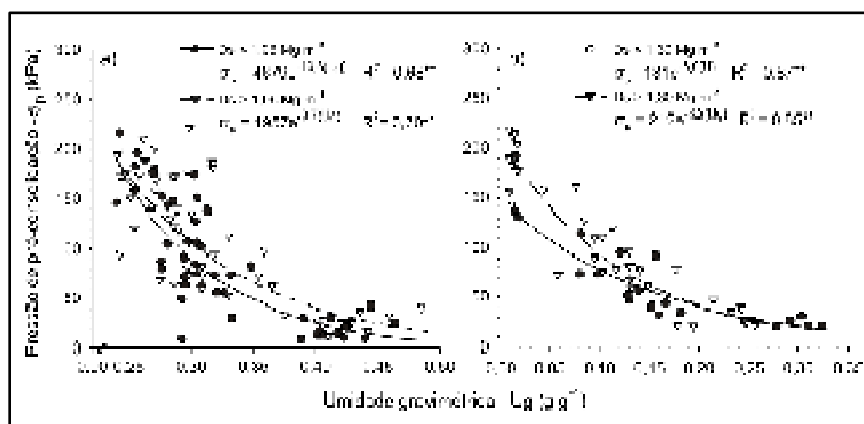
Evitar a compactação em um sistema de produção intensivo no qual as máquinas agrícolas estão cada vez maiores e mais potentes é difícil, mas algumas medidas podem auxiliar na prevenção da compactação adicional do solo. Cada solo apresenta um comportamento em relação ao tráfego de máquinas ou pisoteio animal. Portanto, considerando a grande diversidade de solos, heterogeneidade das áreas e diferentes manejos adotados pelos produtores, cada caso deve ser analisado individualmente para a tomada de decisões em relação à compactação do solo.

É importante definir o nível de compactação para que as exigências, tanto das plantas quanto das operações mecanizadas, sejam satisfeitas total ou, pelo menos, parcialmente. Assim, todo o ciclo, agrícola ou florestal, que vai desde o preparo do solo ou dessecação até à colheita, será completamente realizado sem afetar a qualidade do solo e do meio ambiente em questão. Para prevenir a compactação excessiva ou evitar a degradação da estrutura do solo, é interessante definir a umidade de tráfego, tipo de máquina e rodado utilizados nas operações e tipo de semeadora.

A umidade é fator importante que influencia a compactação do solo. Ela atua como um lubrificante, facilitando o rearranjo das partículas do solo quando este é submetido a pressões. A relação entre a umidade e compactação do solo é dependente do tipo de solo. A densidade do solo aumenta em resposta às pressões de compactação (0, 60, 120, 180 e 240 kPa) obtidas em uma prensa hidráulica, sendo esse efeito mais intensificado com aumento da umidade do solo (0,05, 0,10 e 0,20 kg kg<sup>-1</sup>) para um Latossolo Vermelho-Amarelo oxidíco-gibítico (440 g kg<sup>-1</sup> de areia, 90 g kg<sup>-1</sup> de silte e 470 g kg<sup>-1</sup> de argila) e um Latossolo Amarelo caulínico (450 g kg<sup>-1</sup> de areia, 40 g kg<sup>-1</sup> de silte e 510 g kg<sup>-1</sup> de argila), em vaso (Silva et al., 2006c). Segundo os autores, a água é fator determinante para que ocorra compactação, uma vez que facilita o ajuste das partículas e reduz a resistência dos agregados à deformação física.

O comportamento compressivo de diferentes solos (teor de argila variando entre, aproximadamente, 97 e 657 g kg<sup>-1</sup>) mostrou que solo mais argiloso, dada a sua maior capacidade de retenção de água, mostrou necessidade de maiores cuidados com o tráfego de máquinas, pois apresenta maior susceptibilidade à compactação adicional, quando cargas superiores às que o solo já sofreu são aplicadas (Suzuki, 2005). A explicação para esse fato é que a água no solo forma uma película sobre as partículas sólidas do solo que irá atuar como um lubrificante, facilitando o deslocamento e rearranjo das partículas nos vazios do solo (Silva et al., 2000b). Esses autores afirmam que, especialmente para solos argilosos, deve-se ter cuidado para evitar o tráfego excessivo sobre o solo úmido.

A compactação adicional é dependente da umidade (Reinert, 1990; Imhoff et al., 2001; Silva et al., 2002b; Dias Junior et al., 2004; Lima et al., 2006c) e da densidade do solo (Reinert, 1990; Silva et al., 2002a). O tráfego de máquinas em condições de menor umidade no solo evita a compactação adicional, como verificado por Braida (2004) (Figura 12) e outros autores (Oliveira et al., 2003; Dias Junior et al., 2004; Lima et al., 2006c).



**Figura 12.** Pressão de preconsolidação como variável da umidade gravimétrica de um Nitossolo Vermelho distrófico (a) e um Argissolo Vermelho-Amarelo arênico (b), para duas classes de densidade.

Fonte: Braida (2004).

Nas tensões mais baixas (maior umidade) e com o solo mais poroso, as deformações do Latossolo Vermelho distrófico típico textura argilosa no teste de compressão uniaxial foram maiores, evidenciando a necessidade de um monitoramento da umidade do solo na tomada de decisão da entrada de máquinas em áreas agrícolas (Oliveira et al., 2003). Também foi observado pelos autores que os valores de pressões que podem reduzir a porosidade do solo a níveis críticos ao crescimento e desenvolvimento de plantas foram menores para as condições mais úmidas, sendo dependente também da porosidade inicial do solo.

Considerando a umidade um dos fatores que influenciam o nível de compactação do solo, recomenda-se evitar o uso de máquinas pesadas e retirar os animais da área quando o solo estiver com umidade acima do ponto de friabilidade em um sistema de integração lavoura-pecuária em um Nitossolo ( $550 \text{ g kg}^{-1}$  de argila) para evitar a compactação (Albuquerque et al., 2001).

Maiores valores de densidade do solo comumente observados no sistema plantio direto em relação ao plantio convencional não foram verificados por Silva et al. (2005), que atribuíram tal fato ao trânsito de máquinas, quando o solo encontrava-se no estado friável, e ao incremento de C orgânico na camada superficial do solo, aumentando a estabilidade de agregados e, conseqüentemente, a resistência do solo a pressões exercidas pelas máquinas.

Após revisão sobre compactação do solo causada por elevadas cargas poreixo, Hadas (1994) conduiu que, sob condições normais de aumento

de densidade com a profundidade, utilizando pressão de contato baixa a média, independente da carga por eixo, a compactação permanecerá confinada na zona superior de manejo do solo ou imediatamente abaixo dela. No entanto, altas cargas por eixo aumentarão o volume de solo e profundidade afetados pela compactação. Camadas no subsolo serão compactadas quando o solo for trafegado com pneus largos e altas cargas por eixo, com moderada a alta pressão de contato (250-450 kPa), somente em solos úmidos ou sob elevada pressão de contato (> 500 kPa) (pneus estreitos com elevada carga por eixo) (Hadas, 1994).

O risco de compactação do subsolo é elevado, quando as pressões aplicadas são maiores do que a capacidade de suporte do subsolo, sendo a umidade um dos responsáveis por esse decréscimo da capacidade de suporte (Alakuku et al., 2003). Segundo esses autores, máquinas e equipamentos utilizados em áreas sob condições críticas deveriam ser ajustadas à atual resistência do subsolo controlando as cargas por rodado e usando pneu com baixa pressão.

Algumas estratégias preventivas para evitar a compactação do subsolo são apresentadas por Chamen et al. (2003), como não revolver o solo repetidamente, como uma técnica rotineira; aumentar a estabilidade da estrutura do solo e reduzir as pressões aplicadas por máquinas; selecionar máquinas e práticas de campo com baixo risco potencial de causar compactação e assimilar novas técnicas de baixo risco.

Para minimizar a compactação em áreas florestais, Andrade et al. (2000) sugerem a utilização de carretas com eixo em tandem (dois eixos conjugados) e, se possível, com pneus florestais, o que aumentará a área de contato entre o pneu e o solo, resultando em melhor distribuição da pressão sobre o solo. Outra sugestão é a disposição dos resíduos sobre as entrelinhas de tráfego das máquinas, de maneira a formar um colchão protetor para o solo. Segundo Fernandes & Souza (2003), as máquinas usadas na colheita florestal deveriam utilizar pneus com baixa pressão e alta flutuação para atenuar a compactação.

O tráfego controlado, quer pela redução no número de operações mecanizadas durante o ciclo da cultura, quer pela fixação de linhas permanentes de tráfego, deixando livres de compactação as zonas de cultivo e reduzindo a casualização do tráfego, constitui alternativa que pode contribuir para minimizar a compactação nas áreas agrícolas. O tráfego controlado tem sido sugerido por vários autores (Hamza & Anderson, 2005; Raper, 2005; Braunack & McGarry, 2006; Chan et al., 2006; Rosa, 2007). Em plantio direto, nas linhas onde ocorreu o tráfego de máquinas houve

aumento da densidade e resistência à penetração, e redução da condutividade hidráulica, principalmente na camada superficial (0-15 cm) de um solo com 170 g kg<sup>-1</sup> de areia, 530 g kg<sup>-1</sup> de silte e 300 g kg<sup>-1</sup> de argila (Unger, 1996). Além da maior densidade e resistência à penetração e menor macroporosidade, verificou-se redução do crescimento radicular de canola e trigo, bem como redução da produtividade de canola nas linhas de tráfego de máquinas em um Vertissolo sódico (Chan et al., 2006).

O tráfego controlado associado ao cultivo mínimo pode ser benéfico em longo prazo para a indústria canieira, mantendo a produtividade de uma forma sustentável (Braunack & McGarry, 2006). Rosa (2007) também constatou efeito benéfico do tráfego controlado na manutenção da estrutura de um Latossolo Vermelho distrófico. Além dos benefícios relacionados com o solo, o menor gasto de combustível e a menor necessidade de trabalho das máquinas são outros fatores favorecidos pelo tráfego controlado. No plantio direto sob tráfego controlado, a energia utilizada foi de 28-34 % daquela exigida pelo plantio convencional e de 39-59 % da energia requerida pelo sistema convencional nas entrelinhas do tráfego, com uma substancial melhoria na eficiência de produção, representada pela energia exigida por unidade de produção das culturas (McPhee et al., 1995).

Foi demonstrado por Mello-Ivo & Ross (2006) o baixo impacto da colheita seletiva de madeira nas características físicas da camada superficial (0-3 e 4-7 cm) de um Latossolo Amarelo (120 g kg<sup>-1</sup> de areia, 14 g kg<sup>-1</sup> de silte e 866 g kg<sup>-1</sup> de argila) seis meses após o manejo da área. Com o corte das árvores e retirada da madeira, formaram-se diferentes ambientes que caracterizaram os seguintes tratamentos: trilha de trator de esteira usado no arraste das toras, centro de clareira, borda da clareira/floresta, borda da floresta/clareira e floresta remanescente; uma floresta controle também foi avaliada no estudo. As áreas de trilha do trator foram as mais afetadas pela colheita seletiva de madeira, com aumento da densidade do solo e resistência à penetração, e diminuição da macroporosidade e da disponibilidade de água, enquanto as demais classes de perturbação foram menos afetadas e não estabeleceram diferenças significativas para as características físicas do solo em relação à floresta controle.

No entanto, Hom et al. (2004) constataram ser nula a possibilidade de as máquinas utilizadas na colheita florestal não causarem sérios danos estruturais na compactação dos solos, considerando que todas as máquinas utilizadas no estudo, com peso variando de 8,71 a 45 t, causaram impacto em um Cambissolo (aproximadamente 443 g kg<sup>-1</sup> de areia, 283 g kg<sup>-1</sup> de silte e 223 g kg<sup>-1</sup> de argila), atingindo pressões que excederam a pressão

de preconsolidação, resultando em deformações plásticas. Segundo os autores, a única solução funcional que atenderia às exigências da indústria florestal moderna e ao uso sustentável do solo seria estabelecer canais permanentes de tráfego localizados em áreas compactadas que permaneceriam utilizadas durante todas as atividades florestais.

A quantidade de palha sobre a superfície do solo afeta a dissipação da energia de compactação. As menores quantidades de palha foram mais efetivas na dissipação de energia de compactação em um Argissolo Vermelho-Amarelo arênico ( $155 \text{ g kg}^{-1}$  de argila) (Braidá et al., 2006). Nos golpes iniciais do soquete (teste de Proctor), o solo está quase tão susceptível à deformação quanto a palha e, portanto, nesses golpes, a compactação é quase que indiferente à presença da palha, especialmente quando em quantidades muito pequenas. Nos golpes finais o solo está mais compacto, enquanto a palha continua susceptível à deformação, passando a funcionar como um amortecedor entre o soquete que cai e o solo. A quantidade de  $12 \text{ t ha}^{-1}$  de palha de milho dissipou a energia de compactação aplicada por diferentes intensidades de pressão (320,68; 666,85 e  $1.135,61 \text{ kPa}$ ) no ensaio de Proctor alterado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico com aproximadamente  $92 \text{ g kg}^{-1}$  de argila (Brandt, 2005). Segundo o autor, com o aumento do número de golpes, a palha de milho dissipou 2,98, 8,20 e 8,60% da energia aplicada sobre o solo.

Os trabalhos de Brandt (2005) e Braidá et al. (2006) demonstraram a necessidade de manter a superfície do solo com cobertura vegetal para dissipar a energia de compactação. Certamente, essa é apenas uma das vantagens da cobertura vegetal, mas outras podem ser citadas, tais como: dissipação da energia da chuva reduzindo as perdas de solo por erosão (Barcelos et al., 1999; Schäfer et al., 2001; Cassol et al., 2004), aporte de matéria orgânica (Bayer et al., 2004, 2006), ciclagem e disponibilidade de nutrientes (Pavinato et al., 1994; Aita et al., 2001), maior umidade do solo (Costa et al., 2003; Albuquerque et al., 2005) e menor oscilação da temperatura durante o dia (Costa et al., 2003; Silva et al., 2006d). Portanto, a quantidade e a qualidade da cobertura vegetal são fundamentais para obtenção dessas vantagens.

Assim como em áreas agrícolas, a quantidade de palha sobre a superfície do solo pode reduzir a compactação em áreas florestais, os galhos, folhas e cascas podem agir da mesma forma. Os resíduos (galhos, folhas e cascas) da colheita de madeira de eucalipto nas trilhas dentro da floresta servem como elemento atenuante do nível de compactação do solo decorrente do tráfego de máquinas da colheita florestal em um solo com

900 g kg<sup>-1</sup> de areia, 50 g kg<sup>-1</sup> de silte e 50 g kg<sup>-1</sup> de argila (Seixas et al., 1998). A redução média no nível de compactação nos tratamentos com cobertura, avaliado por meio da densidade, foi de 56 % em relação ao tratamento com tráfego em contato direto com o solo.

Cada solo apresenta um comportamento em relação à compactação, principalmente pela sua distribuição do tamanho de partícula e mineralogia. O incremento da matéria orgânica no solo e a manutenção dos resíduos culturais na superfície do solo, além de contribuir para maior atividade biológica e disponibilidade de nutrientes para as plantas, podem minimizar o efeito da compactação. O efeito da matéria orgânica na redução da densidade máxima do solo pelo teste de Proctor Normal foi maior para um Argissolo Vermelho-Amarelo arênico (155 g kg<sup>-1</sup> de argila) do que para um Nitossolo Vermelho distrófico (787 g kg<sup>-1</sup> de argila) (Braidá, 2004). Esse comportamento foi atribuído ao fato de que no solo arenoso o efeito da matéria orgânica em reduzir a atuação da água entre as partículas minerais é maior do que no argiloso. A matéria orgânica ocupa uma área superficial específica variando de 800 a 900 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> (Meurer et al., 2006) e uma capacidade de troca catiônica (CTC) que pode chegar a 1.400 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> (Canellas et al., 1999), com uma capacidade de retenção de água maior que a da areia, cuja área superficial específica é menor que 0,10 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> e a CTC é praticamente nula. Dessa forma, a matéria orgânica acaba retendo uma quantidade maior de água que a areia, ficando a água concentrada próximo às partículas orgânicas, dificultando a formação de películas de água sobre a superfície dos grãos de areia, enquanto, no solo argiloso, as diferenças entre a matéria orgânica e as partículas minerais da fração argila são menores. Além disso, teoricamente, nos solos argilosos, a interação entre fração mineral e orgânica é maior, resultando em menor disponibilidade de matéria orgânica para interagir com a água do solo (Braidá, 2004).

Embora o efeito da matéria orgânica seja favorável para todos os solos, ele é mais pronunciado em solos arenosos. Esses solos são mais susceptíveis à alteração de sua estrutura; contudo, sua recuperação é mais rápida em relação aos solos argilosos. Nesse sentido, a escolha de culturas com grande aporte de material orgânico e que apresentem sistema radicular agressivo e bem distribuído em todo o perfil do solo é fundamental para manutenção da qualidade estrutural do solo e incremento de matéria orgânica em profundidade.

O aumento do teor de matéria orgânica em Argissolo Vermelho-Amarelo arênico (155 g kg<sup>-1</sup> de argila) em Nitossolo Vermelho distrófico (787 g kg<sup>-1</sup> de argila) deslocou a curva de compactação do solo, obtida pelo teste de



Proctor Normal, para maiores valores de umidade e menores valores de densidade, ou seja, houve redução da densidade máxima e aumento da umidade necessária para atingi-la (Braidá, 2004). Quanto mais compactável for o solo, mais efetivo será o efeito da incorporação da matéria orgânica em reduzir a compactabilidade do solo, avaliada por Zhang et al. (1997) em termos de densidade máxima pelo teste de Proctor em três solos: arenoso (855 g kg<sup>-1</sup> de areia, 100 g kg<sup>-1</sup> de silte e 45 g kg<sup>-1</sup> de argila), siltoso (158 g kg<sup>-1</sup> de areia, 663 g kg<sup>-1</sup> de silte e 179 g kg<sup>-1</sup> de argila) e argiloso (125 g kg<sup>-1</sup> de areia, 359 g kg<sup>-1</sup> de silte e 516 g kg<sup>-1</sup> de argila).

A aplicação de herbicida alterou a composição florística da massa da cobertura vegetal em campo natural, reduzindo a massa radicular e o C orgânico de um solo arenoso e, como consequência, aumentando a densidade do solo e diminuindo a estabilidade de agregados (Pérez Gomar et al., 2002). Esse tipo de manejo do campo natural torna o solo mais susceptível à compactação e degradação da sua estrutura, em virtude da redução da cobertura do solo e do aporte de matéria orgânica.

A matéria orgânica e a umidade do solo são componentes que interferem na compactabilidade do solo, bem como no crescimento e desenvolvimento das plantas. Compreender a interação da matéria orgânica, umidade e textura do solo é importante para definir estratégias de manejo do solo, visando boa qualidade do solo e crescimento das plantas.

Na pecuária, o controle do peso dos animais seria uma alternativa para minimizar a compactação, pois o peso do animal é distribuído em uma pequena área, no caso, seu casco. Contudo, em sistemas de pecuária onde se busca aumentar o peso dos animais, essa alternativa seria inviável. Para condições de pisoteio animal, talvez duas medidas preventivas sejam essenciais para evitar compactação: o controle da umidade na entrada de animais na área e manter a superfície do solo com cobertura vegetal, controlando a altura de pastejo. Silva et al. (2000a) constataram que o pisoteio animal apresentou pequeno efeito sobre as características físicas de um Podzólico Vermelho-Amarelo com textura superficial franca. Os autores atribuíram esse pequeno efeito à manutenção de resíduo vegetal na superfície do solo, em torno de 1 t ha<sup>-1</sup> de matéria vegetal seca. Nessas condições, o impacto da pata do animal não ocorre diretamente sobre o solo, mas sobre o resíduo vegetal que amortece a distribuição da pressão da pata do animal no solo. Lima et al. (2004b) verificaram que, em um sistema de pastejo intensivo rotacionado irrigado, a pressão de preconsoidação foi superior do que no sistema não irrigado, mostrando a umidade do solo como determinante na deformação do solo.

É difícil sugerir uma única prática agronômica como solução para o problema de compactação do solo (Hamza & Anderson, 2005). Uma combinação de práticas são sugeridas para mitigar ou retardar o problema, tais como cultivo mínimo ou plantio direto, tráfego controlado, combinação de mais de uma operação simultaneamente, usando a mesma máquina para minimizar o número de passadas, minimizar o tráfego, minimizar a intensidade de pastejo e o número de animais por pastejo, bem como para manter o solo coberto com vegetação, aliviando a compactação do solo usando rotações que incluam plantas com sistema radicular agressivo e profundo capaz de penetrar em camadas compactadas, usar máquinas com baixa carga por eixo e pneus com elevada área de contato para minimizar a pressão no solo. Tais autores acrescentam, ainda, que o aumento do teor de matéria orgânica é importante na redução da densidade do solo prevenindo ou reduzindo a transmissão da compactação para o subsolo de forças externas agindo na superfície do solo, bem como na condução de operações agrícolas e pastejo a uma condição mínima de umidade necessária para realização das operações. Muitas vezes as condições necessárias para evitar a compactação são difíceis de coincidir pois, algumas delas, como a umidade por exemplo, dependem das condições climáticas. É necessário, porém, que haja uma programação e organização das atividades para considerar esses fatores descritos anteriormente, evitando, assim, a compactação, problema complexo e de difícil recuperação.

## RECUPERAÇÃO DE SOLOS COMPACTADOS

A extensão com que o solo compactado recuperará (resiliência) depende do tipo de solo e do grau e da profundidade de compactação. Solos argilosos, que expandem e contraem, podem recuperar-se, pelo menos parcialmente, com o subsequente processo de umedecimento e secagem. A recuperação em solos arenosos é mais lenta (Greacen & Sands, 1980). A ação de organismos como minhocas e besouros e a ação de sistema radicular agressivo podem contribuir para a recuperação de solos compactados, pela formação de poros biológicos e adição de matéria orgânica.

Em uma revisão sobre o efeito do manejo florestal extensivo na produtividade do solo, Grigal (2000) indicou alterações importantes nas propriedades físicas do solo. As propriedades físicas são facilmente alteradas e essas alterações são de duração relativamente longa e de difícil reparo e representam divergências das condições naturais e têm efeitos significativos e negativos na produtividade.

Quando a compactação do solo começa a limitar o crescimento e desenvolvimento das culturas, tomam-se necessárias medidas recuperadoras com o objetivo de romper a camada compactada (Pedrotti & Dias Junior, 1996). Porém, a restauração das condições físicas iniciais do solo, se possível, é de alto custo e consome muito tempo. Segundo os autores, a operação de subsolagem deve ser realizada somente quando realmente necessária e em condições adequadas de umidade e profundidade, por ser uma operação de alto consumo energético, talvez o maior dentre as operações de preparo do solo.

A escarificação é uma forma rápida e eficiente de romper camadas compactadas. Porém, é importante que ela seja bem feita, considerando a umidade do solo no momento da escarificação, profundidade de atuação do implemento e espaçamento entre as hastas. Mas, antes disso, averiguar se há necessidade de tal operação, pois exige potência do trator e gastos financeiros, há destruição da estrutura do solo e deixa o solo semidescoberto, deixando-o à ação do impacto das gotas de chuva, que pode levar à erosão do solo. É importante considerar que cada solo responde de uma forma à escarificação, bem como o efeito de reconsolidação do solo depende, além do solo, dos fatores mencionados anteriormente.

Se a umidade do solo no momento da subsolagem for ideal para tal operação, Beltrame & Taylor (1980b) afirmam que a duração do efeito da subsolagem será por três ou quatro anos em solos argilosos sob preparo convencional. Contudo, em solo sob sistema plantio direto, esse tempo é menor (Rosa, 2007). Sistemas de manejo que apresentaram revolvimento do solo foram mais susceptíveis à compactação e apresentaram menor pressão de preconsolidação (Suzuki, 2005). Isso quer dizer que, embora o revolvimento do solo elimine a camada compactada reduzindo a densidade, ele torna o solo mais susceptível à compactação, fato atribuído ao maior espaço de vazios e, conseqüentemente, ao menor número de pontos de contato entre as partículas sólidas, resultando em menor atrito ao deslocamento e rearranjo das partículas do solo (Silva et al., 2002a).

A escarificação do solo aumenta sua condutividade hidráulica, graças à alteração de sua estrutura e incremento da macroporosidade, mas apenas na camada de revolvimento do solo, pois na camada onde a haste do escarificador não alcança, a condutividade é reduzida (Silva, 2003). O efeito da escarificação mecânica na melhoria da estrutura do solo pode ser apenas temporário. Lima et al. (2006a), analisando um Argissolo Vermelho distrófico arênico, verificaram que o solo apresentou rápida acomodação das partículas, mostrando efeito positivo da escarificação

na produtividade do feijoeiro cultivado no verão apenas no primeiro ano da escarificação. O rompimento da camada compactada de Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico franco-argilo-arenoso foi temporário, havendo um aumento da densidade na camada arável em menos de nove meses após o preparo com uma aração com arado de aiveca e duas gradagens com grade niveladora (Alves et al., 2005). Apenas um evento de tráfego do eixo dianteiro (peso de 5 t) de uma colhedora sobre um Latossolo Vermelho-Escuro provocou aumento da resistência à penetração para níveis semelhantes ao que estava antes da escarificação (Silva et al., 2000c). Pela avaliação no campo da condutividade hidráulica do solo saturado com um infiltrômetro multi disco, Tavares-Filho et al. (2006) constataram que a condutividade em área escarificada ( $129,6 \text{ mm h}^{-1}$ ) foi 1,67 vez maior que no plantio direto há 20 anos ( $77,4 \text{ mm h}^{-1}$ ) em um Latossolo Vermelho distroférrico de textura muito argilosa (130 g  $\text{kg}^{-1}$  de areia, 160 de silte e 710 de argila). Porém, após um ano da escarificação, a condutividade foi reduzida ( $94,7 \text{ mm h}^{-1}$ ), indicando rápida consolidação do solo. Considerando ser a escarificação uma operação de custo relativamente alto em consequência da potência requerida, os autores sugeriram fazer um estudo minucioso de custo/benefício antes de se pensar nesta operação para resolver supostos problemas de compactação em áreas de plantio direto, concluindo que sistemas que incluam a rotação de culturas e a adoção de culturas de cobertura devem ser a primeira opção em áreas de plantio direto.

O efeito da escarificação na redução da densidade do solo desapareceu após 60 dias em um Latossolo Vermelho com  $607 \text{ g kg}^{-1}$  de argila e ainda causou redução da produtividade em 4 % para o feijoeiro e 6,5 % para o trigo (Collares, 2005). Camara & Klein (2005a) verificaram, em um Latossolo Vermelho distrófico típico com  $610 \text{ g kg}^{-1}$  de argila, que seis meses após a escarificação de uma área sob plantio direto há seis anos a densidade do solo foi 3,72 % menor no escarificado em relação ao plantio direto. Contudo, a porosidade total e macroporosidade não apresentaram diferença significativa entre esses manejos. A taxa inicial e a final de infiltração de água no solo, avaliadas com anéis concêntricos, foram, respectivamente, 2,2 e 3,8 vezes maiores no escarificado em relação ao plantio direto, mas essa diferença não foi significativa. Nessas mesmas condições experimentais, Camara & Klein (2005b) não obtiveram diferença significativa entre plantio direto e área escarificada para altura de plantas, massa de 1.000 grãos, número de vagens por planta, número de grãos por vagem e produtividade de grãos de soja. Os autores atribuíram essa semelhança entre os manejos do solo à precipitação pluvial de 999,8 mm durante o ciclo

da cultura (132 dias), contribuindo para manter a umidade do solo nas condições ideais e minimizando o efeito da compactação.

O uso do solo no sistema plantio direto por um período de quatro anos após o revolvimento foi suficiente para o retorno dos atributos físicos do solo à semelhança ao plantio direto há oito e doze anos em um Argissolo Vermelho distrófico típico de textura franco-argilo-arenosa (Marcolan & Anghinoni, 2006). Embora os atributos físicos tenham apresentado maior uniformidade no preparo convencional, com tendência de melhoria na porosidade, houve menor estabilidade de agregados na camada superficial, que foi relacionada com o menor teor de C orgânico. Os diferentes sistemas de manejo não influenciaram significativamente a produtividade do milho.

A densidade do solo e a condutividade hidráulica do solo saturado avaliada no campo pelo permeâmetro de Guelph foram similares entre o solo escarificado e não mobilizado em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico (Abreu et al., 2004). Os autores atribuíram esse fato ao processo de reconsolidação do solo, ocorrido 4,5 meses entre a mecanização e a determinação da densidade.

A médio prazo, Abreu et al. (2004) verificaram, pela condutividade hidráulica do solo saturado avaliada no campo pelo permeâmetro de Guelph, que a “escarificação biológica” (cultivo mínimo de crotalaria) foi mais eficaz na criação de poros condutores de água, enquanto pela resistência à penetração, a escarificação mecânica do Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico foi mais eficiente na ruptura da camada compactada.

Pelos resultados já apresentados sobre o efeito da escarificação no rompimento de camadas compactadas, nota-se que esse efeito na redução da densidade e aumento da porosidade, principalmente macroporosidade, parece efetivo. Contudo, essa melhoria é apenas temporária, sendo esse tempo variável entre os solos. O efeito da escarificação na perda da estrutura e matéria orgânica do solo, o aumento da susceptibilidade do solo à compactação e erosão são algumas variáveis que devem ser consideradas nesse tipo de manejo. Além disso, a escarificação não mostra ter efeito tão significativo na condutividade e infiltração de água. Ação biológica na redução dos efeitos da compactação, como o uso de plantas de cobertura e rotação de culturas, parece ter efeito benéfico a médio e longo prazo, não sendo tal efeito detectável pelas avaliações rotineiras das propriedades físicas do solo como a resistência à penetração. Uma alternativa para detectar os poros biológicos seria a micromorfologia do solo, como utilizada por Lima et al. (2005).

A inclusão do guandu-anão na rotação de culturas não mostrou evidências claras no aumento dos poros biológicos após morte e decomposição do sistema radicular em um Latossolo Vermelho distroférrico típico (680 g kg<sup>-1</sup> de argila) (Genro Junior, 2002). O autor afirma que este aumento é difícil de ser detectado, pois o incremento absoluto é relativamente pequeno e o benefício em infiltração de água e aeração é grande. Contudo, ele observou tendência de redução da resistência do solo e aumento da condutividade hidráulica após a inclusão do guandu nos esquemas de rotação de culturas. A introdução de plantas de cobertura de verão, com destaque para a mucuna cinza, intercaladas com o milho em sistema de preparo reduzido do solo, foi benéfica para a estrutura do solo, aumentando a macroporosidade, a porosidade total e a condutividade hidráulica saturada e reduzindo a densidade do solo (Argenton et al., 2005).

A rotação de culturas diminuiu a densidade e aumentou a porosidade total de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico de textura argilosa, quando comparada à sucessão trigo/soja, indicando efeito benéfico dessa prática agrícola sobre a estrutura do solo (Albuquerque et al., 1995). A introdução de plantas de cobertura de inverno, antecedendo a cultura do milho em plantio direto, melhorou a estabilidade estrutural do solo, quando comparado ao pousio invernal em um Podzólico Vermelho-Amarelo (Campos et al., 1999). A aveia preta (gramínea) aumentou o diâmetro médio geométrico dos agregados durante o ciclo vegetativo das plantas de cobertura de inverno, enquanto o tremoço azul (leguminosa) incrementou a estabilidade do solo após o manejo das plantas de cobertura e semeadura do milho. O sistema radicular da gramínea e a taxa de decomposição da leguminosa podem ter criado um ambiente favorável à agregação, pela ação de raízes, cobertura do solo, fornecimento de material orgânico e conservação da umidade, favoráveis à ação de microrganismos. Efeito benéfico da rotação de culturas no aumento da agregação de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico textura argilosa também foi observado por Campos et al. (1995), que foi atribuída à alternância no tipo e tamanho de raízes e material orgânico liberado, além da proteção oferecida à superfície do solo.

Em termos de crescimento da parte aérea de culturas cultivadas em vaso (soja, guandu, guandu-anão, mucuna preta, labe labe e crotalaria júncea), a mucuna preta e o labe labe foram sensíveis ao aumento da compactação subsuperficial de um Nitossolo eutrófico de textura muito argilosa (110 g kg<sup>-1</sup> de areia, 190 g kg<sup>-1</sup> de silte e 700 g kg<sup>-1</sup> de argila)

(Foloni et al., 2006). O impedimento físico em subsuperfície não diminuiu a produção total de raízes da maioria das espécies estudadas, no entanto, a distribuição do sistema radicular ao longo do perfil do solo foi alterada. O sistema radicular mais tolerante à impedância mecânica do solo foi o da mucuna-preta, mas as raízes da crotalária júncea apresentaram potencial de formação de bioporos, com crescimento de raízes dentro da camada de solo compactado.

A colza, pela sua grande densidade de raízes secundárias e pivotantes com capacidade de penetrar em camadas de solo compactadas, e o tremoço, pela sua raiz pivotante capaz de penetrar em solos compactados, fixar  $N_2$  e apresentar baixa relação C/N, acelerando a decomposição do sistema radicular após o fim do ciclo da planta, apresentaram bom potencial para recuperação de solos fisicamente degradados (Cintra & Mielniczuk, 1983).

Avaliando a eficiência de plantas de cobertura de inverno (canola, rabanete, rabanete forrageiro e centeio) em aliviar a compactação de dois solos siltosos para a cultura da soja, Williams & Weil (2004) observaram que as raízes da soja cresceram nos canais deixados pela decomposição das plantas de cobertura. A maior produtividade da soja em resposta às plantas de cobertura foi mais pronunciada no local onde houve condições mais severas de seca e o solo estava mais compactado.

A importância dos bioporos para o crescimento das plantas também foi demonstrada por Silva et al. (2004a). Comparando os sistemas plantio direto e convencional, os autores notaram que sob condições inadequadas, como elevada resistência do solo à penetração e baixa porosidade de aeração, a resposta do milho, avaliada pela sua altura, foi maior no plantio direto, fato atribuído à presença de bioporos. Costa et al. (2003) atribuíram melhoria da qualidade física do solo em subsuperfície à atividade da fauna edáfica e de raízes, atuando na formação de bioporos.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O solo desempenha papel importante no crescimento e desenvolvimento de espécies produtoras de grãos, florestais, anuais, perenes e pastagens. Ele fornece água e nutrientes para as plantas, é um meio de crescimento para as raízes e suporta fisicamente máquinas e equipamentos utilizados no plantio, colheita, manejo e outras operações.

Manter a produtividade do solo é fundamental para a sustentabilidade dos agroecossistemas. O planejamento das atividades e a prevenção dos impactos negativos no solo é mais desejável do que corrigi-los, visto que a correção requer custo elevado e pode não ser efetiva. O conhecimento do solo e a avaliação de suas condições são fundamentais para o planejamento das atividades a serem realizadas na área, desde a implantação até à colheita das culturas.

Algumas questões em relação à compactação do solo parecem ter sido respondidas pela pesquisa. Contudo, outras ainda estão sem resposta. Sabe-se que a compactação tem efeito negativo, tanto nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, no meio ambiente e no crescimento e desenvolvimento das culturas, mas um solo sem estrutura também não é favorável às características supracitadas. Um nível de compactação intermediário é desejável, tanto para a qualidade do solo e ambiente quanto para as plantas.

Valores críticos ou restritivos de resistência do solo à penetração é um campo em aberto à pesquisa, necessitando de estudos realizados principalmente no campo, considerando as condições climáticas e bioporosidade do solo. O efeito da compactação no ambiente ainda é muito incipiente, requerendo mais estudos nessa área.

É importante que os valores críticos ou limitantes de propriedades físicas, hídricas e mecânicas do solo estejam interligados com a função ambiental e crescimento e desenvolvimento de plantas. Em termos de monitoramento e avaliação do meio ambiente ou agroecossistemas, é importante que os valores críticos influam primeiramente nas plantas, pois elas seriam os indicadores mais visíveis e sensíveis de que alguma função do solo estaria sendo afetada e, dessa forma, decisões poderiam ser tomadas antes que o meio ambiente ou agroecossistemas fossem prejudicados. A densidade crítica obtida a partir de dados de intervalo hídrico ótimo pode ser indicativa de alerta de que medidas preventivas ou recuperadoras devem ser tomadas para que a densidade não alcance valores maiores, tornando-se restritiva às plantas.

O efeito benéfico da escarificação no rompimento de camadas compactadas é apenas temporário e variável de solo para solo, sendo o uso de plantas de cobertura com sistema radicular agressivo o mais indicado para o rompimento de camadas compactadas. Plantas de cobertura, tanto para o cultivo de inverno como de verão, que apresentem grande aporte de biomassa, disponibilize nutrientes e penetre em camadas compactadas devem ser estudadas, principalmente no campo.



## LITERATURA CITADA

- ABREU, S.L.; REICHERT, J.M. & REINERT, D.J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 28:519-531, 2004.
- AITA, C.; BASSO, C.J.; CERETTA, C.A.; GONÇALVES, C.N. & ROS, C.O. Plantas de cobertura de solo como fonte de nitrogênio ao milho. R. Bras. Ci. Solo, 25:157-165, 2001.
- ALAKUKU, 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 Till. Res., 73:145-160, 2003.
- ALBUQUERQUE, J.A.; MAFRA, A.L.; FONTOURA, S.M.V.; BAYER, C. & PASSOS, J.F.M. Avaliação de sistemas de preparo e calagem em um Latossolo Bruno aluminico. R. Bras. Ci. Solo, 29:963-975, 2005.
- ALBUQUERQUE, J.A.; REINERT, D.J. & FIORIN, J.E. Variação temporal da estabilidade estrutural em Podzólico Vermelho-Amarelo. Ci. Rural, 24:275-280, 1994.
- ALBUQUERQUE, J.A.; REINERT, D.J.; FIORIN, J.E.; RUEDELL, J. & PETRERE, C. & FONTINELLI, F. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: Efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. R. Bras. Ci. Solo, 19:115-119, 1995.
- ALBUQUERQUE, J.A.; SANGOI, L. & ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. R. Bras. Ci. Solo, 25:717-723, 2001.
- ALEXANDROU, A. & EARL, R. The relationship among the pre-compression stress, volumetric water content and initial dry bulk density of soil. J. Agric. Eng. Res., 71:75-80, 1998.
- ALVES, M.C. & SUZUKI, L.E.A.S. Influência de diferentes sistemas de manejo do solo na recuperação de suas propriedades físicas. Acta Sci., 26:27-34, 2004.
- ALVES, M.C.; SUZUKI, L.E.A.S.; HIPÓLITO, J.L. & CASTILHO, S.R. Propriedades físicas e infiltração de água de um Latossolo Vermelho Amarelo (Oxisol) do noroeste do estado de São Paulo, Brasil, sob três condições de uso e manejo. Cad. Lab. Xeológico Laxe, 30:167-180, 2005.
- ANDRADE, S.C.; SOUZA, A.P.; SILVA, E.; NASCIMENTO, A.G.; MACHADO, C.C.; LEITE, H.G. & MINETTI, L.J. Análise dos efeitos da compactação do solo sobre a regeneração das cepas de eucalipto. R. Árvore, 24:261-268, 2000.
- ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C. & WILDNER, L.P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. R. Bras. Ci. Solo, 29:425-535, 2005.
- ARVIDSSON, J. & HAKANSSON, I. A model for estimating crop yield losses caused by soil compaction. Soil Till. Res., 20:319-332, 1991.
- BARCELOS, A.A.; CASSOL, E.A. & DENARDIN, J.E. Infiltração de água em um Latossolo Vermelho-Escuro sob condições de chuva intensa em diferentes sistemas de manejo. R. Bras. Ci. Solo, 23:35-43, 1999.
- BARRETO RIQUELME, U.F. Propriedades físicas e hídricas do solo em sistemas de manejo do feijoeiro. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2004. 78p. (Tese de Mestrado)
- Tópicos Ci. Solo, 5:49-134, 2007

- BAUDER, J.W.; RANDAL, G.W. & SWANN, J.B. Effect of four continuous systems on mechanical impedance of a clay loam soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 4:802-806, 1981.
- BAVER, L. D. Practical values from physical analyses of soils. *Soil Sci.*, 68:1-13, 1949.
- BAYER, C.; MARTIN NETO, L.; MIELNICZUK, J. & PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. *Pesq. Agropec. Bras.*, 39:677-683, 2004.
- BAYER, C.; MARTIN NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. & DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. *Soil Till. Res.*, 86:237-245, 2006.
- BELTRAME, L.F.S.; GONDIM, L.A.P. & TAYLOR, J.C. Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul. *R. Bras. Ci. Solo*, 5:145-149, 1981.
- BELTRAME, L.F.S. & TAYLOR, J.C. Causas e efeitos da compactação do solo. *Lav Arrozreira*, 32:59-62, 1980a.
- BELTRAME, L.F.S. & TAYLOR, J.C. Porque, quando e como utilizar a subsolagem. *Lav Arrozreira*, 33:34-44, 1980b.
- BENJAMIN, J.G.; NIELSEN, D.C. & VIGIL, M.F. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. *Geoderma*, 116:137-148, 2003.
- BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J. & ZOLDAN JUNIOR, W.A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:155-163, 2004.
- BERVALD, C.M.P. Tecnologia mecanizada em preparo de áreas sem queima no nordeste paraense. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2005. 107p. (Tese de Mestrado)
- BETZ, C.L.; ALLMARAS, R.R.; COPELAND, S.M. & RANDALL, G.W. Least limiting water range: Traffic and long-term tillage influences in a Webster soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62:1384-1393, 1998.
- BEUTLER, A.N. & CENTURION, J.F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. *Pesq. Agropec. Bras.*, 39:581-588, 2004a.
- BEUTLER, A.N. & CENTURION, J.F. Resistência à penetração em latossolos: Valor limitante à produtividade de arroz de sequeiro. *Ci. Rural*, 34:1793-1800, 2004b.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C. & SILVA, A.P. Efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em Latossolo Vermelho. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:787-794, 2006.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. & SILVA, A.P. Intervalo hídrico ótimo e a produção de soja e arroz em dois Latossolos. *Irriga*, 9:181-192, 2004a.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P.; ROQUE, C.G. & FERRAZ, M.V. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. *Pesq. Agropec. Bras.*, 39:575-580, 2004b.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G. & FERRAZ, M.V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:843-849, 2005.

- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G. & SOUZA, Z.M. Influência da compactação e do cultivo de soja nos atributos físicos e na condutividade hidráulica em Latossolo Vermelho. *Ir riga*, 8:242-249, 2003.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SOUZA, Z.M. & SILVA, L.M. Utilização dos penetrômetros de impacto e de anel dinamométrico em Latossolos. *Eng. Agríc.*, 22:191-199, 2002.
- BICKI, T.J. & SIEMENS, J.C. Crop responses to wheel traffic soil compaction. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 34:909-913, 1991.
- BOONE, F.R. & VEEN, B.W. Mechanisms of crop responses to soil compaction. In: SOANE, B.D. & van OUWERKWRK, C. *Soil compaction in crop production*. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.237-264.
- BRAIDA, J.A. *Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto*. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2004. 106p. (Tese de Doutorado)
- BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M. & REINERT, D.J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:605-614, 2006.
- BRANDT, A.A. *Propriedades mecânicas de solo franco arenoso sob distintos sistemas de preparo, tráfego mecanizado e resíduos vegetais*. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2005. 89p. (Tese de Mestrado)
- BRAUNACK, M.V. & McGARRY, D. Traffic control and tillage strategies for harvesting and planting of sugarcane (*Saccharum officinarum*) in Australia. *Soil Till. Res.*, 86-102, 2006.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 3:519-524, 1990.
- BUSSCHER, W.J.; BAUER, P.J.; CAMP, C.R. & SOJKA, R.E. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. *Soil Till. Res.*, 43:205-217, 1997.
- CAMARA, R.K. & KLEIN, V.A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:789-796, 2005a.
- CAMARA, R.K. & KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. *Ci. Rural*, 35:813-819, 2005b.
- CAMARGO, O.A. & ALLEONI, L.R.F. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. Piracicaba, Degaspari, 1997. 132p.
- CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICOLODI, R. & CASSOL, L.C. Dinâmica da agregação induzida pelo uso de plantas de inverno para cobertura do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:383-391, 1999.
- CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICOLODI, R.; RUEDELL, J. & PETRERE, C. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 19:121-126, 1995.
- CANARACHE, A. Penetr - a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. *Soil Till. Res.*, 16:51-70, 1990.
- CANARACHE, A. Factors and indices regarding excessive compactness of agricultural soils. *Soil Till. Res.*, 19:145-164, 1991.
- CANARACHE, A.; HORN, R. & COLIBAS, I. Compressibility of soils in a long term field experiment with intensive deep ripping in Romania. *Soil Till. Res.*, 56:185-196, 2000.
- Tópicos *Ci. Solo*, 5:49-134, 2007

- CANELLAS, L.P.; SANTOS, G.A. & AMARAL, N.M.B. Reações da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O., eds. Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre, Gênese, 1999. p.69-90.
- CAR PENEDO, V. & MILENICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolo Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. R. Bras. Ci. Solo, 14:99-105, 1990.
- CARTER, M.R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. Can. J. Soil Sci., 70:425-433, 1990.
- CASSOL, E.A.; CANTALICE, J.R.B.; REICHERT, J.M. & MONDARDO, A. Escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo franco argilo arenoso com resíduos vegetais. Pesq. Agropec. Bras., 39:685-690, 2004.
- CAVENAGE, A.; MORAES, M.L.T.; ALVES, M.C.; CARVALHO, M.A.C.; FREITAS, M.L.M. & BUZETTI, S. Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes culturas. R. Bras. Ci. Solo, 23:997-1003, 1999.
- CENTURION, J.F. & DEMATTÊ, J.L.I. Sistemas de preparo de solos de cerrado: Efeitos nas propriedades físicas e na cultura do milho. Pesq. Agropec. Bras., 27:315-324, 1992.
- CHAMEN, W.C.T.; ALAKUKU, L.; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G.; TIJINK, F.G.J. & WEISSKOPF, P. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review. Part 2. Equipment and field practices. Soil Till. Res., 73:161-174, 2003.
- CHAN, K.Y.; OATES, A.; SWAN, A.D.; HAYES, H.C.; DEAR, B.S. & PEOPLES, M.B. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. Soil Till Res., 89:13-21, 2006.
- CINTRA, F.L.D. & MIELNICZUCK, J. Potencial de algumas espécies vegetais para a recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. R. Bras. Ci. Solo, 7:197-201, 1983.
- CINTRA, F.L.D.; MIELNICZUCK, J. & SCOPEL, I. Caracterização do impedimento mecânico em um Latossolo Roxo do Rio Grande do Sul. R. Bras. Ci. Solo, 7:323-327, 1983.
- COLLARES, G.L. Compactação em Latossolos e Argissolo e relação com parâmetros de solo e de plantas. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2005. 106p. (Tese de Doutorado)
- COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & KAISER, D.R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. Pesq. Agropec. Bras., 41:1663-1674, 2006.
- CORCINI, A.L.M.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; ROMERO, R.D.; GALLARETTA, C.G. & PREVEDELLO, J. Fluxo de água e ar do solo em sistemas de cultivo de cebola em solos vérticos no Uruguai. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., Gramado, 2007. Anais. Gramado, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. CD-ROM
- COSTA, F.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V. & WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. R. Bras. Ci. Solo, 27:527-535, 2003.
- CURI, N.; LARACH, J.O.I.; KÄMPF, N.; MONIZ, A.C. & FONTES, L.E.F. Vocabulário da ciência do solo. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993. 90p.

- DEFOSSEZ, P. & RICHARD, G. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. *Soil Till. Res.*, 67:41-64, 2002.
- DE MARIA, I.C.; CASTRO, O.M. & SOUZA DIAS, H. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:703-709, 1999.
- DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A. & DENARDIN, N.D. Considerações sobre adensamento e compactação em manejo de Latossolos. In: CINTRA, F.L.D.; ANJOS, J.L. & IVO, W.M.P.M., eds. WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, Aracaju, 2001. Anais. Aracaju, Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p.317-325.
- DIAS JUNIOR, M.S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.55-94.
- DIAS JUNIOR, M.S.; GOMES, A.N.; ANDRADE, S.C. & AZEVEDO, M.R. Avaliação da sustentabilidade da estrutura de Argissolos em sistemas florestais. *Cerne*, 8:103-114, 2002.
- DIAS JUNIOR, M.S.; LEITE, F.P.; WINTER, M.E. & PIRES, J.V.G. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com eucalipto na região de Peçanha-MG. *R. Árvore*, 27:343-349, 2003.
- DIAS JUNIOR, M.S. & PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:175-182, 1996.
- DIAS JUNIOR, M.S.; SILVA, A.R.; FONSECA, S. & LEITE, F.P. Método alternativo de avaliação da pressão de preconsolidação por meio de um penetrômetro. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:805-810, 2004.
- ELRICK, D.; REYNOLDS, W.; BAUMGARTNER, K.; TAN, K. & BRADSHAW, K. In-situ measurements of hydraulic properties of soils using the Guelph permeameter and the Guelph infiltrometer. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON LAND DRAINAGE, 3., Columbus, 1987. Proceedings. Columbus, Ohio State University, 1987. p.G13-G23.
- FERNANDES, H.C. & SOUZA, A.P. Compactação de solos florestais: uma questão para estudo. *R. Árvore*, 25:387-392, 2001.
- FERNANDES, H.C. & SOUZA, A.P. Compactação de um Latossolo Vermelho causada pelo tráfego do "Forwarder". *R. Árvore*, 27:279-284, 2003.
- FERNANDES, H.C. & VITÓRIA, E.L. Avaliação dos níveis de compactação de um solo florestal em relação à trafegabilidade das máquinas. *R. Árvore*, 22:521-526, 1998.
- FOLONI, J.S.S.; LIMA, S.L. & BÜL, L.T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:49-57, 2006.
- GENRO JUNIOR., S.A. Alteração da compactação do solo com o uso de rotação de culturas no sistema plantio direto. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2002. 90p. (Tese de Mestrado)
- GENRO JUNIOR, S.A.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:477-484, 2004.
- GERARD, C.J.; SEXTON, P. & SHAW, G. Physical factors influencing soil strength and root growth. *Agron. J.*, 74:875-879, 1982.
- GOMES, A.S.; PATELLA, J.F. & PAULLETO, E.A. Efeitos de sistemas e tempo de cultivo sobre a estrutura de um solo Podzólico Vermelho Amarelo. *R. Bras. Ci. Solo*, 2:17-21, 1978.
- Tópicos Ci. Solo, 5:49-134, 2007

- GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V. & SILVA, A.P. Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em área irrigada por pivô central. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:155-164, 1999.
- GRABLE, A.R. & SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 32:180-186, 1968.
- GREACEN, E.L. & SANDS, R. Compaction of forest soils: A review. *Aust. J. Soil Res.*, 18:163-169, 1980.
- GRIGAL, D.F. Effects of extensive forest management on soil productivity. *Soil Till. Res.*, 138:167-185, 2000.
- GUIMARÃES, C.M.; STONE, L.F. & MOREIRA, J.A.A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. II: Efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, 6:213-218, 2002.
- GUPTA, S.C. & ALLMARAS, R.R. Models to access the susceptibility of soil to excessive compaction. *Adv. Soil Sci.*, 6:65-100, 1987.
- GUROVICH, L.A. Field spatial variability structure of soil hydrodynamic properties. *Ci. Invest. Agr.*, 9:243-254, 1982.
- HADAS, A. Soil compaction caused by high axle loads - Review of concepts and experimental data. *Soil Till. Res.*, 29:253-276, 1994.
- HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil Till. Res.*, 16:105-120, 1990.
- HÅKANSSON, I.; van OUWERKERK, C. & SOANE, B.D. Conclusions of the ISTRO Workshop on "The effects of soil compaction on physical, chemical and biological factors in the environment", 25 August 1993, Melitopol, Ukraine. *Soil Till. Res.*, 35:111-113, 1995.
- HÅKANSSON, I.; VOORHEES, W.B. & RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. *Soil Till. Res.*, 11:239-282, 1988.
- HAMZA, M.A. & ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Till. Res.*, 82:121-145, 2005.
- HILLEL, D. *Environmental soil physics*. San Diego, Academic Press, 1998. 771p.
- HODGSON, A.S. & MacLEOD, D.A. Use of oxygen flux density to estimate critical air-filled porosity of a Vertisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53:355-361, 1989.
- HOLTZ, R.D. & KOVACS, W.D. *An introduction to geotechnical engineering*. New Jersey, Prentice-Hall, 1981. 733p.
- HORN, R. Stress-strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. *Geoderma*, 116:77-88, 2003.
- HORN, R.; DOMZAL, H.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A. & van OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil Till. Res.*, 35:23-36, 1995.
- HORN, R. & FLEIGE, H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. *Soil Till. Res.*, 73:89-99, 2003.
- Tópicos *Ci. Solo*, 5:49-134, 2007

- HORN, R. & LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C., eds. Soil compaction in crop production. Amsterdam, Elsevier, 1994. p.45-69.
- HORN, R.; van den AKKER, J.J.H. & ARVIDSSON, J.,eds. Subsoil compaction: Distribution, processes and consequences. Reiskirchen, Catena Verlag, 2000. 462p. (Advances in Geocology, 32).
- HORN, R.; VOSSBRINK, J. & BECKER, S. Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. Soil Till. Res., 79:207-219, 2004.
- IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JUNIOR, M.S. & TORMENA, C.A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. R. Bras. Ci. Solo, 25:11-18, 2001.
- KIEHL, E. J. Manual de edafologia: Relação solo-água-planta. São Paulo, Agronômica Ceres, 1979. 262p.
- KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo Roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1998. 150p. (Tese de Doutorado)
- KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. & SILVA, A.P. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. Eng. Agríc., 18:45-54, 1998.
- LABOSKI, C.A.M.; DOWDY, R.H.; ALLMARAS, R.R. & LAMB, J.A. Soil strength and water content influences on corn root distribution in a sandy soil. Plant Soil, 203:239-247, 1998.
- LAL, R. Soil compaction and tillage effects on soil physical properties of a mollic ochraqualf in northwest Ohio. J. Sust. Agric., 14:53-65, 1999.
- LANZANOVA, M.E. Atributos físicos do solo em sistemas de culturas sob plantio direto na integração lavoura-pecuária. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2005. 125p. (Tese de Mestrado)
- LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S. & EUCLIDES, V.P.B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. R. Bras. Ci. Solo, 28:415-423, 2004.
- LEBERT, M. & HORN, R.A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. Soil Till. Res., 19:275-286, 1991.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. Adv Soil Sci., 1:277-294, 1985.
- LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no solo. São Paulo, Universidade de São Paulo, 2005. 335p.
- LIBARDI, P.L.; MANFRON, P.A.; MORAES, S.O. & TUON, R.L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. R. Bras. Ci. Solo, 20:1-12, 1996.
- LIMA, H.V.; LIMA, C.L.R.; LEÃO, T.P.; COOPER, M.; SILVA, A.P. & ROMERO, R.E. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em áreas sob pomar de laranja. R. Bras. Ci. Solo, 29:677-684, 2005.
- LIMA, C.L.R.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; SUZUKI, L.E.A.S. & DALBIANCO, L. Densidade crítica ao crescimento de plantas considerando água disponível e resistência à penetração de um Argissolo Vermelho distrófico arênico. Ci. Rural, 37:1166-1169, 2007.

- LIMA, C.L.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S. & GUBIANI, P.I. Qualidade físico-hídrica e rendimento de soja (*Glycine max L.*) e feijão (*Phaseolus vulgaris L.*) de um Argissolo Vermelho distrófico sob diferentes sistemas de manejo. *Ci. Rural*, 36:1172-1178, 2006a.
- LIMA, C.L.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & SUZUKI, L.E.A.S. Compressibilidade de um Argissolo sob plantio direto escarificado e compactado. *Ci. Rural*, 36:1765-1772, 2006b.
- LIMA, C.L.R.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; LIMA, H.V. & LEÃO, T.P. Heterogeneidade da compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob pomar de laranja. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:409-414, 2004a.
- LIMA, C.L.R.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S. & LEÃO, T.P. Compressibilidade de um solo sob sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não irrigado. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:945-951, 2004b.
- LIMA, C.L.R.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S. & LEÃO, T.P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:217-223, 2006c.
- LIPIEC, J.; ARVIDSSON, J. & MURER, E. Review of modelling crop growth, movement of water and chemicals in relation to topsoil and subsoil compaction. *Soil Till. Res.*, 73:15-29, 2003.
- LIPIEC, J.; HÅKANSSON, I.; TARKIEWICZ, S. & KOSSOWSKI, J. Soil physical properties and growth of spring barley related to the degree of compactness of two soils. *Soil Till. Res.*, 19:307-317, 1991.
- LIPIEC, J. & HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, 116:107-136, 2003.
- LIPIEC, J. & SIMOTA, C. Role of soil and climate factors in influencing crop responses to soil compaction in Central and Eastern Europe. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C., eds. *Soil compaction in crop production*. Amsterdam, Elsevier, 1994. p.365-390.
- LIPIEC, L. & STEPNIIEWSKI, W. Effects of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients. *Soil Till. Res.*, 35:37-52, 1995.
- LOPES, S.E.; FERNANDES, H.C.; VIEIRA, L.B.; MACHADO, C.C. & RINALDI, P.C.N. Compactação de um solo de uso florestal submetido ao tráfego de arraste de madeira. *R. Árvore*, 30:369-376, 2006.
- LOWERY, B. & MORRISON, J.E. Soil penetrometers and penetrability. In: DANE, J.H. & TOPP, C., eds. *Methods of soil analysis: Part 4 - Physical methods*. Madison, Soil Science Society of America, 2002. p.363-388.
- MARCOLAN, A.L. & ANGHINONI, I. Atributos físicos de um Argissolo e rendimento de culturas de acordo com o revolvimento do solo em plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:163-170, 2006.
- MARCOLIN, C.D. Propriedades físicas de Nitossolo e Latossolos argilosos sob plantio direto. Passo Fundo, Universidade de Passo Fundo, 2006. 110p. (Tese de Mestrado)
- MARTINO, D. & SHAYKEWICH, C.F. Root penetration profiles of wheat and barley as affected by soil penetration resistance in field conditions. *Can. J. Soil Sci.*, 74:193-200, 1994.
- McPHEE, J.E.; BRAUNACK, M.V.; GARSIDE, A.L.; REID, D.J. & HILTON, D.J. Controlled traffic for irrigated double cropping in a semi-arid tropical environment: Part 2, Tillage operations and energy use. *J. Agric. Eng. Res.*, 60:183-189, 1995.



- MELLO-IVO, W.M.P. & ROSS, S. Efeito da colheita seletiva de madeira sobre algumas características físicas de um Latossolo Amarelo sob floresta na Amazônia central. R. Bras. Ci. Solo, 30:769-776, 2006.
- MEROTO Jr., A. & MUNDSTOCK, C.M. Wheat root growth as affected by soil strength. R. Bras. Ci. Solo, 23:197-202, 1999.
- MESQUITA, M.G.B.F. & MORAES, S.O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. Ci. Rural, 34:963-969, 2004.
- MEURER, E.J.; RHEINHEIMER, D. & BISSANI, C.A. Fenômeno de sorção em solos. In: MEURER, E.J., ed. Fundamentos de química do solo. 3.ed. Porto Alegre, Evagraf, 2006. p.117-162.
- MOSADDEGHI, M.R.; HEMMAT, A.; HAJABBASI, M.A. & ALEXANDROU, A. Pre-compression stress and its relation with the physical and mechanical properties of a structurally unstable soil in Central Iran. Soil Till. Res., 70:53-64, 2003.
- MOSADDEGHI, M.R.; HEMMAT, A.; HAJABBASI, M.A.; VAFAEIAN, M. & ALEXANDROU, A. Plate sinkage versus confined compression tests for in situ soil compressibility studies. Bios. Eng., 93:325-334, 2006.
- MÓSENA, M. & DILLENBURG, L.R. Early growth of Brazilian pine (*Araucaria angustifolia* [Bertol.] Kuntze) in response to soil compaction and drought. Plant Soil, 258:293-306, 2004.
- NOVAK, L.R.; MANTOVANI, E.C.; MARTYN, P.J. & FERNANDES, B. Efeito do tráfego de trator e da pressão de contato pneu/solo na compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro álico, em dois níveis de umidade. Pesq. Agropec. Bras., 27:1587-1595, 1992.
- OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; CURI, N. & RESCK, D.V.S. Compressibilidade de um Latossolo Vermelho Argiloso de acordo com a tensão de água no solo, uso e manejo. R. Bras. Ci. Solo, 27:773-781, 2003.
- O'SULLIVAN, M.F. & SIMOTA, C. Modelling the environmental impacts of soil compaction: A review. Soil Till. Res., 35:69-84, 1995.
- PABIN, J.; LIPIEC, J.; WLODEK, S.; BISKUPSKI, A. & KAUS, A. Critical soil bulk density and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors. Soil Till. Res., 46:203-208, 1998.
- PAVINATO, A.; AITA, C.; CERETTA, C.A. & BEVILÁQUA, G.P. Resíduos culturais de espécies de inverno e o rendimento de grãos de milho no sistema de cultivo mínimo. Pesq. Agropec. Bras., 9:427-432, 1994.
- PEDROTTI, A. & DIAS JUNIOR, M.S. Compactação do solo: como evitá-la. Agropec. Catarinense, 9:50-52, 1996.
- PÉREZ GOMAR, E. Qualidade física de um Vertissolo e produção forrageira em campo nativo melhorado, com irrigação e pastoreio. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2005. 85p. (Tese de Doutorado)
- PÉREZ GOMAR, E.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & GARCÍA, F. Atributos do solo e biomassa radicular após quatro anos de semeadura direta de forrageiras de estação fria em campo natural dessecado com herbicidas. R. Bras. Ci. Solo, 26:211-223, 2002.
- QUEIROZ-VOLTAN, R.B.; NOGUEIRA, S.S.S. & MIRANDA, M.A.C. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. Pesq. Agropec. Bras., 35:929-938, 2000.

- RADFORD, B.J.; BRIDGE, B.J.; DAVIS, R.J.; MCGARRY, D.; PILLAI, U.P.; RICKMAN, J.F.; WALSH, P.A. & YULE, D.F. Changes in the properties of a Vertisol and responses of wheat after compaction with harvester traffic. *Soil Till. Res.*, 54:155-170, 2000.
- RAPER, R.L. Agricultural traffic impacts on soil. *J. Terramechanics*, 42:259-280, 2005.
- REICHERT, J.M. & CABEDA, M.S.V. Salpico de partículas e selamento superficial em solos do Rio Grande do Sul. *R. Bras. Ci. Solo*, 16:389-396, 1992.
- REICHERT, J.M. & NORTON, L.D. Aggregate stability and rain-impacted sheet erosion of air-dried and prewetted clayey surface soils under intense rain. *Soil Sci.*, 158:159-169, 1994.
- REICHERT, J.M. & NORTON, L.D. Surface seal morphology as affected by fluidized bed combustion bottom-ash. *Soil Technol.*, 7:303-317, 1995.
- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *R. Ci. Amb.*, 27:29-48, 2003.
- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & SILVA, V.R. Compactação do solo em sistema de plantio direto: Limites críticos e mitigação. In: COUTO, E.G. & BUENO, J.F., eds. *Os (des) caminhos do uso da água na agricultura brasileira*. Cuabá, UFMT, SBCS, 2004. p.167-198.
- REICHERT, J.M.; VEIGA, M. & CABEDA, M.S.V. Selamento superficial e infiltração de água em solos do Rio Grande do Sul. *R. Bras. Ci. Solo*, 16:289-298, 1992.
- REINERT, D.J. Soil structural form and stability induced by tillage in a typic Hapludalf. East Lansing, Michigan State University, 1990. 128p. (Tese de Doutorado)
- REINERT, D.J.; COLLARES, G.L. & REICHERT, J.M. Penetrômetro de cone com taxa constante de penetração no solo: Desenvolvimento e teste de funcionalidade. *Eng. Agríc.*, 27:304-316, 2007.
- REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M.V. & SUZUKI, L.E.A.S. Qualidade física dos solos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA. 16., Aracaju, 2006. Palestras. Aracaju, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. CD-ROM
- REIS, E.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; FERNANDES, H.C.; NAIME, J.M. & ARAÚJO, E.F. Densidade do solo no ambiente solo-semente e velocidade de emergência em sistema de semeadura de milho. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:777-786, 2006.
- RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O.R.; LLANILLO, R.F. & FERREIRA, R. Compactação do solo: Causas e efeitos. *Semina*, 26:321-344, 2005.
- ROQUE, C.G.; CENTURION, J.F.; ALENCAR, G.V.; BEUTLER, A.N.; PEREIRA, G.T. & ANDRIOLI, I. Comparação de dois penetrômetros na avaliação da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho sob diferentes usos. *Acta Sci.*, 25:53-57, 2003.
- ROSA, D.P. Comportamento dinâmico e mecânico do solo sob níveis diferenciados de escarificação e compactação. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2007. 112p. (Tese de Mestrado)
- ROSA, V.T.; ROSA, D.P.; REICHERT, J.M.; MENTGES, M.I.; KOCHHANN, R.A. & REINERT, D.J. Tempo de implantação do sistema de semeadura direta e seu efeito no fluxo de ar e água de um Latossolo argiloso sob tráfego controlado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., Gramado, 2007. Anais. Gramado, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. CD-ROM

- ROTH, C.H.; CASTRO FILHO, C. & MEDEIROS, G.B. Análise de fatores físicos e químicos relacionados com a agregação de um Latossolo Roxo distrófico. R. Bras. Ci. Solo, 15:241-248, 1991.
- SCHAEFER, C.E.G.R.; SOUZA, C.M.; VALLEJOS, M.F.J.; VIANA, J.H.M.; GALVÃO, J.C.C. & RIBEIRO, L.M. Características da porosidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes sistemas de preparo do solo. R. Bras. Ci. Solo, 25:765-769, 2001.
- SCHÄFER, M.J.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & CASSOL, E.A. Erosão em entressulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. R. Bras. Ci. Solo, 25:431-441, 2001.
- SECCO, D. Estados de compactação de dois Latossolos sob plantio direto e suas implicações no comportamento mecânico e produtividade das culturas. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2003. 108p. (Tese de Doutorado)
- SECCO, D.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & DA ROS, C.O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. R. Bras. Ci. Solo, 28:797-804, 2004.
- SEIXAS, F. Compactação do solo devido à mecanização florestal: Causas, efeitos e práticas de controle. Piracicaba, IPEF, 1988. 10p. (Circular Técnica, n.163)
- SEIXAS, F.; OLIVEIRA JÚNIOR, E.D. & SOUZA, C.R. Efeito da camada de resíduos florestais na compactação do solo causada pelo transporte primário da madeira. Sci. Florestais, 54:9-16, 1998.
- SEIXAS, J.; ROLOFF, G. & RALISCH, R. Tráfego de máquinas e enraizamento do milho em plantio direto. Ci. Rural, 35:798-798, 2005.
- SILVA, A.P. & GIAROLA, N.F.B. Estabelecimento de índice de resistência dos solos para quantificação do grau de coesão. In: CINTRA, F.L.D.; ANJOS, J.L. & IVO, W.M.P.M., eds. WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, Aracaju, 2001. Anais. Aracaju, Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p.145-160.
- SILVA, A.P.; IMHOFF, S. & KAY, B. Plant response to mechanical resistance and air filled porosity of soils under conventional and no-tillage system. Sci. Agric., 61:451-456, 2004a.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 58:1775-1781, 1994.
- SILVA, A.P. & KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. Soil Sci. Soc. Am. J., 61:877-883, 1997.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. Soil Till. Res., 44:81-93, 1997.
- SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. & CAMARGO, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. R. Bras. Ci. Solo, 10:91-95, 1986.
- SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; IMHOFF, S. & LEÃO, T.P. Intervalo hídrico ótimo: Origem, evolução e aplicações em estudos de qualidade física do solo. In: COUTO, E.G. & BUENO, J.F., eds. Os (des) caminhos do uso da água na agricultura brasileira. Cuiabá, UFMT, SBCS, 2004b. p.455-482.
- SILVA, G.J.; MAIA, J.C.S. & BIANCHINI, A. Crescimento da parte aérea de plantas cultivadas em vaso, submetidas à irrigação subsuperficial e a diferentes graus de compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico. R. Bras. Ci. Solo, 30:31-40, 2006a.

- SILVA, I.F. & MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. R. Bras. Ci. Solo, 21:313-319, 1997.
- SILVA, M.A.S.; MAFRA, A.L.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. Ci. Rural, 35:544-552, 2005.
- SILVA, R.B.; DIAS JUNIOR, M.S.; SILVA, F.A.M. & FOLE, S.M. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo dos cerrados. R. Bras. Ci. Solo, 27:973-983, 2003.
- SILVA, S.R.; BARROS, N.F. & COSTA, L.M. Atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do solo. R. Bras. Eng. Agríc. Amb., 10:842-847, 2006b.
- SILVA, S.R.; BARROS, N.F. & VILAS BOAS, J.E.B. Crescimento e nutrição de eucalipto em resposta à compactação de Latossolos com diferentes umidades. R. Bras. Ci. Solo, 30:759-768, 2006c.
- SILVA, V.R. Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2003. 171p. (Tese de Doutorado)
- SILVA, V.R.; REICHERT, J.M. & REINERT, D.J. Variação da temperatura do solo em três sistemas de manejo na cultura do feijão. R. Bras.Ci. Solo, 30:391-399, 2006d.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. R. Bras.Ci. Solo, 24:191-199, 2000a.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. R. Bras.Ci. Solo, 24:239-249, 2000b.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. Ci. Rural, 30:795-801, 2000c.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & SOARES, J.M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. I - Estado inicial de compactação. R. Bras. Ci. Solo, 26:1-8, 2002a.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. II - Grau de saturação em água. R. Bras. Ci. Solo, 26:9-15, 2002b.
- SILVA, V.R.; REICHERT, J.M. & REINERT, D.J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. Ci. Rural, 34:399-406, 2004c.
- SOANE, B.D.; BLACKWELL, P.S.; DICKSON, J.W. & PAINTER, D.J. Compaction by agricultural vehicles: A review. I. Soil and wheel characteristics. Soil Till. Res., 1:207-237, 1980/1981.
- SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C. Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. Soil Till. Res., 35:5-22, 1995.
- STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. R. Bras. Ci. Solo, 15:229-235, 1991.

- STOLF, R.; FERNANDES, J. & FURLANI NETO, V. Recomendação para uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf. R. STAB - Açúcar, Alcool e Subpr., 1:18-23, 1983.
- STONE, L.F. & SILVEIRA, P.M. Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. Pesq. Agropec. Bras., 34:83-91, 1999.
- STRECK, C.A. Compactação do solo e seus efeitos no desenvolvimento radicular e produtividade da cultura do feijoeiro e da soja. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2003. 83p. (Tese de Mestrado)
- STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & KAISER, D.R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. Ci. Rural, 34:755-760, 2004.
- SUZUKI, L.E.A.S. Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2005. 149p. (Tese de Mestrado)
- SUZUKI, L.E.A.S. & ALVES, M.C. Produtividade do milho (*Zea mays* L.) influenciada pelo preparo do solo e por plantas de cobertura em um Latossolo Vermelho. Acta Sci., 26:61-65, 2004.
- SUZUKI, L.E.A.S.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & LIMA, C.L.R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. Pesq. Agropec. Bras., 42:1159-1167, 2007.
- TAVARES-FILHO, J.; FONSECA, I.C.B.; RIBON, A.A. & BARBOSA, G.M.C. Efeito da escarificação na condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. Ci. Rural, 36:996-999, 2006.
- TAYLOR, H.M. & BRAR, G.S. Effect of soil compaction on root development. Soil Till. Res., 19:111-119, 1991.
- TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M. & PARKER JUNIOR, J.J. Soil strength-root penetration relations for medium to coarse-textured soil materials. Soil Sci., 102:18-22, 1966.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 22:573-581, 1998.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. Soil Till. Res., 52:223-232, 1999.
- TORRES, E.; ODILON, F.S. & GALERANI, P.R. Manejo do solo para a cultura da soja. Londrina, Embrapa-CNPSo, 1993. 71p. (Circular Técnica, 12).
- TWEDORFF, D.A.; CHANASYK, D.S.; MAPFUMO, E.; NAETH, M.A. & BARON, V.S. Impacts of forage grazing and cultivation on near-surface relative compaction. Can. J. Soil Sci., 79:465-471, 1999.
- UNGER, P.W. Soil bulk density, penetration resistance, and hydraulic conductivity under controlled traffic conditions. Soil Till. Res., 37:67-75, 1996.
- UNGER, P.W. & KASPAR, T.C. Soil compaction and root growth: A review. Agron. J., 86:759-766, 1994.
- Van LIER, Q.J. Oxigenação do sistema radicular: uma abordagem física. R. Bras. Ci. Solo, 25:233-238, 2001.
- VEEN B.W. & BOONE, F.R. The influence of mechanical resistance and soil water on the growth of seminal roots of maize. Soil Till. Res., 16:219-236, 1990.
- Tópicos Ci. Solo, 5:49-134, 2007

- 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 Till. Res.*, 92:104-113, 2007.
- VEPRASKAS, M.J. Plant response mechanisms to soil compaction. In: WILKINSON, R.F., ed. *Plant-environment interactions*. New York, Marcel Dekker, 1994. p.263-287.
- VOMOCIL, J.A. & FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil air and water. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 4:242-246, 1961.
- WARRICK, A.W. & NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. *Applications of soil physics*. New York, Academic, 1980. p.319-344.
- WILLIAMS, S.M. & WEIL, R.R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68:1403-1409, 2004.
- WU, L.; SWAN, J.B.; PAULSON, W.H. & RANDALL, G.W. Tillage effects on measured soil hydraulic-properties. *Soil Till. Res.*, 25:17-33, 1992.
- ZHANG, H.; HARTGE, K.H. & RINGE, H. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactability. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:239-245, 1997.