

## Comissão 2.2 - Física do solo

# ATRIBUTOS FÍSICOS NOS TEMPOS DE ADOÇÃO DE MANEJOS EM LATOSSOLO CULTIVADO COM SOJA<sup>(1)</sup>

Karina de Vares Rossetti<sup>(2)</sup>, José Frederico Centurion<sup>(3)</sup>, Paula Regina de Oliveira<sup>(2)</sup> & Itamar Andrioli<sup>(3)</sup>

### RESUMO

A condução das operações de preparo de forma inadequada ocasiona sérios problemas de conservação do solo, destacando-se a compactação, que acarreta a redução do espaço poroso, principalmente dos macroporos, e altera os atributos físico-hídricos. Este trabalho teve como objetivo verificar a influência dos diferentes sistemas e tempos de adoção de manejos em Latossolo Vermelho de Jaboticabal, Estado de São Paulo, por meio da densidade máxima, e correlacioná-la com a produtividade da soja, a densidade relativa e a umidade crítica de compactação. O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado com parcelas subdivididas (cinco sistemas de uso e três camadas), com quatro repetições. Os cinco sistemas de uso foram: plantio direto por cinco anos (SPD5), plantio direto por sete anos (SPD7), plantio direto por nove anos (SPD9), preparo convencional (SPC) e uma área adjacente de mata nativa (MN). As camadas do solo avaliadas foram as de 0–0,10, 0,10–0,20 e 0,20–0,30 m, nas quais foram determinados a densidade máxima do solo ( $D_{s_{máx}}$ ), a umidade crítica de compactação ( $U_{gc}$ ), a densidade relativa do solo ( $D_{sr}$ ), a composição granulométrica, a porosidade e o teor de matéria orgânica do solo. Os resultados mostraram que o comportamento das curvas de compactação do solo foi o mesmo em todas as camadas dos diferentes manejos e que os teores de matéria orgânica não justificaram as pequenas alterações da  $D_{s_{máx}}$ . Para o Latossolo Vermelho, as

---

<sup>(1)</sup> Parte da Dissertação de Mestrado da primeira autora, financiado pela FAPESP (processo n°: 2008/52793-6), e apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – FCAV/UNESP. Recebido para publicação em 13 de janeiro de 2011 e aprovado em 14 de dezembro de 2011.

<sup>(2)</sup> Doutoranda em Agronomia, Produção Vegetal, pela FCAV/UNESP. Via de Acesso Prof. Donato Castellane s/n, CEP 14884-900 Jaboticabal (SP). Bolsista CAPES. E-mail: krossetti@bol.com.br; paulaoliveira@yahoo.com.br

<sup>(3)</sup> Professor Adjunto do Departamento de Solos e Adubos, FCAV/UNESP. Bolsista CNPq. E-mail: jfcentur@fcav.unesp.br; itamar@fcav.unesp.br

operações mecanizadas nos sistemas de manejo podem ser executadas na faixa de 0,13 a 0,19 kg kg<sup>-1</sup> de umidade sem causar degradação física. Verificou-se que a Dsr ótima e a umidade crítica de compactação foram de 0,86 e 0,15 kg kg<sup>-1</sup>, respectivamente, embora os diferentes sistemas e tempos de adoção de manejo tenham apresentado comportamento semelhante quanto à produtividade da soja.

**Termos de indexação:** ensaio de Proctor normal, sistema conservacionista, *Glycine max*.

#### SUMMARY: PHYSICAL PROPERTIES OF AN OXISOL AS AFFECTED BY SOYBEAN MANAGEMENT SYSTEMS

*Improper tillage operations cause serious problems of soil conservation, above all compaction, causing pore space reduction of mainly the macropores, and affecting the physical-hydric properties. The purpose of this study was to verify the influence of different periods of management systems on the maximum density of a Red Oxisol in Jaboticabal, São Paulo State, and establish correlations with soybean yield, relative density and the soil critical moisture for compaction. The experiment was arranged in a completely randomized design with a split-plot arrangement (five management systems and three layers) with four replications. The five systems consisted of: 5 years of no-tillage (SPD5), 7 years of no-tillage (SPD7), 9 years of no-tillage (SPD9), conventional tillage system (SPC) and an adjacent area of native forest (MN). The maximum soil density (DSMax), critical moisture content for compaction (UGC), relative soil density (DSR), particle size, porosity, and level of soil organic matter were determined in the soil layers 0–0.10; 0.10–0.20 and 0.20–0.30 m. The results showed that the behavior of soil compaction curves was similar in all layers of all treatments and soil organic matter content did not explain the small changes in DSMax. On the Red Oxisol under study, the mechanical operations required for the management systems can be performed in a moisture content range of 0.13–0.19 kg kg<sup>-1</sup>, without causing physical degradation. It was found that the optimum Dsr and critical moisture for compaction were 0.86 and 0.15 kg kg<sup>-1</sup>, respectively, whereas the soybean yields were similar after the different periods of management systems.*

*Index terms:* standard Proctor test, conservation system, *Glycine max*.

## INTRODUÇÃO

A estrutura do solo influencia diretamente a produtividade das culturas, pois interfere na dinâmica do ar, da água e dos nutrientes, na temperatura do meio e no desenvolvimento radicular das plantas (Jury et al., 1991). A formação de camada mal estruturada na superfície do solo pode impedir os fluxos de água e ar, tornando-o com baixa permeabilidade, pois a água terá dificuldade para se infiltrar e irá escoar superficialmente, contribuindo para um processo de erosão hídrica; conseqüentemente, isso estabelecerá condições desfavoráveis ao uso agrícola (Amaro Filho et al., 2008).

A compactação do solo ocorre devido a processos pedogenéticos ou a operações mecanizadas realizadas sem considerar o teor de umidade do solo no ponto de friabilidade. A adoção de sistemas de manejo conservacionista, como o plantio direto, visa preservar a qualidade do solo e do ambiente, sem

prescindir da obtenção de elevadas produtividades das culturas de interesse econômico (Carvalho et al., 2004). Entretanto, Stone et al. (2002) relataram em várias situações a ocorrência do aumento da densidade do solo e diminuição da macroporosidade em sistema plantio direto, o que tem sido diagnosticado como compactação, ou seja, quando o solo recebe pressões que excedem a sua capacidade de suporte de carga.

Segundo Klein (2008), a densidade máxima do solo ( $D_{s_{máx}}$ ) é dependente da composição mineral dos solos. Essa relação também foi verificada por Beutler et al. (2005), que encontraram valores de 1,85 Mg m<sup>-3</sup> para um Latossolo Vermelho distrófico (LVd) (271 g kg<sup>-1</sup> de argila) e de 1,54 Mg m<sup>-3</sup> para um Latossolo Vermelho eutroférico (LVef) (517 g kg<sup>-1</sup> de argila). Comportamento semelhante também foi observado por Freddi (2007) em LVef, com 1,61 Mg m<sup>-3</sup> (572 g kg<sup>-1</sup> de argila). De acordo com Silva et al. (2010), alguns estudos têm indicado que o

conteúdo de água ótimo para compactação encontra-se dentro da faixa de friabilidade do solo – na qual são realizadas as operações de preparo – e predispõe o solo à degradação física.

Braida et al. (2006), em estudo realizado em solos com ampla variação de carbono orgânico e para um mesmo nível de energia, constataram que em um Argissolo Vermelho-Amarelo de textura franco-arenosa ( $1,87 \text{ Mg m}^{-3}$ ) a  $D_{s_{\text{máx}}}$  na camada de 0–0,05 m atingiu maiores valores do que em um Nitossolo Vermelho argiloso ( $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$ ). Segundo esses autores, a argila apresenta maior CTC e área superficial específica (ASE) do que a areia e interage mais com a água, diminuindo o efeito lubrificante entre as partículas minerais; dessa maneira, pode apresentar maior coesão e diminuir a suscetibilidade à compactação do solo.

O estudo da densidade relativa do solo ( $D_{sr}$ ) surgiu da necessidade de se encontrar um indicador para caracterizar o estado de compactação que fosse simples para ser usado em experimentos de campo e capaz de relacionar a resposta do solo ao tráfego de máquinas com a resposta das culturas à compactação. No Brasil, Torres & Saraiva (1999), em Latossolo Roxo cultivado por dois anos com soja, em clima tropical, observaram que, a partir da  $D_{sr}$  entre 0,84 e 0,87, ocorreu decréscimo da produtividade. De acordo com Beutler et al. (2005), a  $D_{sr}$  de um Latossolo Vermelho para a produtividade de soja no campo decresceu a partir da  $D_{sr}$  de 0,80. Reichert et al. (2007), analisando um grupo de dados de densidade do solo crítico, constataram que a  $D_{sr}$  na qual o sistema radicular das plantas teve o seu crescimento alterado situou-se entre 0,90 e 0,95.

Este trabalho teve como objetivo verificar a influência dos diferentes sistemas e tempos de adoção de manejos em Latossolo Vermelho por meio da densidade máxima e correlacioná-la com a produtividade da soja, a densidade relativa e a umidade crítica de compactação.

## MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi desenvolvido em Jaboticabal, SP, situado nas coordenadas geográficas de  $21^{\circ} 15' 29''$  de latitude sul e  $48^{\circ} 16' 47''$  de longitude oeste, com altitude média de 614 m. O clima da região, de acordo com a classificação climática de Köppen, é do tipo Cwa, com verão quente e inverno seco, precipitação pluvial média anual de 1.428 mm e temperatura média de  $21^{\circ}\text{C}$  (Figura 1). O solo da área experimental foi classificado, de acordo com Andrioli & Centurion (1999) e atualizado conforme Embrapa (2006), como Latossolo Vermelho distrófico típico, argiloso, A moderado, caulinitico, hipoférrico, muito profundo e com relevo plano a suave ondulado.

Antes da instalação do experimento, o solo vinha sendo cultivado no sistema de preparo convencional por 30 anos, com a sucessão anual de milho e soja, no verão, e safrinha de milho, no outono. A partir dos anos de 2000, 2002 e 2004, foram implantados, respectivamente, o sistema plantio direto de nove anos (SPD9), o sistema plantio direto de sete anos (SPD7) e o sistema plantio direto de cinco anos (SPD5). No ano agrícola 2008/09, quatro partes da área, com  $60 \text{ m}^2$  cada, foram destinadas ao sistema de preparo convencional (SPC); as demais áreas dos sistemas de manejo foram demarcadas também com  $60 \text{ m}^2$  cada. O SPC foi constituído de uma escarificação do solo, até 0,30 m de profundidade, seguida de uma gradagem pesada e uma gradagem leve. Em novembro de 2008, foi realizada a semeadura da soja, cultivar M-SOY 6101, por meio da semeadora-adubadora de precisão da marca Marchesan, modelo Cop Suprema, equipada com sete linhas espaçadas de 0,45 m, largura útil de 3,15 m e profundidade média de semeadura de 0,03 m.

A análise química do solo foi realizada conforme Raij et al. (2001) (Quadro 1), e a adubação na semeadura, conforme Raij et al. (1997), consistiu da aplicação de  $250 \text{ kg ha}^{-1}$  da formulação N-P-K

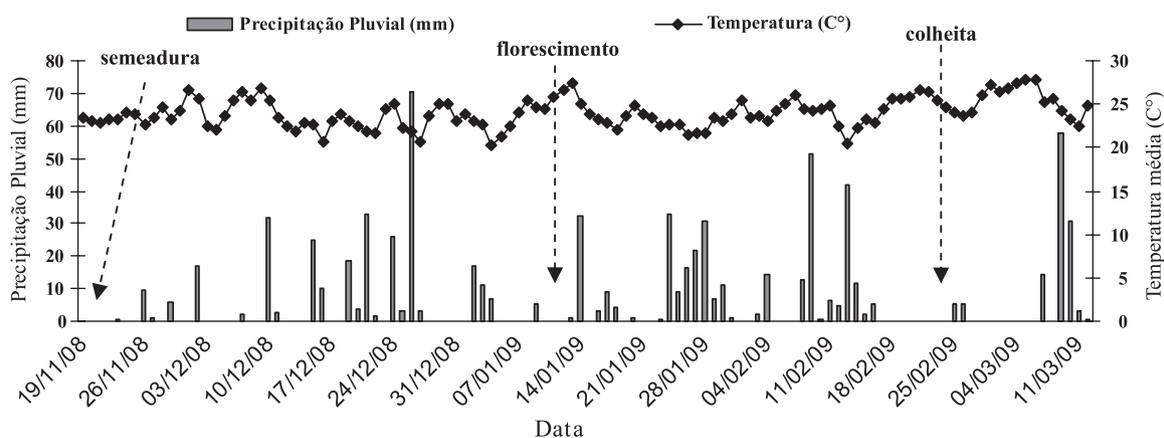


Figura 1. Precipitação pluvial acumulada e temperatura média semanal durante o período de desenvolvimento da cultura da soja (2008/09) em Jaboticabal. Fonte: Depto. de Ciências Exatas (UNESP/FCAV).

**Quadro 1. Características químicas do Latossolo Vermelho na camada de 0–0,20 m, antes da adubação**

pH(CaCl <sub>2</sub> )	P <sub>resina</sub>	K	Ca	Mg	SB	CTC	V
1:2,5	mg dm <sup>-3</sup>	————		mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	————		%
5,5	40	2,4	28	17	46	71	64

(2-20-20). No sistema plantio direto foi utilizado o sulcador de adubo tipo haste (facão) e, no sistema de preparo convencional, discos duplos defasados, bem como um trator Valtra BH 140, para tracionar a semeadora-adubadora.

Os tratamentos foram SPD5, SPD7, SPD9 e SPC (1 ano), e uma área adjacente de mata nativa (MN) foi utilizada como controle. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado e em parcelas subdivididas, com quatro repetições. As parcelas foram constituídas pelos tratamentos, e as subparcelas, pelas camadas de solo amostradas (0–0,10, 0,10–0,20 e 0,20–0,30 m).

A composição granulométrica dos solos foi determinada em amostras deformadas por meio da dispersão com NaOH (0,1 mol L<sup>-1</sup>) e agitação lenta durante 16 h, e o conteúdo de argila, pelo método da

pipeta (Embrapa, 1997). Nas diferentes camadas, também foram retiradas amostras para a análise química, visando à determinação da matéria orgânica do solo (MO), que foi obtida por oxidação em solução 0,1667 mol L<sup>-1</sup> de bicromato de potássio em meio ácido e titulação de excesso de bicromato em solução de sulfato ferroso amoniacal 0,25 mol L<sup>-1</sup>, usando difenilamina como indicador (Raij et al., 2001) (Quadro 2).

Para avaliar os atributos físicos do solo, em janeiro de 2009, durante o florescimento, foram coletadas amostras indeformadas, utilizando cilindros de 53,16 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup>, para determinar a densidade do solo (Blake & Hartge, 1986). A microporosidade foi determinada por secagem (tensão de 0,006 MPa) em câmaras de Richards com placa porosa (Klute, 1986); a porosidade total, segundo Danielson & Sutherland (1986); e a macroporosidade foi obtida por diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

Para determinação do ensaio de Proctor normal, amostras deformadas foram coletadas durante o florescimento e passadas em peneira de 4,0 mm, com reutilização de material (Nogueira, 1998). A determinação da densidade máxima do solo (Ds<sub>máx</sub>) consistiu da adição de um pouco de água à amostra, homogeneização e adição de solo até um terço do cilindro de 0,10 m por 0,13 m, que foi submetido a 25 golpes de um soquete de 2,5 kg, caindo à altura de 0,305 m, correspondendo a uma

**Quadro 2. Composição granulométrica e teor de matéria orgânica (MO) de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo e mata nativa em diferentes camadas**

Camada	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	Mo
m			g kg <sup>-1</sup>	g dm <sup>-3</sup>	
			MN		
0–0,10	300 Ca	294 Bab	66 Bb	340 Ba	23 Ba
0,10–0,20	293 Ba	302 Ba	125 Aa	280 Db	17 Ab
0,20–0,30	257 Cb	288 Bb	128 Aa	327 BCa	16 Ab
			SPD5		
0–0,10	335 Ba	316 Aa	54Cb	295 Ca	17 Ca
0,10–0,20	320 Aa	307 Ba	68 Ca	305 CDa	12 Bab
0,20–0,30	319 Aa	307 Aa	64 Ca	310 Ca	10 Bb
			SPD7		
0–0,10	330 Aa	310 Aab	40 Db	320 Ba	17 Ca
0,10–0,20	309 ABb	320 Aa	50 Dab	321 BCa	16 ABa
0,20–0,30	321 Aa	304 Ab	54 Da	321 Ca	13 ABa
			SPD9		
0–0,10	303 Ca	215 Ca	97 Aa	385 Ab	29 Aa
0,10–0,20	310 Aba	216 Ca	83 Bb	391 Ab	17 Ab
0,20–0,30	277 Bb	224 Ca	72 Bc	427 Aa	15 ABb
			SPC		
0–0,10	309 Ca	311 Aa	57 Cb	323 Bb	19 Ca
0,10–0,20	307 Aba	312 Ba	47 Dc	334 Bab	14 ABab
0,20–0,30	279 Bb	296 Ab	65 BCa	360 Ba	12 ABb
CV (%) <sup>(1)</sup>	11,79	13,66	13,41	15,81	12,83
CV (%) <sup>(2)</sup>	11,58	12,92	13,08	13,71	8,94

<sup>(1)</sup> Coeficiente de variação referente aos tratamentos (parcelas). <sup>(2)</sup> Coeficiente de variação referente às camadas (subparcelas). Médias seguidas da mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna, em cada variável, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05). MN: mata nativa; SPD5: plantio direto com 5 anos; SPD7: plantio direto com 7 anos; SPD9: plantio direto com 9 anos; e SPC: preparo convencional no Latossolo Vermelho.

energia de 60,2 KJ m<sup>-3</sup>. Em seguida, adicionou-se mais uma camada de solo até atingir dois terços, e depois outra, até atingir a superfície do cilindro, procedendo-se da mesma forma para a compactação. Nos pontos seguintes adicionou-se mais água, até que se verificou ter a densidade do solo diminuído; dessa forma, foram obtidas a Ds<sub>máx</sub> e a umidade gravimétrica crítica de compactação (Ugc).

Assim, para cada amostra, obtiveram-se sete pares de valores de umidade (Ug) e densidade do solo (Ds), com os quais se ajustou a equação:

$$Ds = aUg^2 + bUg + c \quad (1)$$

em que Ds é a densidade do solo (kg dm<sup>-3</sup>); Ug, a umidade do solo (kg kg<sup>-1</sup>); e *a*, *b* e *c*, os parâmetros da equação.

Fazendo-se a derivada primeira da equação 1, foi obtida a umidade ótima para máxima compactação ou umidade crítica de compactação (Ugc):

$$Ugc = -b/2a \quad (2)$$

Dessa forma, a Ds<sub>máx</sub> pode ser calculada por:

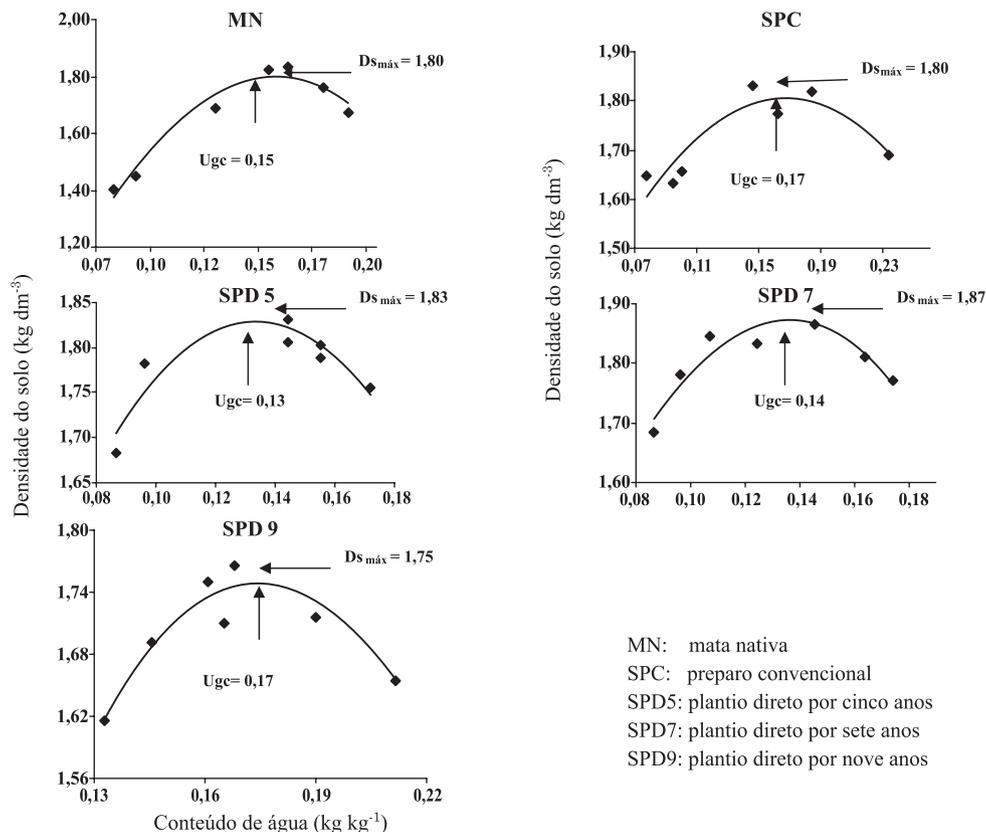
$$Ds_{Máx} = -(b^2 - 4ac)/4a \quad (3)$$

em que Ds<sub>máx</sub> é a densidade máxima do solo (kg dm<sup>-3</sup>), e a densidade relativa do solo (Dsr) foi obtida pela divisão da densidade do solo pela densidade máxima do solo obtida no teste de Proctor normal.

Para avaliar a produtividade de grãos, coletaram-se as plantas contidas na área útil de cada parcela (seis linhas de soja com 1 m cada); os grãos foram separados das vagens e levados à estufa ventilada a 65 °C, até alcançarem peso constante. A produtividade de grãos de soja foi obtida extrapolando-se a produção de grãos da área útil da parcela para um hectare, considerando-se a umidade-padrão de 13 %. Os resultados foram submetidos à análise de variância, pelo software ASSISTAT versão 7.5 beta; quando ela indicou diferença entre médias, utilizou-se o teste de Tukey (p < 0,05) (Banzatto & Kronka, 1992); posteriormente, foi realizada a análise de regressão, por meio do software Microcal Origin 8.1.

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao comparar as curvas de compactação do solo nas três camadas avaliadas (Figuras 2, 3 e 4), observou-se que o comportamento foi semelhante nos sistemas de manejo, corroborando o estudo de Boukouna (2009) em Argissolo Vermelho sob plantio direto. A MN apresentou menor valor de Ds<sub>máx</sub> em comparação aos demais manejos nas camadas de 0,10–0,20 e 0,20–0,30 m (Figuras 3 e 4), porém os teores de MO da MN foram semelhantes em relação aos sistemas de manejo (Quadro 2).



MN: mata nativa  
 SPC: preparo convencional  
 SPD5: plantio direto por cinco anos  
 SPD7: plantio direto por sete anos  
 SPD9: plantio direto por nove anos

Figura 2. Curvas de compactação de um Latossolo Vermelho determinada pelo ensaio de Proctor na camada de 0–0,10 m.

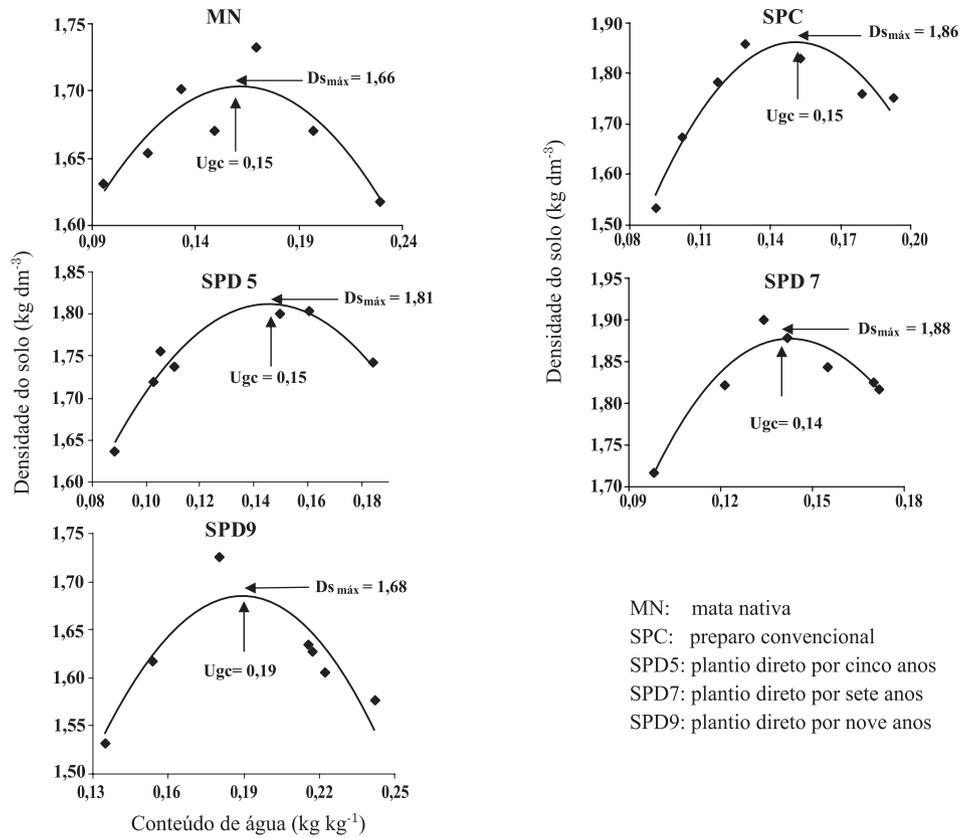


Figura 3. Curvas de compactação de um Latossolo Vermelho determinada pelo ensaio de Proctor na camada de 0,10–0,20 m.

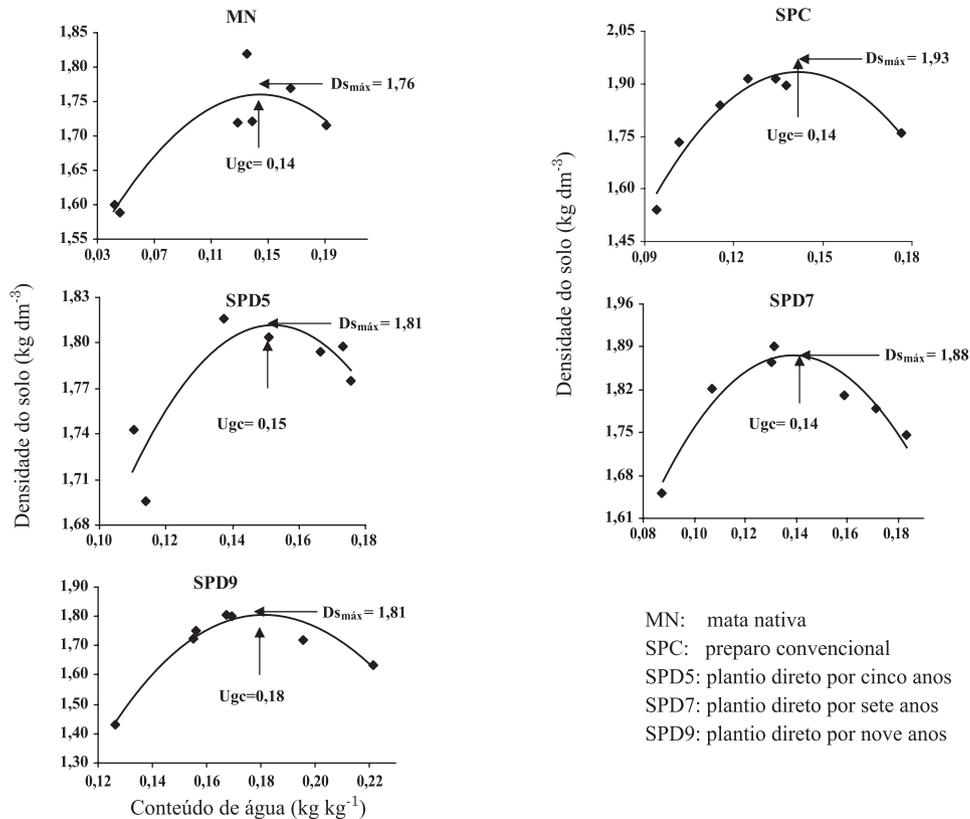


Figura 4. Curvas de compactação de um Latossolo Vermelho determinada pelo ensaio de Proctor na camada de 0,20–0,30 m.

As regressões quadráticas para os diferentes sistemas de uso e manejo foram significativas em todas as camadas avaliadas (Quadro 3), com exceção da MN e do SPD9 na camada de 0,10–0,20 m. Esse comportamento pode ser justificado considerando que a densidade nas umidades baixas pode ser influenciada pela água adicionada, que cria filmes de água ao redor das partículas minerais, reduzindo o atrito entre estas e facilitando a compactação do solo. Na umidade na qual a compactação é máxima, a adição de mais água faz com que esta venha a ocupar os espaços entre as partículas do solo, o que causa o surgimento de pressões neutras, tornando o solo menos suscetível à compactação (Olu et al., 1989). O SPD9 apresentou valores superiores de umidade crítica de compactação ( $U_{gc}$ ): 0,17, 0,19 e 0,18  $kg\ kg^{-1}$  nas camadas de 0–0,10, 0,10–0,20 e 0,20–0,30 m, respectivamente; mesmo assim, o tráfego de máquinas para o solo em estudo pode ser realizado nessas umidades, pois, de acordo com Figueiredo et al. (2000), em Latossolo Roxo os valores que foram inferiores a 0,29  $kg\ kg^{-1}$  não ofereceram risco de compactação.

Como mais uma vez se pôde observar, as pequenas alterações da  $D_{s_{máx}}$  em profundidade entre os sistemas de manejo não podem ser justificadas com os teores de MO (Quadro 2), visto que esses resultados não seguem a mesma tendência dos obtidos por Braidia et al. (2006) em Argissolo Vermelho-Amarelo de textura franco-arenosa (155  $g\ kg^{-1}$ ) e em um Nitossolo argiloso (787  $g\ kg^{-1}$ ). Esses autores constataram que, com o aumento

do teor de C orgânico (de 9,3 para 18,8  $g\ kg^{-1}$ ), houve redução da  $D_{s_{máx}}$  e aumento da umidade necessária para atingi-la. Neste trabalho, verificou-se correlação negativa somente com a variável MO e a  $D_{s_{máx}}$  ( $p < 0,05$ ) (Figura 5), concordando com os resultados obtidos por Marcolin & Klein (2011).

Os valores de densidade relativa apresentados no quadro 4 encontram-se na faixa de 0,77 a 0,93. A  $D_{sr}$ , em alguns casos, excedeu o valor de 0,80, considerado crítico para a produtividade da soja, conforme Beutler et al. (2005). Nesse aspecto, tanto Carter (1990) como Lipiec et al. (1991) constataram que valores superiores à faixa de 0,86 a 0,90 (dependendo da textura do solo) provocam redução importante no volume de macroporos, alterando o movimento normal da água e ar. Isso estaria relacionado a um menor crescimento e rendimento dos cultivos. Outro estudo, confirmando essa ideia, foi desenvolvido por Håkansson (1990), que encontrou o máximo rendimento de cevada em solos com diferentes texturas e conteúdos de matéria orgânica (argilosa, franco-argilosa, areia-franca, franca, franco-arenosa e solo orgânico) quando a  $D_{sr}$  se encontrava próximo a 0,87. Os valores da  $D_{sr}$  da MN, SPD7, SPD9 e SPC aumentaram em relação aos demais tratamentos da camada de 0–0,10 m para a de 0,10–0,20 m, provavelmente em decorrência do decréscimo da  $D_{s_{máx}}$  do SPD9 e da MN. Desse modo, a diminuição significativa da macroporosidade e da porosidade total no SPC e da MN em relação à camada de 0–0,10 m para 0,10–0,20 m pode ter alterado os valores de  $D_{sr}$ , pois a densidade do solo

**Quadro 3. Resultados da análise de regressão quadrática da densidade do solo ( $D_s$ ) em função da umidade ( $U_g$ ), para os diferentes tratamentos e camadas**

Tratamento	Equação	R <sup>2</sup>	Fc	Pr > Fc
0–0,10 m				
MN	$D_s = -77,13U_g^2 + 23,53U_g + 0,0002$	0,95	34,31	0,003
SPD5	$D_s = -55,73U_g^2 + 14,86U_g + 0,84$	0,86	13,32	0,02
SPD7	$D_s = -68,58U_g^2 + 18,59U_g + 0,61$	0,89	25,35	0,005
SPD9	$D_s = -71,51U_g^2 + 24,97U_g - 0,43$	0,88	18,90	0,009
SPC	$D_s = -24,15U_g^2 + 8,13U_g + 1,12$	0,81	11,73	0,02
0,10–0,20m				
MN	$D_s = -18,26U_g^2 + 5,59U_g + 1,23$	0,76	4,65	0,09
SPD5	$D_s = -48,82U_g^2 + 14,28U_g + 0,77$	0,94	9,42	0,03
SPD7	$D_s = -79,64U_g^2 + 22,83U_g + 0,24$	0,92	12,01	0,02
SPD9	$D_s = -49,40U_g^2 + 18,69U_g - 0,08$	0,80	6,30	0,06
SPC	$D_s = -84,82U_g^2 + 25,65U_g - 0,08$	0,92	31,63	0,003
0,20–0,30m				
MN	$D_s = -16,15U_g^2 + 4,68U_g + 1,42$	0,83	8,43	0,04
SPD5	$D_s = -54,72U_g^2 + 16,64U_g + 0,55$	0,77	14,23	0,02
SPD7	$D_s = -77,62U_g^2 + 21,60U_g + 0,37$	0,92	34,38	0,003
SPD9	$D_s = -118,92U_g^2 + 43,13U_g - 2,10$	0,95	63,54	0,0009
SPC	$D_s = -152,03U_g^2 + 43,15U_g - 1,13$	0,94	27,04	0,004

MN: mata nativa; SPD5: plantio direto com 5 anos; SPD7: plantio direto com 7 anos; SPD9: plantio direto com 9 anos; e SPC: preparo convencional no Latossolo Vermelho. Fc: valor do F calculado; Pr: probabilidade de obter um valor de  $F \geq Fc$ .

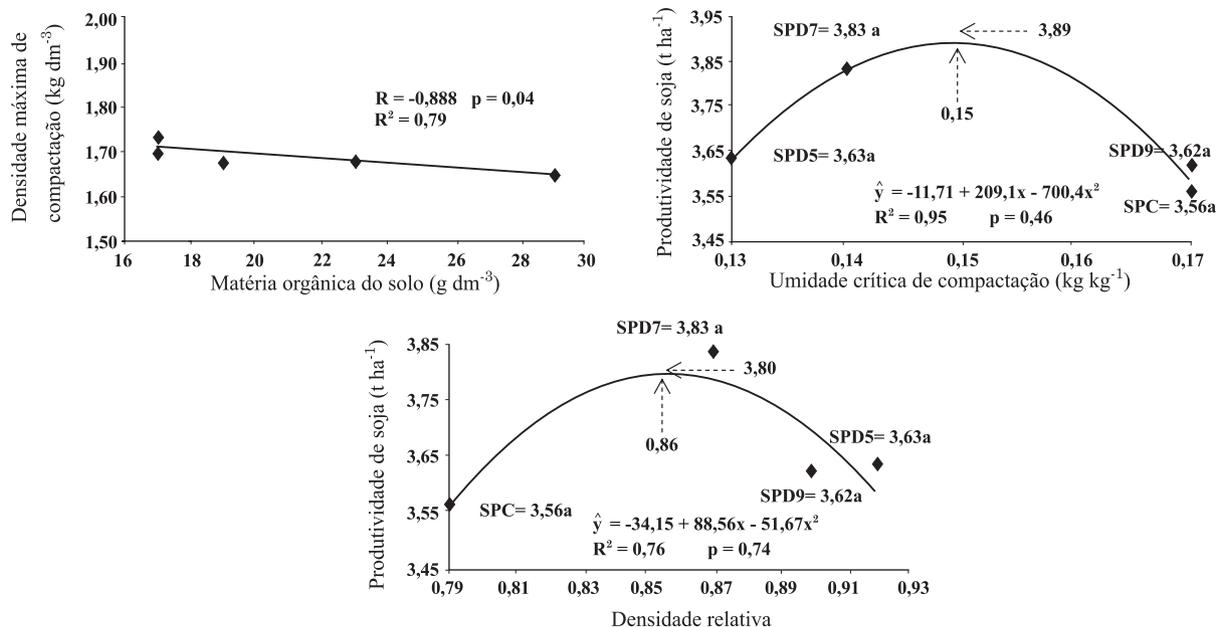


Figura 5. Correlações entre matéria orgânica do solo e densidade máxima de compactação, umidade crítica de compactação e produtividade de soja e densidade relativa do solo entre a produtividade de soja na camada de 0–0,10 m.

Quadro 4. Densidade relativa, densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do Latossolo Vermelho em diferentes camadas e tratamentos

Camada	Tratamento				
	MN	SPD5	SPD7	SPD9	SPC
Densidade relativa					
m					
0–0,10	0,77	0,92	0,87	0,90	0,79
0,10–0,20	0,92	0,87	0,89	0,93	0,82
0,20–0,30	0,89	0,88	0,90	0,88	0,77
Densidade do solo (Mg m <sup>-3</sup> )					
0–0,10	1,39 Bb	1,68 Aa	1,63 Aa	1,58 Aa	1,43 Bb
0,10–0,20	1,54 Ba	1,58 ABb	1,67 Aa	1,57 ABa	1,52 Ba
0,20–0,30	1,56 BCa	1,60 ABab	1,69 Aa	1,60 ABa	1,49 Cab
CV (%) <sup>(1)</sup> = 12,08			CV (%) <sup>(2)</sup> = 11,23		
Macroporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )					
0–0,10	0,196 Aa	0,096 Ba	0,133 Ba	0,106 Ba	0,213 Aa
0,10–0,20	0,150 Ab	0,121 ABa	0,111 ABa	0,098 Ba	0,150 Ab
0,20–0,30	0,125 ABb	0,111 BCa	0,109 BCa	0,067 Ca	0,171 Aab
CV (%) <sup>(1)</sup> = 19,02			CV (%) <sup>(2)</sup> = 21,10		
Microporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )					
0–0,10	0,243 Ca	0,276 ABa	0,239 Ca	0,296 Ab	0,257 BCa
0,10–0,20	0,252 Ba	0,260 Ba	0,235 Ba	0,299 Aab	0,257 Ba
0,20–0,30	0,257 BCa	0,268 Ba	0,228 Ca	0,316 Aa	0,249 BCa
CV (%) <sup>(1)</sup> = 15,18			CV (%) <sup>(2)</sup> = 11,49		
Porosidade total (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )					
0–0,10	0,439 Aa	0,372 Ba	0,372 Ba	0,402 Ba	0,470 Aa
0,10–0,20	0,402 Ab	0,381 Aa	0,346 Bab	0,397 Aa	0,407 Ab
0,20–0,30	0,382 Bb	0,379 Ba	0,337 Cb	0,383 Ba	0,420 Ab
CV (%) <sup>(1)</sup> = 12,97			CV (%) <sup>(2)</sup> = 14,74		

<sup>(1)</sup> Coeficiente de variação referente aos tratamentos (parcelas). <sup>(2)</sup> Coeficiente de variação referente às camadas (subparcelas). Médias seguidas da mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna, em cada variável, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

aumentou nessas últimas camadas e tratamentos. Segundo Ferreira et al. (1999), isso ocorre porque no Latossolo Vermelho distrófico (LVd) predominam quartzo e caulinita com estrutura maciça, que conferem menor porosidade.

O valor de Dsr ótima para produtividade da soja (Figura 5) no campo foi de 0,86, apesar de a regressão polinomial ter sido não significativa ( $p = 0,74$ ). Esse resultado é semelhante ao verificado por Lindstron & Voorhees (1994), os quais constataram que valores acima de 0,86 são elevados e prejudiciais ao desenvolvimento das culturas e abaixo de 0,80 podem alterar a produtividade de alguns cereais, com redução da capacidade de armazenamento de água no solo. Nesse sentido, verifica-se que, embora os tratamentos SPD5, SPD7 e SPD9 na camada de 0–0,10 m tenham apresentado valores de Dsr superiores aos da ótima, esse comportamento não influenciou na produtividade, independentemente de todos os tratamentos avaliados terem superado a produtividade média nacional de soja, que, segundo Conab (2009), foi de 2.710 kg ha<sup>-1</sup> na safra 2007/08. Quando a umidade crítica de compactação atingiu 0,15 kg kg<sup>-1</sup>, a produtividade máxima da soja foi de 3,89 t ha<sup>-1</sup>; à medida que aumentava a umidade do solo, a produtividade da soja decresceu do SPD9 para o SPC, ainda que a regressão polinomial tenha sido não significativa ( $p = 0,46$ ).

## CONCLUSÕES

1. Para o Latossolo Vermelho estudado, as operações mecanizadas nos sistemas de manejo podem ser executadas na faixa de 0,13 a 0,19 kg kg<sup>-1</sup> de umidade, sem causar degradação física.

2. A Dsr ótima e a umidade crítica de compactação foram de 0,86 e 0,15 kg kg<sup>-1</sup>, respectivamente, embora os diferentes sistemas e tempos de adoção de manejo tenham apresentado comportamento semelhante para a produtividade da soja.

## AGRADECIMENTO

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela bolsa de estudo concedida à primeira autora.

## LITERATURA CITADA

AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R.N. & MOTA, J.C.A. Estrutura do solo. In: AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R.N. & MOTA, J.C.A., ed. Física do solo. Fortaleza, Imprensa Universitária, 2008. p.107-133.

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

BANZATTO, D.A. & KRONKA, S.N. Experimentação agrícola. 2.ed. Jaboticabal, Funep, 1992. 247p.

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.

BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Particle density. In: KLUTE, A., ed. Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.377-382.

BOUKOUNGA, J.C. Propriedades físico-mecânicas de um Argissolo sob diferentes sistema de manejo e preparos do solo. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009. 89p. (Tese de Mestrado)

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 de Proctor. R. Bras. Ci. Solo, 30:605-614, 2006.

CARTER, M.R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on five sandy loams. Can. J. Soil Sci., 70:425-433, 1990.

CARVALHO, M.A.C.; ATHAYDE, M.L.F.; SORATTO, R.P.; ALVES, M.C. & SÁ, M.E. Adubação verde e sistemas de manejo do solo na produtividade do algodoeiro. Pesq. Agropec. Bras., 39:1205-1211, 2004.

CONAB. Acompanhamento da safra Brasileira de grãos (safra 2008/2009). Brasília, 2009. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conaweb/safra/3graos-08.09.pdf>> Acesso em: 2 jun. de 2009.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Manual de métodos de análises de solo. Rio de Janeiro, 1997. p.125-134.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. – EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B. & CURTI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. R. Bras. Ci. Solo, 23:507-514, 1999.

FIGUEIREDO, L.H.A.; DIAS JÚNIOR, M.S. & FERREIRA, M.M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. R. Bras. Ci. Solo, 24:487-493, 2000.

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

- HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil Till. Res.*, 16:105-120, 1990.
- JURY, W.A.; GARDNER, W.R. & GARDNER, W.H. *Soil physics*. 5.ed. New York, J. Wiley, 1991. 328p.
- KLEIN, V.A. *Física do solo*. Passo Fundo, Universidade de Passo Fundo, 2008. 212p.
- KLUTE, A. Water retention: Laboratory methods. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. Part.1. p.635-662.
- LINDSTRON, M.J. & VOORHEES, W.B. Response of temperature crops to soil compaction. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C., eds. *Soil compaction in crop production*. London, Elsevier, 1994. p.265-286. (*Developments in Agricultural Engineering*, 2)
- LIPIEC, J.; HÅKANSSON, I.; TARKIEWICZ, S. & KASSOWSKI, J. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. *Soil Till. Res.*, 19:307-317, 1991.
- MARCOLIN, C.D. & KLEIN, A.V. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. *Acta Sci., Agron.*, 33: 349-354, 2011.
- NOGUEIRA, J.B. *Mecânica dos solos*. Ensaios de Laboratório. São Carlos, EESC-USP, 1998. 248p.
- OHU, J.O.; FOLORUNSO, O.A.; ADENIJI, F.A. & RAGHAVAN, G.S.V. Critical moisture content as an index of compatibility of agricultural soils in Borno State of Nigeria. *Soil Technol.*, 2:211-219, 1989.
- RAIJ, B.van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J.A. *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 2001. 285p.
- RAIJ, B.van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. & FURLANI, A.M.C. *Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. 2.ed. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1997. 285p. (Boletim Técnico, 100)
- REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S. & REINERT, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C.A.; SILVA, L.S. & REICHERT, J.M., org. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v.5. p.49-134.
- SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; DIAS JUNIOR, M.S.; IMHOFF, S. & KLEIN, V.A. Indicadores da qualidade física do solo. In: JONG VAN LIER, Q., ed. *Física do solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p.241-281.
- STONE, L.F.; GUIMARAES, C.M. & MOREIRA, J.A.A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: Efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, 6:207-212, 2002.
- TORRES, E. & SARAIVA, O.F. *Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja*. Londrina, Embrapa Soja, 1999. 58p. (Circular Técnica, 23)