



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbcs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo  
Brasil

Vieira Cavalieri, Karina Maria; Alves de Carvalho, Laércio; Pires da Silva, Alvaro; Libardi, Paulo  
Leonel; Tormena, Cássio Antonio  
QUALIDADE FÍSICA DE TRÊS SOLOS SOB COLHEITA MECANIZADA DE CANA-DE-AÇÚCAR  
Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 35, núm. 5, 2011, pp. 1541-1549  
Sociedade Brasileira de Ciência do Solo  
Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180221126008>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica  
Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

## Comissão 2.2 - Física do solo

# QUALIDADE FÍSICA DE TRÊS SOLOS SOB COLHEITA MECANIZADA DE CANA-DE-AÇÚCAR<sup>(1)</sup>

Karina Maria Vieira Cavalieri<sup>(2)</sup>, Laércio Alves de Carvalho<sup>(3)</sup>, Alvaro Pires da Silva<sup>(4)</sup>, Paulo Leonel Libardi<sup>(5)</sup> & Cássio Antonio Tormena<sup>(6)</sup>

### RESUMO

A colheita mecanizada da cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) pode aumentar os riscos de degradação e perda da qualidade física dos solos. O objetivo deste estudo foi determinar o intervalo hídrico ótimo (IHO) e o índice *S* como indicadores da qualidade física de solos cultivados com cana-de-açúcar sob colheita mecanizada. Foram estudados três solos: um Latossolo Vermelho (LV) textura argilosa, um Latossolo Vermelho (LV) textura média e um Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA) textura arenosa, utilizando-se amostras das camadas de 0–0,20 m e 0,20–0,40 m de profundidade. O IHO foi maior no LV argiloso > PVA arenoso > LV textura média. No LV textura média, a densidade do solo crítica (Dsc) foi de 1,76 e 1,77 Mg m<sup>-3</sup>, respectivamente, nas camadas de 0–0,20 e 0,20–0,40 m, enquanto no PVA arenoso e no LV argiloso não se constatou Dsc, tendo em vista a amplitude de valores de densidade obtidos nas amostragens. O índice *S* apresentou valor maior que 0,050 no LV argiloso, de 0,024 no LV textura média e maior que 0,033 no PVA arenoso, indicando qualidade física muito boa, muito pobre e pobre, respectivamente. Em função dos valores de IHO e de *S* foi possível constatar que o LV textura média se apresenta mais sensível aos efeitos do manejo da cultura sob colheita mecanizada, com maiores restrições físicas para o crescimento e desenvolvimento de raízes da cultura da cana-de-açúcar.

**Termos de indexação:** Intervalo hídrico ótimo, índice *S*, densidade do solo.

---

<sup>(1)</sup> Parte de projeto de pesquisa coordenado pela primeira autora, bolsista de Desenvolvimento Científico e Tecnológico Regional – CNPq, em conjunto com a Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul. Apoio financeiro: FUNDECT e CNPq. Recebido para publicação em 20 de janeiro de 2010 e aprovado em 12 julho de 2011.

<sup>(2)</sup> Professor Adjunto do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Paraná – UFPR, Setor de Agrárias. Rua dos Funcionários 1540, CEP 80035-050 Curitiba (PR). E-mail: karina.cavalieri@ufpr.br

<sup>(3)</sup> Professor Adjunto – Pró-Reitoria de Pesquisa, Divisão de Pós-Graduação/PROPP - Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul/UEMS. Cidade Universitária de Dourados - Zona Rural. Caixa Postal 351, CEP 79804-970 Dourados (MS). E-mail: lcarvalh@uems.br

<sup>(4)</sup> Professor Titular do Departamento de Ciência do Solo da Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ. Caixa Postal 09, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). E-mail: apisilva@usp.br

<sup>(5)</sup> Professor Titular do Departamento de Ciências Exatas da Universidade de São Paulo, USP/ESALQ. E-mail: pllibardi@esalq.usp.br

<sup>(6)</sup> Professor Associado do Departamento de Agronomia da Universidade Estadual de Maringá – UEM. Av. Colombo 5790, CEP 87020-900 Maringá (PR). Bolsista do CNPq. E-mail: catormena@uem.br

## SUMMARY: SOIL PHYSICAL QUALITY OF THREE SOILS UNDER MECHANICAL SUGARCANE HARVESTING

*The mechanical harvesting of sugarcane (*Saccharum officinarum*) increases the risks of soil physical degradation. The objective of this study was to determine the least limiting water range (LLWR) and S index to evaluate the physical quality in soils under mechanically harvested sugarcane. Three soils were sampled (layers 0–0.20 and 0.20–0.40 m): clayey Oxisol (clayey LV), loam Oxisol (medium-textured LV) and a sandy Ultisol (sandy PVA). In decreasing order, the LLWR was clayey LV < sandy PVA < medium-textured LV. In the medium-textured LV, the critical bulk density (BDC) was 1.76 and 1.77 Mg m<sup>-3</sup>, respectively, in the layers 0–0.20 and 0.20–0.40 m. BDC was not observed in the sandy PVA and clayey LV, based on the range of bulk densities of the field soil samples. The S index was > 0.050 for the clayey LV, around 0.024 for the medium-textured LV and S was < 0.033 for the sandy PVA. The LLWR and S values indicated that the physical restrictions to root growth and development under mechanical sugarcane harvesting system were greatest in the medium-textured LV.*

*Index terms: least limiting water range, S index, soil bulk density.*

## INTRODUÇÃO

Os efeitos negativos da prática de queima dos canaviais, como elevada emissão de gases à atmosfera, degradação dos solos e poluição de mananciais e centros urbanos (Sparovek et al., 1997), têm levado a indústria sucroalcooleira a utilizar processos menos impactantes, visando à sustentabilidade do sistema. Entre esses processos está incluída a colheita mecanizada da cana sem queima prévia ou sem despalha a fogo, amplamente conhecida como colheita da cana crua ou cana verde. Além disso, com o sistema de colheita mecanizada sem queima, buscam-se também diminuir a erosão e o aumento do teor de matéria orgânica dos solos. Entretanto, tal sistema pode provocar compactação do solo (Blair et al., 1998) devido à maior intensidade de tráfego com máquinas de maior massa por eixo, que altera negativamente a qualidade física do solo para o crescimento e desenvolvimento radicular da cultura da cana-de-açúcar.

Uma das características do sistema de colheita mecanizada da cultura da cana-de-açúcar é a utilização de colhedoras e transbordos com massa total de 20–30 t, cujo tráfego é repetido durante os vários ciclos da cultura sob condições variáveis de conteúdo de água no solo, com elevado potencial de compactação (Braunack et al., 2006). Como consequência, o crescimento das raízes e das plantas é negativamente alterado devido ao empobrecimento da qualidade física dos solos, culminando com a redução da produtividade e, ou, encurtando o ciclo de produção da cultura. Nesse sentido, a avaliação e monitoramento da qualidade física dos solos durante o período de cultivo da cultura, que é de pelo menos sete anos, são estratégicos na definição de sistemas de manejo para diminuir a degradação estrutural e física dos solos.

O intervalo hídrico ótimo (IHO) é um indicador da qualidade física do solo em diversas culturas e

sistemas de manejo (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1999; Imhoff et al., 2001; Cavaliere et al., 2006; Tormena et al., 2007; Beutler et al., 2008). Contudo, não há estudos utilizando o IHO como indicador de qualidade física do solo sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. Outro atributo indicador da degradação estrutural e física do solo é o índice S proposto por Dexter (2004). Esse índice é baseado na curva de retenção de água do solo, e o referido autor propõe valores-limite indicativos de solos degradados e não degradados de aproximadamente  $S = 0,035$ , assim como solos com estrutura extremamente degradada  $S < 0,020$ . Estudos têm apontado que o índice S é sensível para quantificar as mudanças na qualidade física do solo impostas pelo manejo (Tormena et al., 2008; Streck et al., 2008).

A hipótese deste trabalho é de que os dois indicadores de qualidade física do solo, IHO e índice S, são eficientes em detectar a qualidade física dos solos sob cultivo mecanizado de cana-de-açúcar, uma vez que a colheita mecanizada pode degradar a estrutura do solo, resultando em empobrecimento de suas propriedades físicas, com consequente efeito sobre o crescimento e desenvolvimento vegetativo. O objetivo deste estudo foi determinar o intervalo hídrico ótimo e o índice S para avaliar a qualidade física de solos cultivados com cana-de-açúcar sob colheita mecanizada na região Centro-Sul do Estado de Mato Grosso do Sul.

## MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em área pertencente à Usina Eldorado, situada a 21°50'52" S de latitude e 53°57'49" W de longitude, localizada no município de Rio Brilhante, apresentando relevo plano a suave-ondulado. O clima da região, segundo critério de classificação de Köppen, é Cwa (clima mesotérmico úmido, verões

quentes e invernos secos), com precipitação pluvial média anual de 1.431 mm. Na área estudada foram delimitados três talhões de 12 ha cada, e os solos dessas áreas foram classificados conforme Embrapa (2006), sendo dois Latossolos Vermelhos de classes texturais distintas e um Argissolo Vermelho (Quadro 1).

A área estudada foi preparada para o plantio em 2005, quando foi realizada uma gradagem pesada seguida de aração para a incorporação de calcário ( $1 \text{ t ha}^{-1}$ ) e de gesso ( $0,5 \text{ t ha}^{-1}$ ). Em seguida, realizaram-se a gradagem niveladora e a sulcação, para o plantio da cana-de-açúcar. A adubação de plantio foi composta por  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de N,  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  de P e  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de K. Após o primeiro corte, fez-se a adubação de cobertura com vinhaça como fonte de N e K, ambos na dose de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$ . O controle de ervas daninhas foi realizado com herbicidas específicos. Nesses três ciclos de produção, a colheita foi realizada como cana crua, ou seja, sem queima ou despalha, utilizando-se colhedora de uma linha, com massa de aproximadamente 16 t, associada a um transbordo com carga máxima de 12 t.

A amostragem para a caracterização dos solos e a determinação do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e do índice S foi realizada após a colheita do terceiro ciclo de cultivo da cultura, em novembro de 2008. Amostras com estrutura indeformada foram coletadas em anéis metálicos com dimensão de 0,05 m de diâmetro e 0,05 m de altura, sendo a coleta realizada aleatoriamente em cada talhão de 12 ha, nas entrelinhas da cultura. As amostras foram retiradas no centro das camadas de 0–0,20 m e de 0,20–0,40 m de profundidade, perfazendo um total de 180 amostras, sendo 60 em cada classe de solo (30 em cada camada). As amostras foram envolvidas em papel-alumínio, acondicionadas em sacos plásticos e mantidas sob temperatura de aproximadamente  $5^\circ\text{C}$  até serem processadas.

Após o preparo, as amostras foram saturadas com água e divididas em grupos de seis, sendo três por

camada amostrada, e submetidas aos potenciais mátricos de -1, -2, -4, -6 e -8 kPa, para o que foi utilizada uma mesa de tensão, e de -10, -25, -50, -100, -400, -600 e -1.500 kPa, por meio de pressões aplicadas nas amostras em placas porosas, conforme Klute (1986). Após atingir o equilíbrio, foi determinada a massa úmida das amostras. Nos potenciais mátricos de -4, -8 e -1.500 kPa, foram usadas as mesmas amostras, que depois de pesadas eram reutilizadas em potenciais menores. A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada nas amostras de solo em diferentes conteúdos de água, por meio de um gradiente de umidade estabelecido pelos potenciais aplicados nas amostras e por tempo de evaporação. Após a determinação da RP, as amostras foram secas em estufa a  $105^\circ\text{C}$  por 24 h, para determinação do conteúdo de água ( $\theta$ ) e da densidade do solo (Ds). A RP foi medida com um penetrômetro eletrônico de bancada, como descrito por Tormena et al. (1999).

Para determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO), a curva de retenção de água do solo (CRA) e a curva de resistência deste à penetração (CRS) foram descritas matematicamente. A CRA foi estimada a partir da relação entre  $\theta$  e o potencial de água no solo ( $\psi$ ) proposta por Ross et al. (1991), ou seja:

$$\theta = a\psi^b \quad (1)$$

A variabilidade de Ds entre as amostras foi, quando significativa, incorporada ao modelo similarmente à utilizada por Silva et al. (1994) e Leão et al. (2005).

$$\ln(\theta) = \ln(a + bDs) + c\ln(\psi) \quad (2)$$

em que  $\theta$  = conteúdo de água no solo ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ); Ds = densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ); e  $\psi$  = potencial mátrico (kPa) em módulo, sendo  $a$ ,  $b$  e  $c$  coeficientes do modelo.

A CRS foi ajustada por meio de um modelo não linear (Busscher, 1990), conforme descrito na equação 3.

$$RP = d\theta^e Ds^f \quad (3)$$

**Quadro 1. Composição granulométrica, classe textural, carbono orgânico e densidade de partículas (Dp) nas duas camadas dos solos estudados**

Solos	Argila	Silte	Areia	C orgânico <sup>(1)</sup>	Dp <sup>(2)</sup>	Classe textural
				g kg <sup>-1</sup>	Mg m <sup>-3</sup>	
Camada de 0–0,20 m						
Latossolo Vermelho argiloso	501	79	420	15,73	2,88	Argila
Latossolo Vermelho textura média	292	69	639	13,01	2,74	Franco-argilo-arenoso
Argissolo Vermelho arenoso	112	47	841	9,99	2,72	Areia franca
Camada de 0,20–0,40 m						
Latossolo Vermelho argiloso	589	92	320	8,29	2,91	Argila
Latossolo Vermelho textura média	365	59	576	6,35	2,77	Argila arenosa
Argissolo Vermelho arenoso	201	39	760	4,10	2,74	Franco-argilo-arenoso

<sup>(1)</sup> Determinado conforme Raij et al. (2001). <sup>(2)</sup> Determinada utilizando-se um picnômetro a gás modelo ACCUPYC 1330 (Micromeritics Instrument Corporation®).

o qual, após a transformação logarítmica, resulta na equação 4.

$$\ln(RP) = \ln d + \ln \theta + f \ln Ds \quad (4)$$

em que RP = resistência do solo à penetração (MPa);  $\theta$  = conteúdo de água do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ); Ds = densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ); e  $d$ ,  $e$  e  $f$  = coeficientes obtidos no ajuste dos dados ao modelo. A influência da camada nos parâmetros da curva de retenção de água e da resistência do solo à penetração foi avaliada como variável “dummy”, adotando-se o valor 0 para a camada de 0–0,20 m e 1 para a de 0,20–0,40 m.

O IHO foi determinado conforme Silva et al. (1994) e Tormena et al. (1998). Em cada amostra, os valores de  $\theta$  nos limites de potencial mátrico correspondentes à capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) e ao ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) foram estimados com base na equação (2). Os potenciais adotados foram de -10 e -1.500 kPa, respectivamente para  $\theta_{CC}$  e  $\theta_{PMP}$  (Reichardt, 1988). O conteúdo de água em que a RP é igual a 3 MPa ( $\theta_{RP}$ ), valor considerado limitante do crescimento de raízes de gramíneas (Leão et al., 2006), foi estimado por meio da CRS, descrita pela equação 4. O conteúdo de água em que a porosidade de aeração é de 10 % ( $\theta_{PA}$ ) foi obtida utilizando-se a densidade do solo e de partículas -  $[(1-(Ds/Dp)-0,1)]$ , em que Dp é a densidade de partículas, determinada por um picnômetro a gás, modelo ACCUPYC 1330 (Micromeritics Instrument Corporation®). O valor 0,1 corresponde a 0,1  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  ou 10 % de poros com ar necessário para que ocorra adequada aeração do solo (Silva et al., 1994). O valor de capacidade de água disponível no solo (CAD) foi estimado como a diferença entre  $\theta_{CC}$  e  $\theta_{PMP}$ . O índice  $S$  foi estimado conforme Dexter (2004), utilizando-se a função de van Genuchten (1980) para descrever a CRA (Equação 5). A partir do ajuste da equação 5 aos dados, o valor de  $S$  foi calculado por meio da equação 6.

$$U = U_{res} + \frac{(U_{sat} - U_{res})}{[1 + (\alpha|\psi|)^n]^{1-\frac{1}{n}}} \quad (5)$$

$$S = -n (U_{sat} - U_{res}) \left[ \frac{2n-1}{n-1} \right]^{\left(\frac{1}{n}\right)-2} \quad (6)$$

em que  $U$  = conteúdo de água no solo em base de massa ( $\text{kg kg}^{-1}$ ),  $U_{res}$  = conteúdo de água residual ( $\text{kg kg}^{-1}$ ),  $U_{sat}$  = conteúdo de água do solo na saturação ( $\text{kg kg}^{-1}$ ),  $\psi$  = potencial matricial (hPa) e  $\alpha$  e  $n$  = parâmetros empíricos do modelo e  $S$  corresponde ao valor absoluto da equação 6.

Fizeram-se os ajustes dos modelos das CRA e CRS pelo método de regressão linear, com a rotina PROC REG, empregando o programa estatístico SAS (SAS, 2000). A significância dos coeficientes das equações 2 e 4 foi avaliada pelo Teste  $t$ , enquanto na equação 5 a significância dos coeficientes do modelo foi atribuída quando não houve ocorrência do valor 0 dentro dos

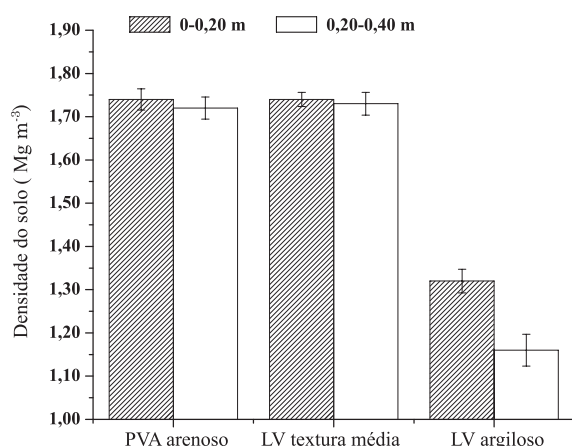
limites de confiança (Glantz; Slinker, 1990). As médias de densidade do solo e do índice  $S$  foram comparadas entre camadas, por meio do intervalo de confiança ( $IC_{95\%} = M \pm DP (t_{95\%})$ ) (Masson; Loftus, 2003).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os teores de C orgânico do solo decresceram com a diminuição no conteúdo de argila nos solos e em profundidade (Quadro 1). Os teores de C orgânico no LV textura média, na camada de 0–0,20 m, foram superiores àqueles constatados por outros autores em solo em condições de manejo similares às deste estudo (Souza et al., 2005). No entanto, na camada de 0,20–0,30 m esses mesmos autores conseguiram valores muito parecidos àqueles obtidos neste estudo na camada de 0,20–0,40 m. Na camada de 0–0,20 m, Souza et al. (2009) verificaram valores médios de C orgânico de 9,35 e 15,70  $\text{g kg}^{-1}$ , respectivamente, no LV textura média e no LV argiloso, cultivados em sistema de preparo convencional por 30 anos, enquanto na camada de 0,20–0,40 m os valores médios foram de 8,15 e 13,41  $\text{g kg}^{-1}$ . Luca et al. (2008) obtiveram valores médios de 8,6 e 6,9  $\text{g kg}^{-1}$  de C orgânico, respectivamente nas camadas de 0–0,20 e 0,20–0,40 m de Argissolo Vermelho-Amarelo, resultados esses similares aos encontrados no PVA arenoso cultivado por várias décadas e atualmente sob colheita mecanizada. É importante ressaltar que o incremento de C orgânico na camada subsuperficial de ambos os solos foi menor neste estudo, o que pode ser devido ao menor tempo de cultivo da cana-de-açúcar. Com a colheita mecanizada sem queima, houve tendência de acúmulo de C orgânico na superfície, o que explica o resultado, superior ou igual, na camada de 0–0,20 m nos solos estudados (Quadro 1).

Os valores médios de Ds foram de 1,32; 1,74; e 1,74  $\text{Mg m}^{-3}$  na camada de 0–0,20 m e de 1,16; 1,73; e 1,72  $\text{Mg m}^{-3}$  na de 0,20–0,40 m, respectivamente no LV argiloso, no LV textura média e no PVA arenoso (Figura 1). Os valores médios de Ds no LV textura média e no PVA arenoso foram maiores do que aqueles constatados por Souza et al. (2005) e Ceddia et al. (1999) em solos e camadas estudadas similares aos deste estudo. Luca et al. (2008) apresentaram valores de Ds acima de 1,70  $\text{Mg m}^{-3}$  em solo similar ao PVA arenoso sob colheita mecanizada, o que corrobora os resultados deste estudo. Em relação ao LV argiloso, Souza et al. (2009), estudando um solo similar cultivado há mais de 30 anos com cana queimada, obtiveram valores médios de Ds de 1,38 e 1,41  $\text{Mg m}^{-3}$ , respectivamente nas camadas de 0–0,20 e 0,20–0,40 m de profundidade, cujos valores foram superiores aos verificados neste trabalho, principalmente em comparação com a camada de 0,20–0,40 m, apesar de que a área utilizada por aqueles autores estava no quinto ciclo de cultivo sob sistema de colheita de cana





**Figura 1. Valores médios de densidade do solo no PVA arenoso, LV textura média e LV argiloso nas duas camadas estudadas. As barras indicam o intervalo de confiança entre camadas (95 %).**

queimada. Nesse sentido, a presença da palhada após a colheita mecanizada e o número reduzido de ciclos de cultivo na obtenção dos dados podem ter contribuído para diminuir ainda mais os valores de  $D_s$  no LV argiloso.

As equações de ajuste das CRA obtidas para estimar os conteúdos de água na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP) no LV argiloso, no LV textura média e no PVA arenoso estão descritas, respectivamente, nas equações 7, 8 e 9.

$$\theta = e^{(-1,0087 + 0,2738 * D_s)} \quad (7)$$

$$\theta = e^{(-0,8910)} \psi^{-0,0803} \quad (8)$$

$$\theta = e^{(-0,8821)} \psi^{-0,1038} \quad (9)$$

em que  $e$  = base do logaritmo neperiano,  $\theta$  = conteúdo de água do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ),  $\psi$  = potencial mátrico (kPa) e  $D_s$  = densidade do solo. Os coeficientes do modelo foram significativos ( $p > 0,01$ ), e somente o LV argiloso apresentou efeito significativo da densidade no modelo da CRA. Não foram constatados efeitos estatisticamente significativos das camadas de solo.

Os coeficientes obtidos no modelo ajustado para CRA nos solos estudados foram diferentes entre estes, o que resultou em valores de conteúdo de água na CC e PMP distintos nesses solos. O conteúdo de argila e de C orgânico dos diferentes solos é um fator que pode ter influenciado diretamente a CRA. Aumento no conteúdo de argila geralmente proporciona valores de CC e PMP mais elevados em razão, principalmente, do incremento da porosidade do solo resultante da maior agregação, o que eleva a quantidade de poros responsáveis pela retenção de água nos limites da água disponível (CAD). O LV argiloso apresentou a maior faixa de CAD entre os solos, seguido do PVA arenoso e

do LV textura média. No LV textura média, o conteúdo de água retido no PMP foi maior, mas isso não ocorreu com CC, justificando a menor amplitude da CAD nesse solo. Assim, observou-se que o conteúdo de C orgânico verificado no LV textura média, mesmo sendo maior que no PVA arenoso, não foi suficiente para aumentar a retenção de água no solo, uma vez que, mesmo com menores quantidades de C orgânico e menor conteúdo de argila, o PVA arenoso apresentou melhor disponibilidade de água às plantas. Isso sugere que a degradação física do LV textura média pode comprometer sua funcionalidade em decorrência da redução da CAD para as plantas.

A  $D_s$  não influenciou no ajuste dos dados da CRA ao modelo, em relação ao LV textura média e ao PVA arenoso, à semelhança dos resultados obtidos por Imhoff et al. (2001) em Argissolo Vermelho-Amarelo franco-arenoso. No entanto, no ajuste do modelo da CRA para o LV argiloso ocorreu efeito significativo de  $D_s$ , concordando com os resultados de diversos autores (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998, 2007; Beutler et al., 2008).

As equações descritivas da CRS para o LV argiloso, o LV textura média e o PVA arenoso são apresentadas nas equações 10, 11 e 12, respectivamente.

$$RP = 0,0041 D_s^{5,3446} \theta^{-3,5725} \quad (10)$$

$$RP = 0,0017 D_s^{6,3753} \theta^{-2,8689} \quad (11)$$

$$RP = 0,0199 D_s^{4,1629} \theta^{-1,5075} \quad (12)$$

em que  $RP$  = resistência à penetração do solo (MPa),  $D_s$  = densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) e  $\theta$  = conteúdo de água do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ). Também, não foram constatados efeitos significativos das camadas de solo sobre o ajuste dos modelos de CRA nos solos estudados.

O efeito da  $D_s$  e do conteúdo de água do solo sobre a CRS foi distinto entre os solos. Matematicamente, os valores de  $RP$  são mais elevados no LV argiloso, seguido do LV textura média e do PVA arenoso. Mas, como a amplitude de  $D_s$  e  $\theta$  difere entre os solos, a  $RP$  pode não se apresentar limitante em conteúdos de água acima do PMP, considerado limite inferior da CAD. A influência do incremento do conteúdo de argila sobre a  $RP$  se deve ao aumento das forças coesivas do solo; entretanto, a formação de poros entre e intra-agregados atenuam os efeitos do teor de argila sobre a  $RP$ . Os valores similares de  $D_s$  entre o LV textura média e o PVA arenoso, com conteúdos de argila distintos entre si, sugerem que o manejo empregado na colheita de cana com a utilização de colhedora mecanizada tenha promovido redução na porosidade do LV textura média, equivalendo-se à porosidade do PVA arenoso em ambas as camadas. Assim, a maior coesão entre partículas não foi compensada pela porosidade, levando-se a um aumento da  $RP$  nesse solo. Isso pode ser indicio dos efeitos causados pela compactação com o tráfego de máquinas pesadas durante a colheita.

Os resultados indicaram que o IHO variou entre 0,082 e 0,122  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  no LV argiloso, valores esses superiores ao do PVA arenoso, cujos valores se apresentaram entre 0,022 e 0,104  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , e do LV textura média, no qual o IHO variou entre 0 e 0,094  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  (Figura 2). Entre as camadas não foram verificadas diferenças estatisticamente significativas entre os valores médios do IHO. O limite superior do IHO no LV argiloso foi definido pela  $\theta_{CC}$  em toda a faixa de densidades e nas duas camadas amostradas, o que indica que a aeração permanece adequada quando esse solo se encontra na CC, adotando-se o valor mínimo de poros com ar de 10 %. Em ambas as camadas de 0–0,20 e 0,20–0,40 m de profundidade, a  $\theta_{RP}$  definiu o limite inferior do IHO em densidades acima de 1,24  $\text{Mg m}^{-3}$ , enquanto em valores de Ds inferiores a esse o IHO equivale a CAD. Tais resultados indicam que o LV argiloso tem mantido a qualidade física do solo em valores de Ds menores que 1,24  $\text{Mg m}^{-3}$ . Entretanto, o efeito da RP sobre o IHO,

em ambas as camadas, sinaliza para o processo de degradação física do solo, pois começa a restringir a faixa de água onde as raízes podem crescer e se desenvolver dentro da amplitude da CAD. Souza et al. (2009) constataram valores de RP iguais ou acima de 4,4 MPa em solo e camadas similares, porém sob a colheita manual de cana queimada, indicando restrições físicas severas às raízes. Contudo, esses autores não informaram a umidade do solo no momento da determinação da RP.

O IHO no PVA arenoso foi definido por  $\theta_{CC}$  e  $\theta_{PA}$  no limite superior e por  $\theta_{PMP}$  e  $\theta_{RP}$  no limite inferior. Com valores de Ds inferiores a 1,67  $\text{Mg m}^{-3}$ , o IHO foi igual a CAD, e a partir desses valores de Ds o conteúdo de água para manter a RP crítica superou o  $\theta_{PMP}$ , reduzindo o IHO. A  $\theta_{PA}$  tornou-se o limite do IHO para valores de Ds acima de 1,77  $\text{Mg m}^{-3}$ , indicando que o aumento da Ds diminuiu o IHO tanto no limite superior quanto no limite inferior, pelo seu efeito sobre  $\theta_{RP}$  e  $\theta_{PA}$ . Imhoff et al. (2001) constataram, na camada

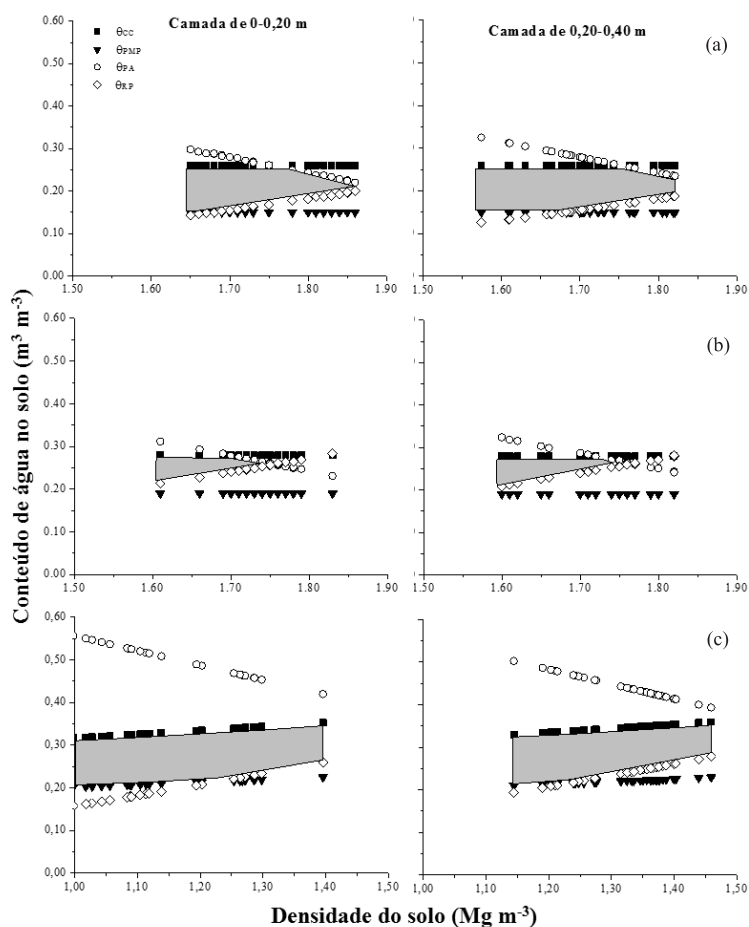


Figura 2. Conteúdo de água no solo ( $\theta$ ) em função da densidade do solo no PVA arenoso (a), no LV textura média (b) e no LV argiloso (c), nos valores críticos de capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ), ponto de murcha permanente ( $\theta_{pmp}$ ), porosidade de aeração 0,10  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  ( $\theta_{pa}$ ) e resistência à penetração de 3 MPa ( $\theta_{rp}$ ). A área hachurada representa o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO).

de 0–0,10 m de um Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar, que o IHO foi definido por  $\theta_{RP}$  no seu limite inferior em todas as faixas de  $D_s$  (1,50–1,73  $\text{Mg m}^{-3}$ ) encontradas naquele solo, evidenciando maiores restrições físicas causadas pela RP em comparação com os resultados deste estudo. No LV textura média, o limite inferior do IHO foi definido pela  $\theta_{RP}$  em toda a faixa de densidades. Resultados obtidos por Severiano et al. (2009) em Latossolo Vermelho-Amarelo textura média sob cultivo convencional antes do primeiro corte indicaram que o IHO foi definido por  $\theta_{CC}$  e  $\theta_{PMP}$ . Contudo, esses autores salientaram que esse solo se apresentou mais suscetível à compactação, considerando outros parâmetros analisados. Em relação ao limite superior do IHO no LV textura média, ele foi determinado pela  $\theta_{PA}$  para valores de  $D_s$  acima de 1,70  $\text{Mg m}^{-3}$ , indicando que a redução do IHO ocorreu com maior intensidade no LV textura média, em comparação com os demais solos estudados. Valores reduzidos de IHO podem expor as culturas a condições físicas do solo inadequadas, por falta ou excesso de água (Silva et al., 1997).

Os resultados de IHO obtidos no LV textura média foram muito similares àqueles encontrados por Leão et al. (2006) sob pastejo rotacionado em estudo realizado no Cerrado sul-mato-grossense, em LV com 40 % de argila. Esses mesmos autores constataram IHO entre 0,102 e 0,126  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  no Cerrado nativo. De acordo com tal resultado, considera-se que o manejo dos canaviais tem levado à degradação da estrutura e, portanto, diminuído a qualidade física do solo. Valores reduzidos de IHO, entre 0 e 0,0545  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , foram verificados por Imhoff et al. (2001) em Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. Contudo, esses autores usaram o valor crítico de RP de 2 MPa, o que influenciou diretamente no limite inferior do IHO sobre os resultados. Valores entre 0 e 0,1408  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  em um solo franco-siltoso e entre 0,0537 e 0,1326  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  em areia franca foram constatados por Silva et al. (1994) utilizando a RP crítica de 2 MPa. Isso indica que os valores de IHO encontrados por esses autores seriam maiores caso a RP crítica fosse a mesma usada neste estudo.

A relação entre o IHO e a  $D_s$  está apresentada na figura 3. No LV argiloso e no PVA arenoso ocorrem valores crescentes e constantes, respectivamente, em determinada faixa de  $D_s$ , que depois decrescem com o aumento desta. No LV textura média, a redução do IHO ocorreu com o aumento de  $D_s$  em toda a faixa de  $D_s$  medida neste solo. Nos solos LV argiloso e PVA arenoso não foram constatados  $D_s$ , em que IHO = 0, ou seja, a densidade crítica ( $D_{sc}$ ) é inexistente. Entretanto, no LV textura média a  $D_{sc}$  foi de 1,76 e 1,77  $\text{Mg m}^{-3}$ , respectivamente, em ambas as camadas de 0–0,20 e 0,20–0,40 m.

O índice  $S$  apresentou o mesmo comportamento verificado no IHO, com maiores valores médios no LV argiloso, seguido do PVA arenoso e do LV textura

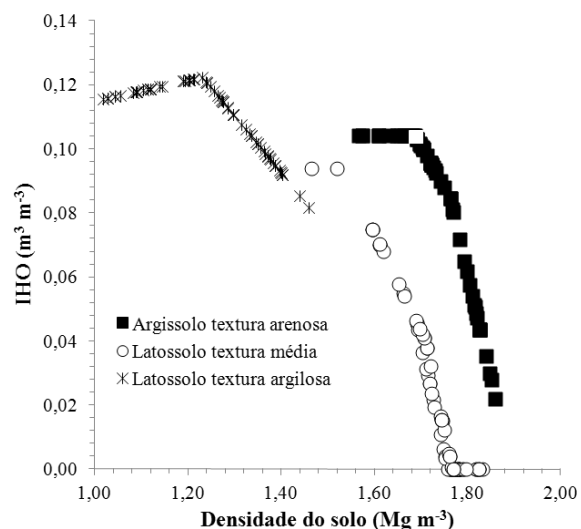


Figura 3. Intervalo hídrico ótimo (IHO) em função da densidade dos três solos estudados.

média (Figura 4). O LV argiloso apresentou valores médios superiores a 0,050, enquanto no PVA arenoso, na camada de 0–0,20 m, o  $S$  não ultrapassou 0,033, ficando abaixo de 0,024 nas duas camadas do LV textura média. Os solos PVA arenoso e LV textura média não mostraram diferença estatisticamente significativa entre camadas para o índice  $S$ , enquanto no LV argiloso os maiores valores de  $S$  foram verificados na camada de 0,20–0,40 m de profundidade. Isso evidencia que, nesse solo, as melhores condições físicas se encontram abaixo da camada de 0–0,20 m, muito provavelmente devido ao confinamento dos efeitos do tráfego pesado na camada superficial. Schäfer-Landefeld et al. (2004) investigaram o efeito de uma passada de máquina com altas cargas de eixo (15–25 Mg) sobre as propriedades físicas de solos das classes texturais variando de areia franca a argilo-franco-siltoso, manejados convencionalmente. Concluíram que o tráfego dessas máquinas não causou danos ao subsolo (abaixo de 0,30 m), mesmo em condições de alta umidade do solo. Entretanto, Ehlers et al. (2005) salientaram o cuidado que se deve ter diante de tal afirmação, uma vez que os efeitos do tráfego podem ser aditivos e múltiplas passadas podem causar danos severos.

Valores médios de  $S$  abaixo de 0,035 indicam degradação física do solo, os quais foram verificados na camada de 0–0,20 m do PVA arenoso e em ambas as camadas do LV textura média. Conforme relatou Dexter (2004), valores de  $S < 0,022$  indicam estrutura física extremamente degradada, e o LV textura média apresentou valores médios próximos a esses. Nesse sentido, o comportamento físico do solo descrito pelo índice  $S$  foi similar ao IHO, com valores médios que indicam boa qualidade física do solo no LV argiloso, em ambas as camadas estudadas, e poucas restrições



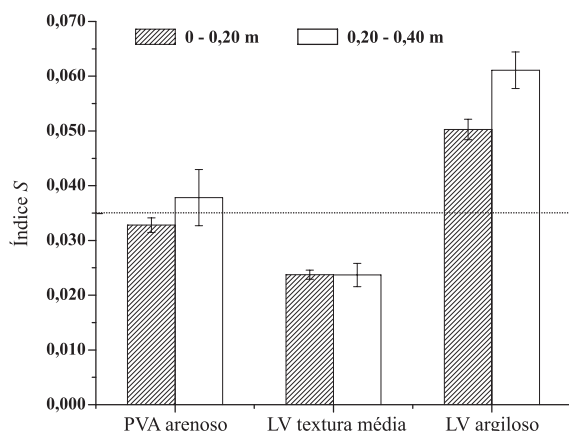


Figura 4. Valores médios de  $S$  dos três solos estudados. As barras indicam o intervalo de confiança (95 %).

na camada de 0,20–0,40 m no PVA arenoso, à medida que, na camada de 0–0,20 m nesse solo e em ambas as camadas do LV textura média, as restrições físicas aumentam. Tais resultados contribuem para a indicação do índice  $S$  na avaliação da qualidade física de solos cultivados com cana-de-açúcar, uma vez que o IHO já é um índice consolidado nesse tipo de avaliação.

A ocorrência de valores elevados de  $D_s$ , aliada ao IHO e ao índice  $S$ , sugere que a degradação da qualidade física do LV textura média em ambas as camadas e do PVA arenoso na camada de 0–0,20 m possa comprometer a produtividade da cultura em períodos de estiagem. Nessas condições, a quantidade de água é insuficiente para manter os níveis adequados de sua disponibilidade e resistência à penetração de raízes, enquanto em períodos chuvosos a aeração pode ser comprometida. Além disso, a ocorrência frequente da  $D_{sc}$  e os valores de  $S$  próximos de 0,022 no LV textura média indicam sérias restrições físicas para o crescimento e desenvolvimento das raízes de cana-de-açúcar nas condições estudadas.

## CONCLUSÕES

1. A densidade do solo foi similar entre o PVA arenoso e o LV textura média, em ambas as camadas estudadas (entre 1,72 e 1,74 Mg m<sup>-3</sup>), enquanto no LV argiloso ela não ultrapassou os valores médios de 1,16 e 1,32 Mg m<sup>-3</sup> nas camadas de 0–0,20 e 0,20–0,40 m, respectivamente.

2. Os solos estudados apresentaram valores de IHO maiores no LV argiloso, seguido do PVA arenoso e do LV textura média. Somente o LV textura média apresentou densidade crítica para a faixa das densidades obtidas.

3. O índice  $S$  indicou boa qualidade física do LV argiloso e a ocorrência de degradação física do solo no PVA arenoso na camada de 0–0,20 m e no LV textura média em ambas as camadas estudadas. Já o LV argiloso apresentou boa qualidade física pelo índice  $S$ .

4. O comportamento físico do solo descrito pelo índice  $S$  foi similar ao do IHO, indicando que o solo com maiores restrições físicas foi o LV textura média.

## AGRADECIMENTOS

À Usina Eldorado, pela cessão da área estudada e pelo apoio técnico; à Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul (FUNDECT), pelo apoio financeiro; e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de Desenvolvimento Científico Regional (DCR), que possibilitou a realização deste estudo.

## LITERATURA CITADA

- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P.; CENTURION, M.A.P.C.; LEONEL, C.L. & FREDDI, O.S. Soil compaction by machine traffic and least limiting water range related to soybean yield. *Pesq. Agropec. Bras.*, 43:1591-1600, 2008.
- BLAIR, G.J.; CHAPMAN, L.; WHITBREAD, A.M.; BALLCOELHO, B.; LARSEN, P. & TIESSEN, H. Soil carbon changes resulting from sugarcane trash management at two locations in Queensland, Australia, and in North-East Brazil. *Austr. J. Soil Res.*, 36:873-882, 1998.
- BRAUNACK, M.V.; ARVIDSSON, J. & HÅKANSSON, I. Effect of harvest traffic position on soil conditions and sugarcane (*Saccharum officinarum*) response to environmental conditions in Queensland, Australia. *Soil Tillage Res.*, 89:103-121, 2006.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 3:519-524, 1990.
- CAVALIERI, K.M.V.; TORMENA, C.A.; VIDIGAL FILHO, P.S.; GONÇALVES, A.C.A. & DA COSTA, A.C.S. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:137-147, 2006.
- CEDDIA, M.B.; ANJOS, L.H.C.; LIMA, E.; RAVELLI NETO, A. & SILVA, L.A. Sistemas de colheita da cana-de-açúcar e alterações nas propriedades físicas de um solo Podzólico Amarelo no Estado do Espírito Santo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 34:1467-1473, 1999.
- DEXTER, A.R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120:201-214, 2004.

- EHLERS, W. Letter to the Editor. *Soil Tillage Res.*, 80:251-254, 2005.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- GLANTZ, S.A. & SLINKER, B.K. Primer of applied regression and analysis of variance. New York, McGraw-Hill, 1990. 770p.
- IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JUNIOR, M.S. & TORMENA, C.A. Quantificação das pressões críticas para o crescimento das plantas. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:11-18, 2001.
- KLUTE, A. Water retention: Laboratory methods. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.635-660.
- LEÃO, T.P.; DA SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S. & EUCLIDES, V.P.B. Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. *Soil Tillage Res.*, 88:279-285, 2006.
- LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; PERFECT, E. & TORMENA, C.A. An algorithm for calculating the least limiting water range of soil using SAS. *Agron. J.*, 97:1210-1215, 2005.
- LUCA, E.F.; FELLER, C.; CERRI, C.C.; BARTHÈS, B.; CHAPLOT, V.; CAMPOS, D.C. & MANECHINI, C. Avaliação de atributos físicos e estoques de carbono e nitrogênio em solos com queima e sem queima de canavial. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:789-800, 2008.
- MASSON, M.E.J. & LOFTUS, G.R. Using confidence intervals for graphically based data interpretation. *Canadian J. Exper. Psych.*, 57: 203-220, 2003.
- RAIJ, B.van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA H. & QUAGGIO, J.A. Análise química para avaliação da fertilidade de solo tropicais. Campinas, Instituto Agrônômico, 2001. 285p.
- REICHARDT, K. Capacidade de campo. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:211-216, 1988.
- ROSS, P.J.; WILLIAMS, J. & BRISTOW, K.L. Equations for extending water-retention curves to dryness. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55:923-927, 1991.
- SAS Institute Incorporation. SAS/GRAPH® 2000. Software: Reference, Version 8. Cary, 2000. v.2 1272p.
- SCHÄFER-LANDEFELD, L.; BRANDHUBER, R.; FENNER, S.; KOCH, H.-J. & STOCKFISCH, N. Effects of agricultural machinery with high axle load on soil properties of normally managed fields. *Soil Tillage Res.*, 75:75-86, 2004.
- SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; OLIVEIRA, L.F.C. & CASTRO, M.B. Pressão de preconsolidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais de um Latossolo e de um Cambissolo sob cana-de-açúcar. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:1419-1427, 2008.
- SILVA, A.P. & KAY, B.D. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:884-888, 1997.
- 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.
- SOUZA, Z.M.; MARQUES JUNIOR, J. & PEREIRA, G.T. Spatial variability of the physical and mineralogical properties of the soil from the areas with variation in landscape shapes. *Braz. Arch. Biol. Technol.*, 52:305-316, 2009.
- SOUZA, Z.M.; PRADO, R.M.; PAIXÃO, A.C.S. & CESARIN, L.G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. *Pesq. Agropec. Bras.*, 40:271-278, 2005.
- SPAROVEK, G.; ALLEONI, L.R.F.; PEREIRA, J.C. & ROSSETO, R. Aptidão das terras de Piracicaba para o corte mecanizado de cana-de-açúcar. *STAB Açúcar, Álcool Subp.*, 15:14-17, 1997.
- STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & HORN, R. Relações do parâmetro S para algumas propriedades físicas de solos do sul do Brasil. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:2603-2612, 2008.
- TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J. & COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférrico sob sistemas de plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:211-219, 2007.
- 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 Tillage Res.*, 52:223-232, 1999.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S. & DEXTER, A.R. Quantification of the soil physical quality of a tropical Oxisol using the S index. *Sci. Agric.*, 65:56-60, 2008.
- van GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-898, 1980.

