

## INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO EM ÁREA DE CANA-DE-AÇÚCAR COM DIFERENTES CICLOS DE COLHEITA MECANIZADA

OSWALDO JULIO VISCHI FILHO<sup>1</sup>; ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA<sup>1</sup>;  
GUSTAVO SOARES DE SOUZA<sup>2</sup>; ALLAN CHARLLES MENDES DE SOUSA<sup>1</sup> E  
REGINALDO BARBOZA DA SILVA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratório de Solos, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, ovischi@gmail.com, zigomarms@feagri.unicamp.br, allancharlles-2@hotmail.com

<sup>2</sup>Fazenda Experimental Bananal do Norte, Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural, gustavo.souza@incaper.es.gov.br

<sup>3</sup>Coordenadoria Executiva, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Campus de Registro, SP, rbsilva@registro.unesp.br

### 1 RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade física do solo, por meio do intervalo hídrico ótimo (IHO), visando diagnosticar o comportamento estrutural de solo sob cultivo de cana-de-açúcar crua em diferentes ciclos produtivos. O experimento foi desenvolvido em lavoura comercial de cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho distrófico (LVd) com textura média. Os tratamentos foram: um (CM1) e três (CM3) ciclos produtivos da lavoura (em média seis anos por ciclo) com colheita mecanizada. O solo foi amostrado nas linhas de plantio e nas entrelinhas, distante 0,30 m da linha de plantio, nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m. A qualidade física do solo foi avaliada por meio do IHO. O IHO foi maior no sistema de colheita mecanizada com três ciclos (CM3), quando relacionado com o sistema com um ciclo (CM1), sugerindo que esse sistema contribuiu para a melhoria das condições físicas do solo avaliado como densidade, porosidade, resistência do solo à penetração e capacidade de armazenamento de água. A maior faixa de água não limitante ao desenvolvimento radicular da cana no sistema CM3 foi decorrente da utilização efetiva do preparo mínimo da linha de plantio, permitindo uma recuperação dos atributos físicos do solo. O IHO foi maior na linha de plantio em relação à entrelinha.

**Palavra-Chave:** *Saccharum officinarum*, água no solo, qualidade física do solo, resistência do solo à penetração.

**VISCHI FILHO, O. J.; SOUZA, Z. M.; SOUZA, G. S.; SOUSA, A. C. M.; SILVA, R. B.  
LEAST LIMITING WATER RANGE ON SUGARCANE AREA WITH DIFFERENT  
CYCLES OF MECHANICAL HARVEST**

### 2 ABSTRACT

The present study aimed to assess the soil physical quality, through Least Limiting Water Range (LLWR), aiming to diagnose the soil structural behavior, under sugarcane cultivation at different times of handling. The experiment was conducted on a sugarcane commercial farming on Oxisol Typic Acrudox with medium texture. The treatments were: one (CM1) and

three (CM3) handling cultivation cycles (six years average for cycle) through mechanical harvest system. Soil samples were collected on the planting rows and on between rows, distance of 0.30 m from planting rows, at layers of 0.00-0.10; 0.10-0.20; 0.20-0.30 e 0.30-0.40 m. Soil physical quality was assessed by LLWR. The LLWR was higher in mechanical harvesting system with three cycles (CM3), when related to one cycle system (CM1), suggesting that this system has contributed for the improvement of assessed soil physical conditions such as bulk density, soil porosity, soil resistance to penetration and water storage. The largest LLWR at sugarcane root development on CM3 system was due to the effective use of row planting reduced tillage, allowing recovery of soil physical properties. The LLWR was higher on planting rows than between rows.

**Keywords:** *Saccharum officinarum*, soil water, soil physical quality, soil resistance to penetration.

### 3 INTRODUÇÃO

A adoção da colheita mecanizada de cana-de-açúcar é inevitável no atual sistema produtivo, visto a falta de mão de obra e a necessidade de baixar os custos de produção, mantendo a sustentabilidade ambiental da cultura com ausência do fogo. Portanto, a colheita de cana sem queima é uma realidade cada vez mais presente para a produção da cana-de-açúcar, tanto no estado de São Paulo, como no Brasil. Atualmente, há uma grande preocupação com o aumento das áreas agrícolas com problemas de compactação de solo, o que em parte se deve às operações mecanizadas realizadas sem considerar o teor de água no solo (SILVA et al., 2006; SUZUKI et al., 2008; SOUZA et al., 2012). Hoje, em muitos canaviais brasileiros, a compactação do solo é um fator limitante, havendo a necessidade de estudos visando minimizar seus efeitos no desenvolvimento das plantas. Tal fato está relacionado com o intenso tráfego de máquinas, principalmente em condições de umidade favorável à compactação (IMHOFF et al., 2001; SUZUKI et al., 2008; SOUZA et al., 2012). Contudo, o efeito acumulativo do tráfego de máquinas no manejo dos canaviais ainda não foi totalmente elucidado, bem como a preservação e, ou a recuperação da estrutura do solo, proporcionada pelo aporte de material vegetal ao longo dos ciclos produtivos com a colheita mecanizada e sem queima.

O intervalo hídrico ótimo (IHO) é um atributo do solo sensível aos efeitos da compactação do solo, sendo sugerido como indicador de qualidade física do solo que influencia diretamente no desenvolvimento e produtividade das culturas (BLAINSKI et al., 2008; KAISER et al., 2009; FIDALSKI et al., 2010; SOUZA et al., 2015). O IHO do solo engloba informações sobre resistência do solo à penetração, disponibilidade de água e aeração do solo (SILVA et al., 1994; ROQUE et al., 2011), indicando assim o conteúdo de água onde as limitações são mínimas ao desenvolvimento das culturas (SOUZA et al., 2015).

Dos fatores que integram o IHO, a umidade em que há resistência do solo à penetração de raízes é a propriedade que mais frequentemente reduz o IHO (SILVA et al., 1994; KLEIN & CAMARA, 2007; OTTO et al., 2011). A amplitude do IHO indica o risco de exposição das culturas ao estresse físico do solo e a magnitude em que a condição estrutural restringe o crescimento e o desenvolvimento das plantas (CAVALIERI et al., 2011; SOUZA et al., 2015). Solos com estrutura preservada apresentam menores restrições quanto ao déficit hídrico. Entretanto, quando a compactação atinge níveis excessivos, a aeração torna-se deficiente sob condições de elevados conteúdos de água, enquanto a resistência do solo à

penetração pode restringir o crescimento das plantas com o ressecamento do solo (LAPEN et al., 2004; SOUZA et al., 2015).

Considerando tais aspectos, é importante, no processo preventivo da degradação das áreas agrícolas cultivadas com cana-de-açúcar, caracterizar o IHO de acordo com os ciclos produtivos e conteúdo de água no solo. Estudos sobre a compactação e a sustentabilidade estrutural dos solos nos sistemas de produção de cana-de-açúcar utilizados atualmente, são necessários, para a construção e a manutenção da capacidade produtiva desses solos, adequação do parque de maquinário e a consequente longevidade do setor sucroenergético brasileiro.

A hipótese do trabalho é que o tráfego de máquinas no canavial, principalmente na colheita, proporciona efeito acumulativo ao longo dos ciclos da cultura, degradando a qualidade física do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico, por meio do IHO, visando diagnosticar o comportamento estrutural do solo sob cultivo de cana-de-açúcar crua e com colheita mecanizada com diferentes ciclos produtivos.

#### 4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado em áreas pertencentes à Usina São Martinho, situada a 21°19'13,7" de latitude sul e 48°07'14,0" de longitude oeste, localizada no município de Pradópolis, SP. O solo da área é um Latossolo Vermelho distrófico (LVd), textura média (EMBRAPA, 2013), com teor médio de argila de 315 g kg<sup>-1</sup> (Tabela 1) e relevo variando de plano a suave-ondulado.

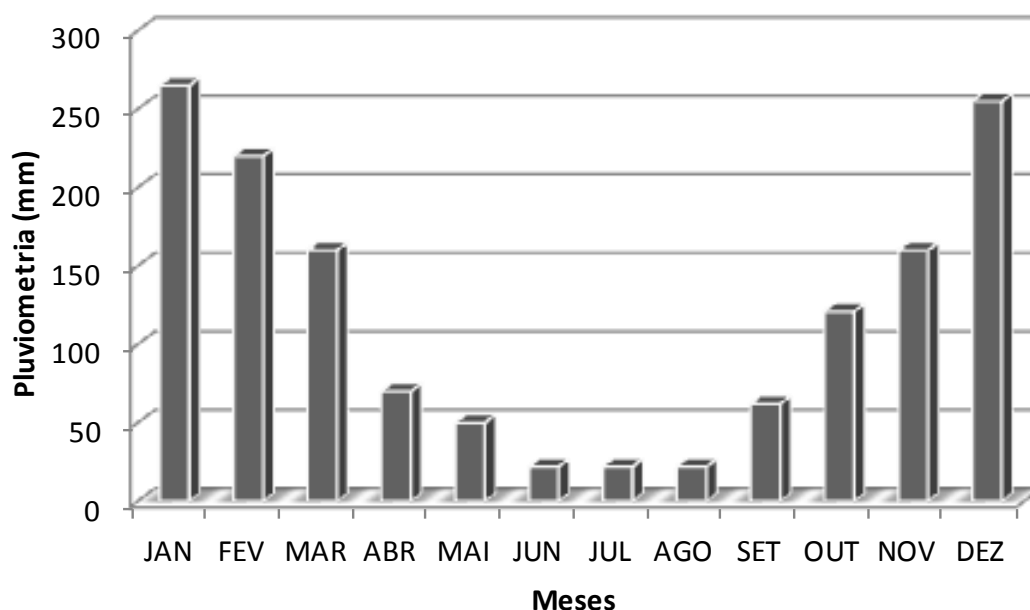
**Tabela 1.** Caracterização química<sup>(1)</sup> e granulométrica<sup>(2)</sup> do Latossolo Vermelho nas áreas dos tratamentos (CM1 e CM3), nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40m.

Camada (m)	pH CaCl <sub>2</sub>	pH H <sub>2</sub> O	P mg dm <sup>-3</sup>	K mmolc. dm <sup>-3</sup>	Ca	Mg	H+Al	CTC	V %	MO	Argila g kg <sup>-1</sup>	Silte	Areia
<b>CM1</b>													
0,00-0,10	5,6	6,4	6,0	0,3	3,2	1,1	1,7	6,27	73	1,7	315	80	605
0,10-0,20	5,4	6,1	8,0	0,1	2,6	0,9	2,1	5,72	63	1,5	310	84	606
0,20-0,30	4,7	5,4	6,0	0,1	1,2	0,5	3,1	4,89	37	1,7	315	82	603
0,30-0,40	4,4	5,1	5,0	0,0	0,7	0,3	3,6	4,64	22	1,4	321	84	595
<b>CM3</b>													
0,00-0,10	4,8	5,5	23,0	0,1	2,1	0,8	2,9	5,94	51	2,2	303	81	616
0,10-0,20	4,6	5,3	18,0	0,1	1,3	0,5	3,4	5,27	35	1,5	309	81	610
0,20-0,30	4,6	5,3	14,0	0,1	1,6	0,5	3,3	5,48	40	2,1	318	82	600
0,30-0,40	4,9	5,6	6,0	0,1	1,4	0,4	2,4	4,25	44	1,4	330	80	590

<sup>(1)</sup>Métodos de análise química (RAIJ et al., 2001); <sup>(2)</sup>Método da pipeta com baixa rotação (CAMARGO et al., 1986). CM1 e CM3= colheita mecanizada com um e três ciclos, respectivamente.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é o subtropical úmido do tipo Cwa, com temperaturas no mês mais quente superiores a 22°C e no mês mais frio inferiores a 18°C, com precipitação pluvial média anual de 1.408 mm, com chuvas mais concentradas no período de novembro a março (Figura 1).

**Figura 1.** Frequência pluviométrica da região de Jaboticabal no estado de São Paulo no período de 1963 a 2006 (Fonte: DAEE, 2014).



Na implantação do canavial, o preparo do solo da área foi realizado com as seguintes operações: uso de grade niveladora após a subsolagem com equipamento de cinco hastes, espaçadas 0,40 m umas das outras, na profundidade de 0,45 m. Foram aplicados 1,58 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico e 0,39 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso agrícola antes do revolvimento do solo e 20 Mg ha<sup>-1</sup> de torta de filtro e 1,65 Mg ha<sup>-1</sup> de adubo orgânico de aves no plantio. Após cada colheita, foi aplicado na área, parcelado em duas vezes, o fertilizante formulado 22-00-18, nas doses de 0,52 Mg ha<sup>-1</sup> e 0,45 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente e 197 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de vinhaça. Ao final de cada ciclo, na reforma das áreas realizou-se a dessecação química da soqueira, seguida de subsolagem na profundidade de 0,45 m, sulcação e plantio. Essa operação é denominada de cultivo reduzido.

O ensaio foi instalado em duas áreas adjacentes cultivadas com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), sem queima (cana crua), sendo: manejo com colheita mecanizada com um ciclo de cultivo (CM1), implantado em 2008, em área ocupada anteriormente com pastagem, variedade CTC 20, com espaçamento de 1,5 m entre as linhas de plantio e manejo com colheita mecanizada com três ciclos de cultivo (CM3), implantado em 1995, em área ocupada anteriormente com cana-de-açúcar com colheita manual, com a variedade RB 855453, com espaçamento de 1,5 m entre as linhas de plantio. Na Usina, os ciclos de cultivo dos canaviais duraram 6 anos, sendo, em seguida, realizado o preparo reduzido e novo plantio.

A variedade CTC 20, do Centro de Tecnologia Canaveira (CTC), apresenta alta produtividade, em torno de 167 Mg ha<sup>-1</sup> na média de quatro cortes, elevado perfilhamento e alto teor de sacarose, acima de 11,7 Mg ha<sup>-1</sup>, sendo recomendada para colheita durante toda a safra. A variedade RB 855453, da UFSCar, possui alta produtividade, em torno de 165 Mg ha<sup>-1</sup> na média de quatro cortes, médio perfilhamento, ótima brotação de soqueira e alto teor de sacarose, acima de 12 Mg ha<sup>-1</sup>.

As amostras de solo indeformadas foram coletadas após a operação de colheita, em agosto de 2012, na linha e entrelinhas de plantio, cerca de 0,30 m ao lado da linha de plantio que não recebe tráfego dos pneus do conjunto trator-transbordo, devido à utilização pela

usina, de tráfego controlado e piloto automático, tecnologia que preserva a área amostrada - e no centro das camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m e 0,30-0,40 m. As amostras foram coletadas em cilindros volumétricos de 0,05 m de diâmetro por 0,05 m de altura, para determinação do IHO, em um total de 128 amostras (2 manejos x 2 pontos de coleta x 4 profundidades x 8 repetições).

No laboratório, as amostras foram preparadas, saturadas por meio da elevação gradual da lâmina de água e submetidas a diferentes tensões ( $\Psi$ ) 2, 6, 8, 10, 33, 100, 500 e 1500 kPa, em câmaras de Richards com placas porosas. Após atingir o equilíbrio em cada pressão, foi determinada a massa úmida e a resistência do solo à penetração (RP) de cada amostra. Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 105°C até massa constante, para determinação do conteúdo de água ( $\theta$ ) e da densidade do solo ( $D_s$ ). A RP foi determinada com um penetrômetro eletrônico com velocidade constante de 1,0 cm min<sup>-1</sup>, equipado com uma célula de carga de 200 N, haste com cone de 4,0 mm de diâmetro e semi-ângulo de 30°.

A curva de retenção de água no solo foi obtida pela relação entre umidade volumétrica, potencial matricial e densidade do solo,  $\theta = e^{(a+b \cdot D_s)} \cdot \Psi^c$ , utilizada por Leão et al. (2006) e Silva et al. (2011). Os dados de RP foram ajustados no modelo matemático em função da densidade do solo e umidade volumétrica,  $RP = a \cdot D_s^b \cdot \theta^c$ , usado por Busscher (1990) e Leão et al. (2006). Foi testada uma resistência mecânica limitante a penetração das raízes (RP) de 2,0; 2,5; 3,0 e 3,5 MPa (LAPEN et al., 2004; CAVALIERI et al., 2011; OTTO et al., 2011). O conteúdo de água na porosidade de aeração foi obtido com base na densidade do solo e partícula,  $\theta_{PA} = [1 - (D_s/D_p) - 0,1]$ , considerando um valor mínimo de 0,10 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> necessário para que ocorra a difusão adequada de oxigênio no solo (SILVA et al., 1994).

Para determinar o IHO, foi utilizado o método descrito por Silva et al. (1994) e Silva et al. (2011). Os valores de resistência do solo à penetração e as tensões de água no solo foram linearizados, utilizando o logaritmo natural. O limite superior do IHO foi  $\theta_{CC}$  e/ou  $\theta_{PA}$ , enquanto os limites inferiores foi  $\theta_{PMP}$  e/ou  $\theta_{RP}$ . A densidade do solo crítica ao crescimento radicular ( $D_{sc}$ ) foi considerada como o valor de densidade em que IHO = 0. A influência dos sistemas de manejo, posições de amostragem e camadas de solo nos parâmetros da curva de retenção de água e da resistência do solo à penetração foram avaliada como variável “dummy” (CAVALIERI et al., 2011, SOUZA et al., 2015). Os ajustes dos modelos linearizados foram realizados com a rotina PROC REG do SAS®. A significância dos coeficientes das equações foi avaliada pelo teste t-Student, ao nível de 5% de significância.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ciclos produtivos influenciaram no comportamento do IHO do solo, com diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade, fato que não ocorreu com os fatores locais de coleta e camadas do solo. Os modelos ajustados para a resistência do solo à penetração em função da densidade e conteúdo de água do solo, no CM1 explicam 88% e 80%, respectivamente da variabilidade dos dados e no CM3 explicam 78% e 68% (Tabela 2). Os coeficientes encontrados demonstraram que a resistência do solo à penetração (RP) variou de forma positiva com a densidade do solo e negativa com o conteúdo de água do solo em CM1 e CM3.

**Tabela 2.** Estimadores dos parâmetros da regressão linear [ $\ln RP = \ln a + b \ln \theta + c \ln D_s$  ( $R^2 = 0,88$  e  $0,80$ ) e  $\ln \theta = d + e D_s + f \ln \Psi$  ( $R^2 = 0,78$  e  $0,68$ )] dos atributos do solo para os tratamentos colheita mecanizada com um ciclo (CM1) e três ciclos (CM3).

Parâmetro	Valor	Erro padrão	t	Probabilidade
<b>CM1</b>				
a	-5,8604	0,5535	-10,59	<0,0001
b	-2,7908	0,1872	-14,91	<0,0001
c	6,2432	0,8183	7,63	<0,0001
d	-1,6321	0,3363	-4,85	<0,0001
e	-0,0908	0,0084	-10,87	<0,0001
f	0,2914	0,1963	1,48	<0,0001
<b>CM3</b>				
a	-5,8349	0,3898	-14,97	<0,0001
b	-3,1992	0,1541	-20,77	<0,0001
c	4,7542	0,5536	8,59	<0,0001
d	-1,4217	0,2496	-5,70	<0,0001
e	-0,1015	0,0073	-13,88	<0,0001
f	0,1602	0,1530	1,05	<0,0001

a, b, c, d, e, f = estimadores dos parâmetros dos modelos. RP= resistência do solo à penetração (MPa),  $D_s$ = densidade do solo ( $Mg\ m^{-3}$ ),  $\theta$ = conteúdo de água no solo ( $m^3\ m^{-3}$ ),  $\Psi$ = potencial matricial do solo (kPa).

Nos sistemas de colheita mecanizada CM1 e CM3, os coeficientes estimados na Tabela 2 foram utilizados para representar os modelos da curva de resistência do solo à penetração para os dois ciclos produtivos respectivamente, conforme equações 1 e 2:

$$RP = 0,0029 * \theta^{-2,79083} * D_s^{6,24323} \quad (1)$$

$$RP = 0,0029 * \theta^{-3,19916} * D_s^{4,75423} \quad (2)$$

Para obter o conteúdo de água do solo com os dados de densidade do solo e resistência do solo à penetração limitantes para a cana-de-açúcar para CM1 e CM3, utilizou-se as equações 3 e 4.

$$\theta = \left[ \frac{RP}{0,0029 * D_s^{6,2432}} \right]^{\left\{ \frac{1}{-2,4432} \right\}} \quad (3)$$

$$\theta = \left[ \frac{RP}{0,0029 * D_s^{4,7542}} \right]^{\left\{ \frac{1}{-7,7542} \right\}} \quad (4)$$

Para estimar o conteúdo de água no potencial de 10 kPa ( $\theta_{CC}$  - capacidade de campo) e 1500 kPa ( $\theta_{PMP}$  - ponto de murcha permanente) nos manejos CM1 e CM3, foram utilizadas as equações 5, 6, 7 e 8.

$$\theta = \exp^{(-1,6321 - 0,0908 * D_s)} * 10^{0,2914} \quad (5)$$

$$\theta = \exp^{(-1,6321 - 0,0908 * D_s)} * 1500^{-0,2914} \quad (6)$$

$$\theta = \exp^{(-1,4217-0,1015 \cdot D_s)} * 10^{0,1602} \quad (7)$$

$$\theta = \exp^{(-1,4217-0,1015 \cdot D_s)} * 1500^{0,1602} \quad (8)$$

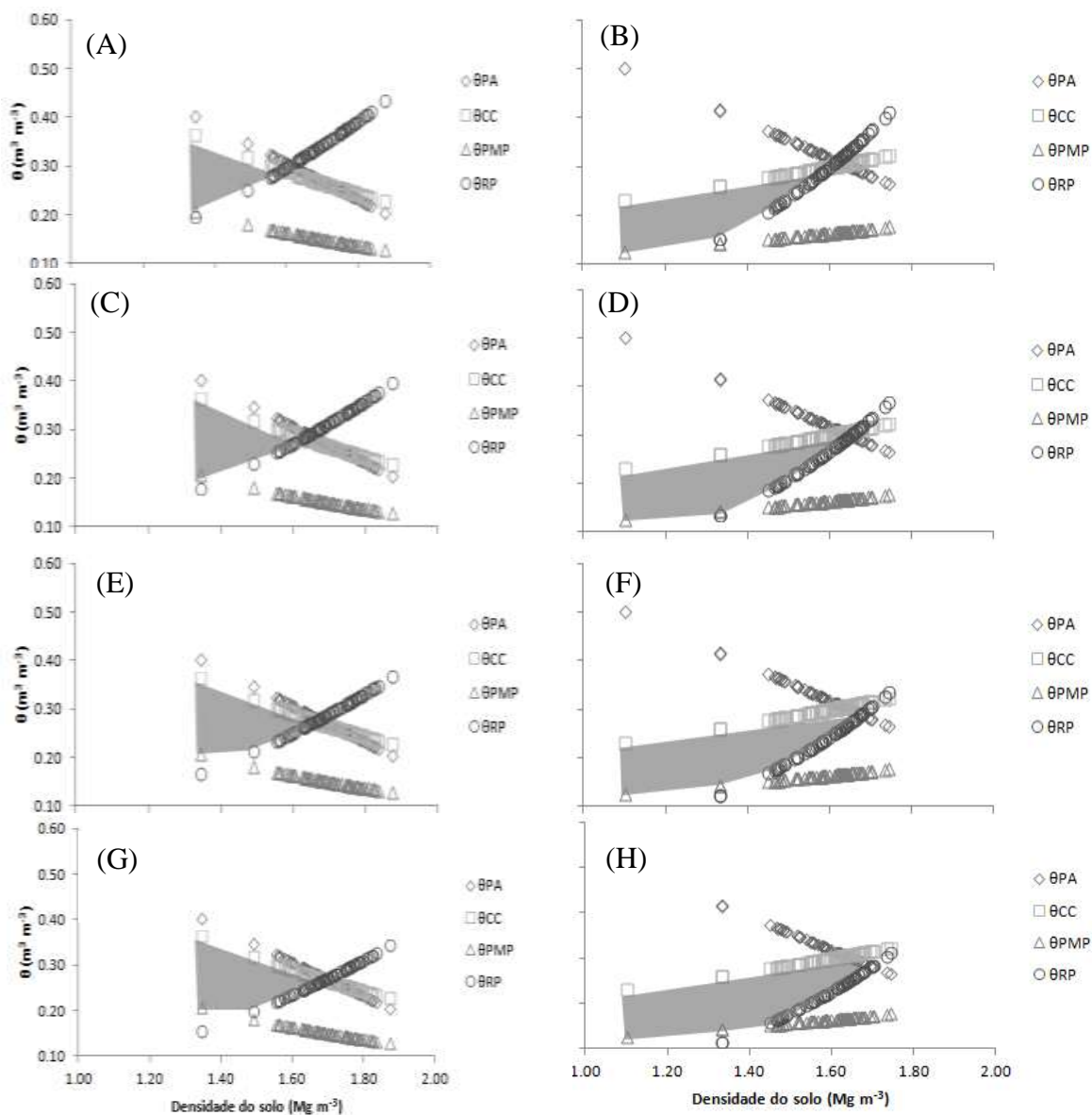
Observa-se na Figura 2 a caracterização do intervalo hídrico ótimo (IHO), para os sistemas CM1 e CM3, que está indicado pela área hachurada e foi definido considerando-se os conteúdos de água do solo com limitações ao crescimento do sistema radicular da cana-de-açúcar ( $\theta_{CC}$ ,  $\theta_{PMP}$ ,  $\theta_{RP}$  e  $\theta_{PA}$ ). Os limites na faixa de água do solo sem limitações ao desenvolvimento da cana são dependentes da densidade do solo e consequentemente da estrutura do solo.

Os níveis críticos do IHO, em CM1 em seu limite superior, foram definidos pela  $\theta_{CC}$ , enquanto a  $\theta_{RP}$  definiu o limite inferior, substituindo o  $\theta_{PMP}$ , para valores de  $D_s$  maiores que 1,34; 1,38; 1,44 e 1,48  $\text{Mg m}^{-3}$  para uma RP limitantes de 2,0; 2,5; 3,0 e 3,5 MPa, respectivamente (Figura 2). No sistema CM3, o limite superior do IHO foi a  $\theta_{CC}$  e o limite inferior foi o  $\theta_{PMP}$  para os valores de  $D_s$  maiores que 1,25; 1,30; 1,35 e 1,40  $\text{Mg m}^{-3}$  para uma RP limitante de 2,0; 2,5; 3,0 e 3,5 MPa, respectivamente. Os valores encontrados para o sistema CM3 estão próximos aos resultados encontrados por Leão et al. (2004), que utilizou o IHO para avaliar um Latossolo Vermelho distrófico sob pastagem e verificaram como limite superior do IHO a  $\theta_{CC}$  e o limite inferior a  $\theta_{RP}$  com valores de densidade de solo  $D_s$  variando entre 1,16 até 1,43  $\text{Mg m}^{-3}$ . Assim, alterações na estrutura do solo, relacionadas ao aumento da densidade do solo, reduzem a faixa do conteúdo de água sem limitações para o desenvolvimento do sistema radicular da cana (OTTO et al., 2011), dessa forma um aumento na densidade do solo necessita de um maior teor de água no solo, que apresente um RP não limitante ao desenvolvimento radicular da cana (CAVALIERI et al., 2011).

A amplitude do IHO foi de 0 a 0,16  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , no sistema CM1 e 0 a 0,11  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , no sistema CM3 (Figura 3). A amplitude dos valores foi superior à encontrada por Imhoff et al. (2001), de 0 a 0,0545  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  e semelhantes à encontrada por Silva et al. (1994), de 0 a 0,14  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , em solo hidromórfico siltoso, e 0,05 a 0,13  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , em solo textura média, ambos para a RP restritiva de 2,0 MPa.

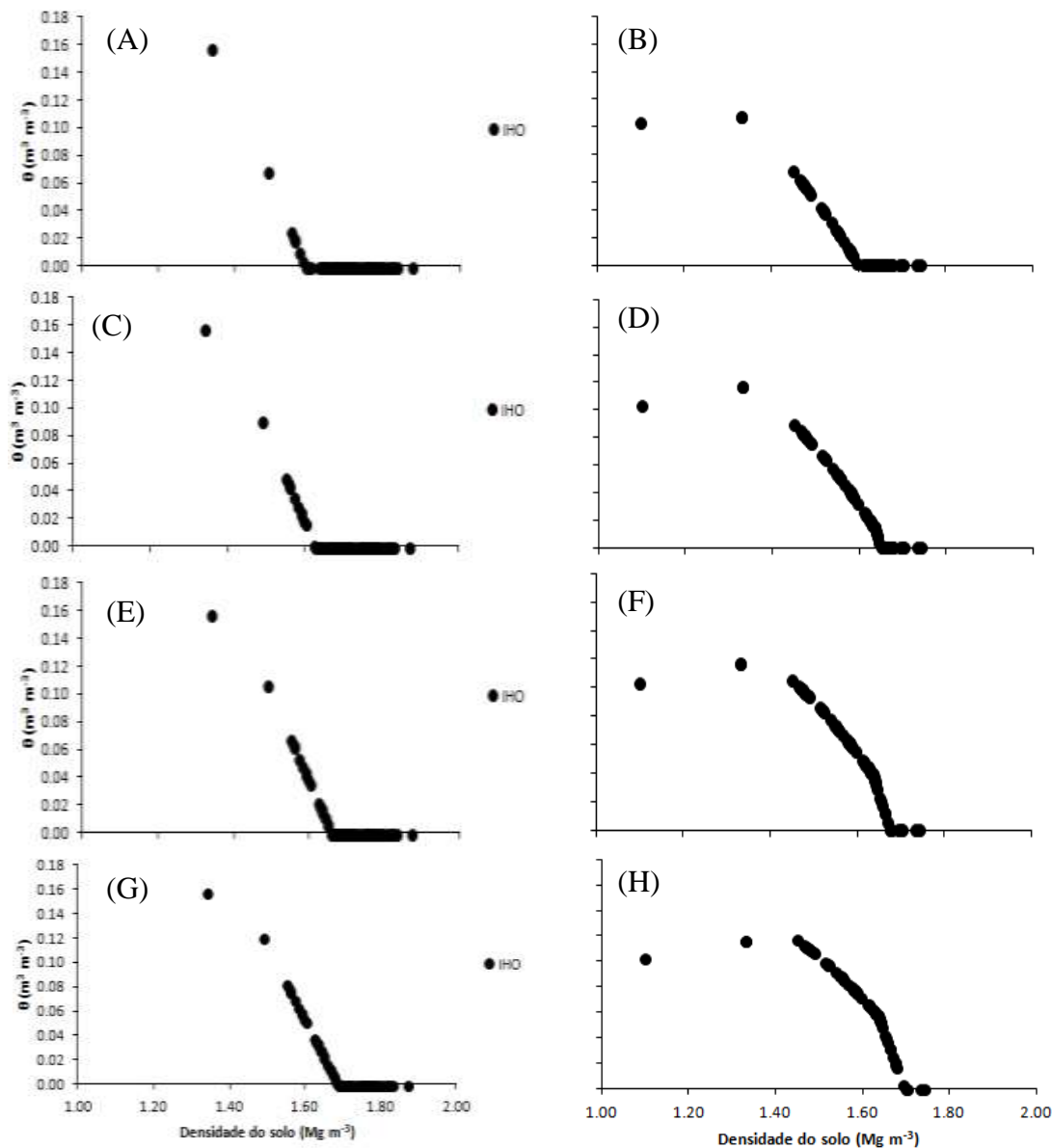
A densidade crítica do solo ( $D_{sc}$ ), que corresponde à densidade do solo onde o IHO é igual a zero, é definida pela interseção das equações que determinam os limites inferiores e superiores do IHO (Figuras 2 e 3). Nesse caso a  $D_{sc}$  foi definida pela interseção da  $\theta_{CC}$  e  $\theta_{RP}$  em CM1 e  $\theta_{CC}$  ou  $\theta_{PA}$  e  $\theta_{RP}$  em CM3. Para o sistema CM1 as densidades críticas ( $D_{sc}$ ) foram de 1,44  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  (RP de 2,0 MPa), 1,47  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  (RP de 2,5 MPa), 1,48  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  (RP de 3,0 MPa) e 1,50  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  (RP de 3,5 MPa). Para o sistema CM3 as densidades críticas ( $D_{sc}$ ) foram de 1,60  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  (RP de 2,0 MPa), 1,65  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  (RP de 2,5 MPa), 1,68  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  (RP de 3,0 MPa) e 1,69  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  (RP de 3,5 MPa). Os valores de densidade crítica do solo encontrados foram semelhantes aos resultados de Leão et al. (2004), cujo valor de  $D_{sc}$  foi de 1,43  $\text{Mg m}^{-3}$ .

**Figura 2.** Intervalo hídrico ótimo do Latossolo Vermelho para os sistemas mecanizados com um (A, C, E e G) e três (B, D, F e H) ciclos, sobre a variação do conteúdo de água na capacidade de campo ( $\theta_{CC} = 10$  kPa), ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP} = 1500$  kPa), porosidade de aeração ( $\theta_{PA} = 0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) e resistência do solo à penetração ( $\theta_{RP}$ ) de 2,0 (A e B); 2,5 (C e D); 3,0 (E e F) e 3,5 (G e H) MPa.





**Figura 3.** Variação do intervalo hídrico ótimo em função da densidade do Latossolo Vermelho para os sistemas mecanizados CM1 (A, C, E e G) e CM3 (B, D, F e H), considerando uma resistência do solo à penetração de 2,0 (A e B); 2,5 (C e D); 3,0 (E e F); 3,5 (G e H) MPa.



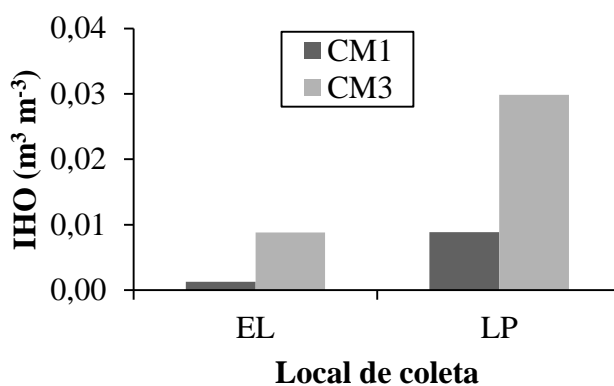
Uma maior Dsc foi observada em CM3 em relação a CM1 para uma mesma RP limitante, o que expressa a compressão dos macroporos, aumentando a contribuição dos microporos no espaço poroso, o que aumenta a retenção de água no solo e permite que a planta suporte uma maior RP limitante (Figuras 2 e 3). O preparo reduzido realizado em CM3 contribui para uma maior retenção de água no solo e uma maior Dsc em relação ao preparo convencional (CM1), o que pode favorecer o desenvolvimento da cana. Contudo, a maior porção de microporos associada com períodos longos de estiagem e aumento na RP do solo podem limitar o desenvolvimento radicular, como observado por Otto et al. (2011).

A porosidade de aeração (PA) foi reduzida com o aumento da Ds nos sistemas CM1 e CM3, mas a porosidade de aeração inferior a 0,10 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> não foi restritiva ao

desenvolvimento do sistema radicular pelo fato de grande parte dela ocorrer em valores de umidade superiores que a capacidade de campo, principalmente no sistema CM3 (Figura 2). Os resultados corroboram com as constatações de Guimarães et al. (2013) e Souza et al. (2015), que estudaram IHO em Latossolo Vermelho e inferiram que a porosidade de aeração diminuiu com o aumento da densidade do solo, entretanto não sendo fator limitante para o desenvolvimento das plantas.

O intervalo hídrico ótimo foi maior na linha de plantio em relação à região da entrelinha para os manejos com um e três ciclos de implantação da cultura (Figura 4), resultado da preservação da estrutura do solo na linha de plantio com o uso do controle de tráfego, o que concorda com os resultados de Souza et al. (2012, 2015). Os resultados também concordam com Chan et al. (2006), que notaram intervalo hídrico ótimo igual a zero na linha do rodado em um solo argiloso, criando condições desfavoráveis ao desenvolvimento das raízes das plantas, em relação à linha de plantio, onde a qualidade do solo foi mantida, resultando em maior crescimento do sistema radicular das culturas canola e trigo. O desenvolvimento radicular ocorre sem restrições dentro dos limites do IHO (SOUZA et al., 2015), dessa forma a amplitude do conteúdo de água do solo pode ser utilizada na avaliação da estrutura do solo e da faixa de água entre os níveis críticos para o desenvolvimento das plantas. O menor IHO ocorrido na entrelinha foi causado pela interferência do tráfego dos rodados das máquinas agrícolas, resultando em maior susceptibilidade de compactação do solo, concordando com Souza et al. (2012).

**Figura 4.** Intervalo hídrico ótimo do solo nos sistemas de colheita mecanizada com um (CM1) e três ciclos (CM3), determinados nas linhas de plantio (LP) e entrelinha (EL).



Maior IHO foi observado na região da entrelinha e da linha de plantio no manejo CM3 em relação a CM1, divergindo da hipótese apresentada neste trabalho. O preparo reduzido do solo na linha de plantio, com o uso de subsolador, com três ciclos de cultivo de cana contribuíram para a restauração da estrutura do solo, o que aumenta a retenção de água no solo e a faixa de água sem limitações ao desenvolvimento radicular da cana. O aporte de material vegetal em superfície, proveniente da colheita mecanizada sem queima da palha, com três ciclos produtivos de cana também favorecem a estruturação do solo pelo aumento do teor de matéria orgânica do solo (SOUZA et al., 2005), que atua como agente cimentante e estabiliza os agregados do solo, quanto pela dissipação da carga imposta pelo tráfego de máquinas agrícolas. No manejo com um ciclo de cultivo (CM1) após o preparo convencional do solo seguido do tráfego de máquinas ocorre uma maior desestruturação do solo e predomínio de macroporos que reduzem a retenção de água.

## 6 CONCLUSÕES

O intervalo hídrico ótimo do Latossolo Vermelho textura média foi maior no manejo com três ciclos produtivos quando relacionado com o manejo com um ciclo.

A maior faixa de água não limitante ao desenvolvimento radicular da cana no manejo com três ciclos produtivos foi decorrente da utilização efetiva do preparo reduzido da linha de plantio, permitindo uma recuperação dos atributos físicos do solo.

O intervalo hídrico ótimo do solo foi maior na linha de plantio em relação à entrelinha nos dois manejos em estudo, o que contribui para a preservação da qualidade física do solo na região de desenvolvimento do sistema radicular.

## 7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Usina São Martinho pela disponibilização das áreas e apoio logístico ao desenvolvimento do experimento.

## 8 REFERÊNCIAS

BLAINSKI, E.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; GUIMARÃES, R. M. L. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.3, p.975-983, 2008.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v.3, n.4, p.519-524, 1990.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1986. 94p.

CAVALIERI, K. M. V.; CARVALHO, L. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L.; TORMENA, C. A. Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.5, p.1541-1550, 2011.

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

DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica. **Banco de Dados Pluviométricos do Estado de São Paulo**. Disponível em <<http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/bdhm.exe/plu?qwe=qwe>>. Acesso em: 9 Julho 2014.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Humberto Gonçalves dos Santos, et al., 3.ed. rev. ampl. Brasília: EMBRAPA, 2013. 353p.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Least limiting water range and physical quality of soil under ground cover management systems in citrus. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.67, n.4, p.448-453, 2010.

GUIMARÃES, R. M. L.; TORMENA, C. A.; BLAINSKI, E.; FIDALSKI, J. Intervalo hídrico ótimo para avaliação da degradação física do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, n.6, p.1512-1521, 2013.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; DIAS JÚNIOR, M. S.; TORMENA, C. A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.1, p.11-18, 2001.

KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; COLLARES, J. L.; KUNZ, M. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um Latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.4, p.845-855, 2009.

KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.2, p.221-227, 2007.

LAPEN, D. R.; TOPP, G. C.; GREGORICH, E. G.; CURNO, W. E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.78, n.2, p.151-170, 2004.

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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p.415-423, 2004.

LEÃO, T. P.; 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 and Tillage Research**, Amsterdam, v.88, n.1-2, p.279-285, 2006.

OTTO, R.; SILVA, A. P.; FRANCO, H. C. J.; OLIVEIRA, E. C. A.; TRIVELIN, P. C. O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.117, n.1, p.201-210, 2011.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285p.

ROQUE, A. A. O.; SOUZA, Z. M.; ARAÚJO, F. S.; SILVA, G. R. V. Atributos físicos do solo e intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distrófico sob controle de tráfego agrícola. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.41, n.9, p.1536-1542, 2011.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.6, p.1775-1781, 1994.

SILVA, A. R.; DIAS JÚNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; ARAÚJO JÚNIOR, C. F. Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.2, p.207-216, 2006.

SILVA, G. L.; LIMA, H. V.; CAMPANHA, M. M.; GILKES, R. J.; OLIVEIRA, T. S. Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region. **Geoderma**, Amsterdam, v.167-168, n.1, p.61-70, 2011.

SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; ARAÚJO, F. S.; BARBOSA, R. S. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana-de-açúcar em manejo com e sem controle de tráfego. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.4, p.603-612, 2012.

SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; COOPER, M. ; TORMENA, C. A. Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 72, n.3, p. 270-277, 2015.

SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; LIMA, C. L. R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.3, p.963-973, 2008.