



Artigo

Compactação em Latossolos cultivados com milho submetidos a diferentes pressões induzidas por tratores

Karina de Vares Rossetti ^{1,*} e José Frederico Centurion ¹

¹ Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, SP

* Autor Correspondente: krossetti@bol.com.br

Recebido: 25/11/2016; Aceito: 29/06/2017

Resumo: Práticas agrícolas mecanizadas devem ocorrer com conteúdo de água adequado, de forma que evite deformações físicas no solo não recuperáveis. Dessa forma, objetivou-se com este estudo avaliar a suscetibilidade à compactação sob diferentes pressões induzidas por tratores em um Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) e em um Latossolo Vermelho Eutroférico (LVef), e correlacioná-la com a produtividade do milho. Os tratamentos foram: T0= sem compactação; T1, T2 e T3= uma passada de um trator de 4, 7 e 10 t, respectivamente, e T4= três passadas do trator de 10 t. Foram determinadas a densidade máxima do solo (Dsmáx), a umidade crítica de compactação (Ugc), a densidade relativa do solo (Dr) e a porosidade do solo. A Dsmáx e a Ugc oscilaram de 1,84 a 1,87 Mg m⁻³ e de 0,13 a 0,15 kg kg⁻¹ para o LVd e 1,58 a 1,66 Mg m⁻³ e 0,22 a 0,26 kg kg⁻¹ no LVef, respectivamente. O menor teor de matéria orgânica (MO) associado à granulometria do LVd aumentou a Dsmáx e reduziu a Ugc. A maior Ugc no LVef, conferiu menor capacidade de compactação ou maior intervalo para realização das operações motomecanizadas. Neste estudo, o LVd é mais suscetível à compactação do que o LVef, independente das pressões exercidas pelos tratores estudados, em razão dos baixos valores de Ugc. Porém no LVd, as diferentes compactações induzidas por passadas dos tratores não foram prejudiciais para a produtividade de milho.

Palavras-chave: Ensaio de Proctor normal. Densidade relativa do solo. Tráfego de máquinas.

Induced compaction of an Oxisols cultivated with maize under pressures by tractors

Abstract: Mechanized agricultural practices should occur with adequate water content so as to avoid non-recoverable soil physical deformation. The aim of this study was to evaluate susceptibility to compaction of a Haplustox (LVd) and of an Eutruxox (LVef) under pressures induced by tractors and correlate it to maize yield. The treatments were: T0 = without compaction; T1, T2, and T3 = one pass with a tractor of 4; 7, and 10 t, respectively, and T4 = three passes of the 10 t tractor. The maximum soil bulk density (Dsmáx), critical water content (Ugc), relative soil bulk density (Dr), and soil porosity was determined. The results showed that Dsmáx and Ugc oscillated from 1.84 to 1.87 Mg m⁻³ and from 0.13 to 0.15 kg kg⁻¹ for LVd, respectively; and from 1.58 to 1.66 Mg m⁻³ and from 0.22 to 0.26 kg kg⁻¹ for LVef, respectively. The lower content of organic matter associated with the presence of more sand in LVd increased the Dsmáx and reduced the Ugc. Most Ugc in LVef gave less capacity compression or higher range for realization of mechanized operations. In this study, the LVd is more susceptible to compaction than the LVef, regardless of the pressures exerted by the tractors studied, due to the low values of Ugc. However, in LVd, the different compaction induced by the tractors' passes did not affect maize yield.

Key-words: Standard proctor test. Relative soil bulk density. Tractor traffic.

1. INTRODUÇÃO

O tráfego de máquinas em áreas agrícolas tem como finalidade facilitar o trabalho do homem no campo. Porém quando promovido em determinados conteúdos de água no solo, considerados inadequados ao tráfego agrícola, pode proporcionar à compactação, sendo essa mais evidente na camada superficial do solo (SILVA et al.,

2010). Isso é verificado por alterações estruturais no solo, resultado do rearranjo das partículas e consequente redução da porosidade, o que aumenta a densidade e a resistência do solo à penetração e dependendo da intensidade, pode comprometer o crescimento e o desenvolvimento radicular e da parte aérea das culturas. Situações essas que devem ser evitadas, já que a descompactação do solo em profundidade, possui elevado custo operacional e elevada demanda energética (CORTEZ, 2013).

Neste aspecto, salienta-se que o conteúdo de água em que ocorre a máxima compactação pode estar dentro da faixa de friabilidade do solo, isto é, abaixo do limite de plasticidade do solo, justamente a condição de conteúdo de água no solo na qual são realizadas as operações de preparo e semeadura. Tal fato é apontado por Silva et al. (2010), como uma das possíveis causas do incremento da degradação física em diversos solos agrícolas e em diferentes classes de solos.

Estudos demonstram que para avaliar a suscetibilidade do solo à compactação, pode-se realizar o ensaio de Proctor normal, no qual se aplica energia por golpes de um soquete sobre o solo contido num molde, e a massa específica resultante é função do tipo de solo e do conteúdo de água em que o solo estiver. Assim, pode-se determinar a curva de compactação de um solo e estimar o ponto em que se obtém a densidade máxima ($D_{smáx}$) e a umidade crítica de compactação (U_{gc}), em que ocorre a máxima compactação do solo (ALMEIDA et al., 2014; ROSSETTI & CENTURION 2015).

De acordo com Klein (2012) tanto a textura como a mineralogia do solo, tem influência na $D_{smáx}$. Luciano et al. (2012), trabalhando com diferentes classes de solos brasileiros constataram que a $D_{smáx}$ aumenta com o teor de areia total e areia fina, e reduz com os teores de argila, observando a seguinte ordem: Neossolo Litólico Distrófico > Cambissolo Húmico Alumínico > Nitossolo Bruno Distrófico > Nitossolo Vermelho Alumínico > Neossolo Litólico Húmico. Nesse aspecto, Beutler et al. (2005) encontraram valores de $1,85 \text{ kg dm}^{-3}$ para um Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) com 271 g kg^{-1} de argila, e de $1,54 \text{ kg dm}^{-3}$ para um Latossolo Vermelho Eutroférico (LVef) com 517 g kg^{-1} de argila. Esses autores constataram que a $D_{smáx}$ foi obtida em conteúdos de água de $0,14$ e $0,27 \text{ kg kg}^{-1}$ para o LVd e para o LVef, respectivamente. Segundo comprovaram Rossetti et al. (2012), as operações mecanizadas podem ser realizadas sem degradação física do solo na faixa de $0,13$ a $0,19 \text{ kg kg}^{-1}$ de conteúdo de água em um LVd (com 280 a 360 g kg^{-1} de argila e com 10 a 29 g dm^{-3} de matéria orgânica).

Dessa forma, Luciano et al. (2012) destacam a importância de estudar diferentes tipos de solo que ocorrem em uma região a fim de se estabelecer valores de referência de U_{gc} e $D_{smáx}$. Nesse sentido, objetivou-se com este estudo avaliar a suscetibilidade à compactação sob diferentes pressões induzidas por tratores em um Latossolo Vermelho Distrófico e em um Latossolo Vermelho Eutroférico, e correlacioná-la com a produtividade do milho.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em Jaboticabal, SP, entre as coordenadas geográficas de $21^{\circ}14'05'' \text{ S}$ e $48^{\circ}17'09'' \text{ W}$, com altitude de 615 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 $21 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 1).

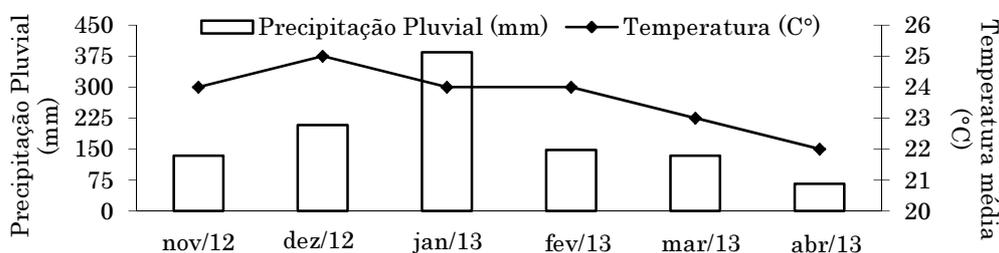


Figura 1. Precipitação pluvial acumulada e temperatura média mensal durante o período de desenvolvimento da cultura de milho (2012/13).

Os solos foram caracterizados conforme Embrapa (2013) como Latossolo Vermelho Distrófico, típico, textura média, A moderado, caulínico-hipoférrico (LVd), cujo material de origem derivou-se principalmente de arenitos do Grupo Bauru e como Latossolo Vermelho Eutroférico, típico, textura argilosa, A moderado,

caulinítico-oxídico (LVef), originado principalmente dos produtos da alteração dos basaltos (Formação Serra Geral) subjacentes aos arenitos (Tabela 1).

Tabela 1. Composição granulométrica e teores dos óxidos de ferro da fração argila do Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) e do Latossolo Vermelho Eutroférico (LVef), na camada de 0 a 0,10 m.

Solo	Argila	Areia fina	Areia grossa	Silte	Dp	Fe ₂ O ₃ *	Ct/(Ct+Cb)*
	-----g.kg ⁻¹ -----				mg.m ⁻³	-----g.kg ⁻¹ -----	
LVd	348	310	280	62	2,89	60	0,75
LVef	560	130	110	200	2,74	230	0,45

*Dados extraídos de Cunha et al. (2005). Dp: densidade de partícula; Ct: caulinita; Gb: gibbsita.

Após escarificação, gradagem e nivelamento de ambos os solos até a profundidade de 0,30 m, os experimentos foram implantados no mês de novembro do ano agrícola 2012/2013. Para cada solo utilizou-se delineamento em blocos casualizados em esquema fatorial, com cinco tratamentos e com quatro repetições. Apenas como referência, foram utilizadas áreas sob mata nativa (MN), por se tratar de uma condição sem ação antrópica. Uma vez, que na MN não é possível implantar delineamento estatístico. As passadas de trator foram equivalentes a: T0= sem tráfego de trator adicional, nesse caso é considerado como preparo convencional; T1, T2 e T3= uma passada do trator de 4; 7 e 10 t, respectivamente; T4= três passadas do trator de 10 t, uma ao lado da outra. O conteúdo de água no solo durante a compactação foi na capacidade de campo de 0,12 e 0,22 kg kg⁻¹ para o LVd e LVef, respectivamente. A parcela experimental constituiu-se de 4,5 m de largura (cinco linhas de milho) e 6 m de comprimento, considerando-se área útil as três linhas centrais e 3 m de comprimento de cada linha.

Para estabelecer o tratamento T1 utilizou-se o trator Massey Ferguson 275 de 51,5 kW (70 cv), tração 4 x 2 e massa de 4 t, com distribuição de 30% da massa total nas rodas dianteiras e 70% nas rodas traseiras. O trator utilizado para o tratamento T2 foi o Massey Ferguson 620 de 77 kW (105 cv), tração 4 x 2 TDA (tração dianteira auxiliar) e massa de 7 t, com distribuição de 40% da massa total nas rodas dianteiras e 60% nas rodas traseiras. Para os tratamentos T3 e T4 foram utilizados uma pá carregadora Caterpillar 924 F de 105 kW (143 cv), tração 4 x 4, massa de 10 t e com a concha vazia.

Em dezembro de 2012, realizou-se a adubação de semeadura com 340 kg ha⁻¹ do formulado 8-28-16 para a obtenção da produtividade esperada de 6 a 8 t ha⁻¹. Foi semeado o milho híbrido simples Maximus (*Zea mays* L.), no espaçamento de 0,90 m entre linhas e 8 a 9 sementes por metro, utilizando-se de uma semeadora de plantio direto com cinco linhas, equipada com sulcador e discos para cobrir as sementes. A adubação de cobertura foi realizada no estádio V6 da cultura com 250 kg ha⁻¹ do formulado 20-0-20 em superfície, ao lado da linha de plantio.

Para a avaliação do ensaio de Proctor normal, amostras deformadas foram coletadas na camada de 0-0,10 m antes da compactação do solo, secas ao ar e passadas em peneira de 4,0 mm (NOGUEIRA, 1998). A determinação da máxima densidade do solo (Dsmáx) consistiu na adição de um pouco de água à amostra (até conseguir moldá-la na mão), homogeneização e adição de solo até um terço do cilindro de 0,10 m de diâmetro por 0,13 m de altura, que foi submetido a 25 golpes de um soquete de 2,5 kg, caindo à altura de 0,30 m, correspondendo a uma energia de 560 kPa. Em seguida, adicionou-se mais uma camada de solo até atingir dois terços, e depois outra, até atingir a superfície do cilindro. Nos pontos seguintes, adicionou-se mais água (cerca de 2%), até que se verificou ter a densidade do solo diminuído. Assim, foram obtidas a densidade máxima do solo (Dsmáx) e a umidade crítica de compactação (Ugc) por meio do ajuste quadrático da equação entre a densidade do solo versus umidade.

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

$$Ds = a + bUg + cUg^2 \quad (1)$$

em que Ds = densidade do solo (Mg m⁻³), Ug = umidade gravimétrica do solo (kg kg⁻¹), a, b e c = parâmetros da equação.

Fazendo-se a derivada primeira da equação 1, foi obtida a umidade crítica para máxima compactação ou umidade crítica de compactação (U_{gc}):

$$U_{gc} = \frac{-b}{2a} \quad (2)$$

Dessa forma, a $D_{smáx}$ pode ser calculada por:

$$D_{smáx} = - \frac{b^2 - 4ac}{4a} \quad (3)$$

em que $D_{smáx}$ = densidade máxima do solo ($Mg\ m^{-3}$).

Considerou-se, portanto quatro repetições por parcela, por tratamento para a obtenção da $D_{smáx}$ e da U_{gc} . Assim na Figura 2(consta no item Resultados e Discussão), está representada a curva média de compactação para cada tratamento e classe de solo. Mesmo diante do valor constante da granulometria e do teor de matéria orgânica (MO) dentro de cada classe de solo; as repetições foram realizadas com o intuito de executar uma análise estatística que assegurasse as comparações desses resultados.

Com a intenção de relacionar a resposta do solo ao tráfego de máquinas com a resposta das culturas à compactação, foi desenvolvido um parâmetro denominado densidade relativa (D_r) ou grau de compactação do solo. Essa foi obtida pela divisão da D_s pela $D_{smáx}$ obtida no ensaio de Proctor, da seguinte forma:

$$D_s = \frac{D_s}{D_{smáx}} \quad (4)$$

Nessa mesma camada, também foram retiradas amostras para a determinação da MO, que foi obtida por oxidação em solução $0,1667\ mol\ L^{-1}$ de bicromato de potássio em meio ácido e titulação de excesso de bicromato em solução de sulfato ferroso amoniacal $0,25\ mol\ L^{-1}$, usando difenilamina como indicador (RAIJ et al., 2001).

Para avaliar os atributos físicos do solo, em 21 de janeiro de 2013, foram coletadas amostras indeformadas, na camada de 0-0,10 m, utilizando cilindros de $53,16\ 10^{-6}\ m^3$ ($0,032\ m$ de altura e $0,046\ m$ de diâmetro), para determinar a densidade do solo (D_s), a microporosidade (Mic) que foi determinada por secagem (tensão de $-0,006\ MPa$) em mesa de tensão; e a macroporosidade (Mac) que foi obtida por diferença entre a porosidade total e a microporosidade (EMBRAPA, 2011).

Em abril de 2013 para avaliar a produtividade de grãos, coletaram-se as plantas contidas na área útil de cada parcela (seis linhas de milho com $1\ m$ cada), para debulha e determinação da massa de grãos. A produtividade de grãos de milho foi obtida extrapolando-se a produção de grãos da área útil da parcela para $1,0\ ha$, ajustando-se a umidade dos grãos para 13% .

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância por meio do software Assistat versão 7.7 beta (SILVA, 2014). Por meio do delineamento em blocos casualizados, com 10 tratamentos, uma camada de solo e quatro repetições. E quando significativa às médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância e posteriormente, foi realizada a análise de regressão, por meio do software Microcal Origin 8.1.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao observar as curvas de compactação obtidas por meio do ensaio de Proctor normal no LVd e no LVef (Figura 2), verifica-se que os manejos de preparo convencional e as compactações induzidas por tratores deslocaram as curvas para a esquerda e para cima de forma semelhante em comparação a mata nativa (MN), proporcionando menores valores de umidade crítica de compactação (U_{gc}) e maiores valores de densidade máxima de compactação ($D_{smáx}$). Esse fato deve-se em função da granulometria e do teor de matéria orgânica do solo (MO), uma vez que os teores de MO e de argila para a MN foram respectivamente, de 30 e de $320\ g\ kg^{-1}$ para o LVd e 56 e de $440\ g\ kg^{-1}$ para o LVef.

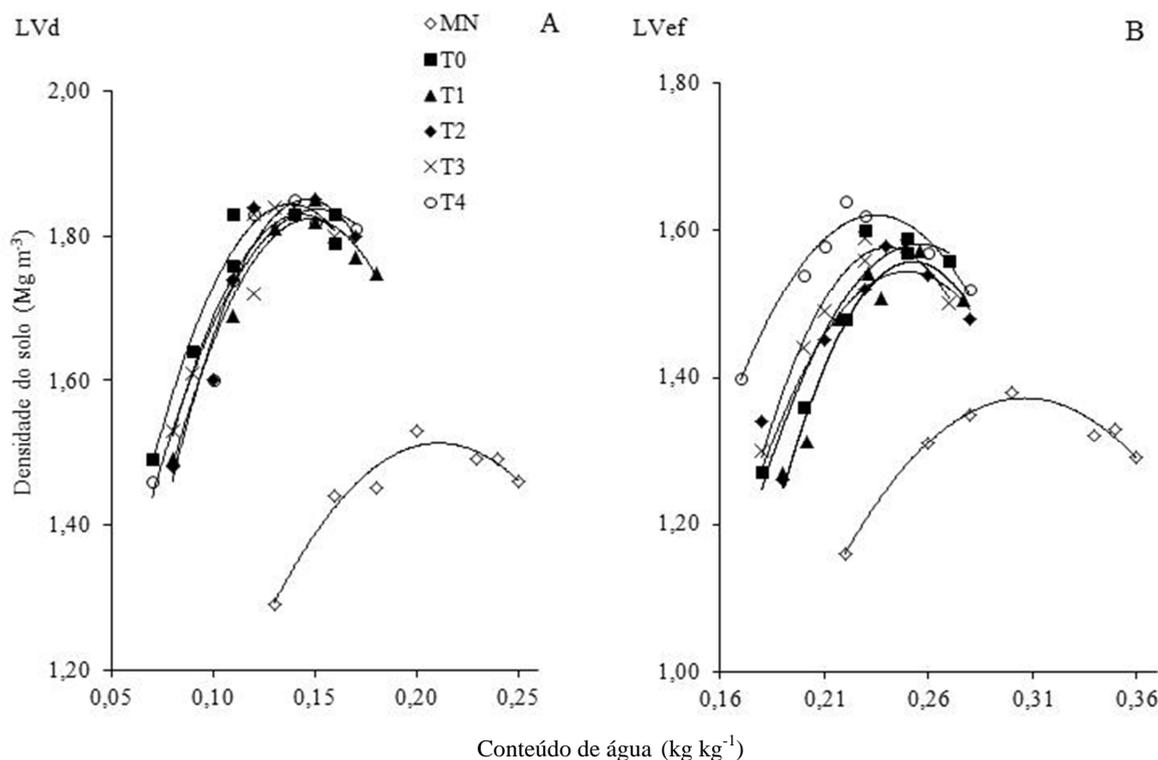


Figura 2. Curvas média de compactação do LVd (A) e LVef (B), sob diferentes tratamentos na camada de 0-0,10 m. T0: sem compactação, T1, T2 e T3: uma passada do trator de 4, 7 e 10 t, respectivamente, T4: três passadas do trator de 10 t e MN: mata nativa em Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) e Latossolo Vermelho Eutroférico (LVef).

As regressões quadráticas foram significativas para os diferentes tratamentos e solos, com coeficiente de determinação (R²) variando de 0,92 a 0,98 para o LVd e 0,83 a 0,98 para o LVef (Tabela 2).

Tabela 2. Resultados da análise de regressão quadrática média da densidade do solo (\hat{y}) em função da umidade (Ug), para os diferentes tratamentos na camada de 0-0,10 m.

Tratamento	Equação	R ²	Fc	P > Fc
LVd				
T0	$\hat{y} = 0,3655 + 21,373Ug - 77,244Ug^2$	0,96	43,44**	0,0019
T1	$\hat{y} = 0,1965 + 22,010Ug - 74,422Ug^2$	0,98	90,18**	0,0005
T2	$\hat{y} = - 0,0483 + 25,953Ug - 88,687Ug^2$	0,94	32,83**	0,0033
T3	$\hat{y} = 0,2563 + 21,999Ug - 76,884Ug^2$	0,92	23,84**	0,0060
T4	$\hat{y} = 0,4602 + 18,174Ug - 59,97Ug^2$	0,92	23,53**	0,0061
MN	$\hat{y} = 0,0194 + 14,146Ug - 33,514Ug^2$	0,95	38,55**	0,0024
LVef				
T0	$\hat{y} = - 2,2339 + 29,852Ug - 58,383Ug^2$	0,93	28,68**	0,0042
T1	$\hat{y} = - 3,5600 + 40,540Ug - 80,240Ug^2$	0,95	38,41**	0,0024
T2	$\hat{y} = - 1,946 + 27,967Ug - 56,015Ug^2$	0,83	9,56*	0,0299
T3	$\hat{y} = - 2,9643 + 37,792Ug - 78,622Ug^2$	0,98	111,83**	0,0003
T4	$\hat{y} = - 1,319 + 25,036Ug - 53,297Ug^2$	0,96	43,94**	0,0019
MN	$\hat{y} = - 1,2991 + 17,445Ug - 28,486Ug^2$	0,98	92,70**	0,0004

T0: sem compactação, T1, T2 e T3: uma passada do trator de 4, 7 e 10 t, respectivamente, T4: três passadas do trator de 10 t e MN: mata nativa em Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) e Latossolo Vermelho Eutroférico (LVef). Fc: valor do f calculado; P: probabilidade de se obter um valor de F \geq Fc. * e **: Significativo a 5% e a 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente, ns: não significativo.

A interação entre as passadas de trator (tratamentos) e as classes de solos não exerceu efeito significativo para as variáveis $D_{sm\acute{a}x}$, U_{gc} e microporosidade (Mic) (Tabela 3). Esse resultado era esperado, pois a alteração do ensaio de Proctor ocorre em função da granulometria, do teor de MO (Tabela 4) e da mineralogia. Os maiores teores de matéria orgânica e de argila (560 g kg^{-1}) do LVef (Tabela 1), aumentam a adsorção de água pelo solo, comparado ao LVd. Dessa maneira, o LVd compacta-se em menor conteúdo de água conforme resultados encontrados na MN (Tabela 3).

Tabela 3. Densidade máxima ($D_{sm\acute{a}x}$), umidade crítica de compactação (U_{gc}), e microporosidade (Mic) em Latossolos sob diferentes tratamentos na camada de 0-0,10 m.

	Variáveis		
	$D_{sm\acute{a}x} (\text{Mg m}^{-3})$	$U_{gc} (\text{kg kg}^{-1})$	$Mic (\text{m}^3 \text{m}^{-3})$
LVd ⁽¹⁾	1,85 a	0,14 b	0,150 b
LVef	1,60 b	0,24 a	0,349 a
T0 ⁽²⁾	1,72 A	0,19 A	0,287 A
T1	1,72 A	0,20 A	0,279 A
T2	1,72 A	0,20 A	0,283 A
T3	1,70 A	0,18 A	0,280 A
T4	1,77 A	0,18 A	0,281 A
MN LVd	1,52	0,21	0,240
MN LVef	1,38	0,30	0,334
F (1)	270,57**	356,72**	109,25**
F (2)	1,11 ^{ns}	1,65 ^{ns}	0,04**
F (1x2)	1,26 ^{ns}	1,88 ^{ns}	0,47 ^{ns}
CV (%)	2,75	8,87	14,40

⁽¹⁾Letras minúsculas comparam as médias de classes de solos. ⁽²⁾Letras maiúsculas comparam as médias dos tratamentos. T0: sem compactação, T1, T2 e T3: uma passada do trator de 4, 7 e 10 t, respectivamente, T4: três passadas do trator de 10 t e MN: mata nativa em Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) e Latossolo Vermelho Eutroférrico (LVef). Fc: valor do F calculado; P: probabilidade de se obter um valor de $F \geq F_c$. **: Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente, ns: não significativo.

Na mata nativa (MO= 30 e 56 g kg^{-1} e de argila= 320 e 440 g kg^{-1} para o LVd e LVef, respectivamente para cada variável), também foram obtidos maiores valores de U_{gc} , em razão de o teor de matéria orgânica ser duas vezes, ou mais, superior em relação ao solo cultivado. A grande capacidade de retenção de água da matéria orgânica reduz a quantidade de água entre as partículas minerais do solo, sendo necessário um maior conteúdo de água no solo para diminuir a coesão e o atrito interno entre as partículas e promover sua lubrificação para que ocorra a compactação e a densidade máxima seja atingida.

Neste estudo, observou-se valores inferiores de $D_{sm\acute{a}x}$ na mata nativa (LVd= 1,52 Mg m^{-3} e LVef= 1,38 Mg m^{-3}) em relação aos demais tratamentos (Tabela 3), porém sem aumento do teor de MO no LVd para o LVef. Conforme Braidá et al. (2006), os menores valores de $D_{sm\acute{a}x}$ na mata nativa (MN) ocorrem por causa da elevada quantidade de raízes, folhas e material orgânico em decomposição, o que dificulta a compressão do solo, dissipando a energia de compactação. Neste aspecto, de acordo com Marcolin & Klein (2011), o teor de MO possui correlação negativa com a $D_{sm\acute{a}x}$, quer pelo efeito positivo na estabilidade estrutural do solo, quer pelo fato de o material orgânico apresentar baixa densidade, menor do que a dos sólidos do solo. Conforme constataram Braidá et al. (2006), o aumento do teor de CO de 9,3 para 18,8 g kg^{-1} em Argissolo de textura franco-arenosa promoveu redução da $D_{sm\acute{a}x}$ e aumento da umidade necessária para atingi-la.

Com base nas equações obtidas dos tratamentos que constam na Tabela 2, foi possível calcular a $D_{sm\acute{a}x}$ e a U_{gc} , conforme as fórmulas das equações 2 e 3. Assim no LVd os valores da U_{gc} (T0= 0,14; T1=0,15; T2=0,14; T3=0,13; T4=0,15 kg kg^{-1}) e da $D_{sm\acute{a}x}$ (T0= 1,86; T1=1,84; T2=1,87; T3=1,84; T4=1,85 Mg m^{-3}). No LVef os valores da U_{gc} (T0= 0,25; T1=0,25; T2=0,26; T3=0,24; T4=0,22 kg kg^{-1}) da $D_{sm\acute{a}x}$ (T0= 1,59; T1=1,61; T2=1,58; T3=1,58; T4=1,66 Mg m^{-3}).

Tabela 4. Densidade do solo (Ds), densidade relativa (Dr), macroporosidade (Mac), teor de matéria orgânica (MO) e produtividade do milho (Prod) em Latossolos sob diferentes tratamentos na camada de 0-0,10 m.

Variáveis						
Ds (Mg m ⁻³)						
	T0 ⁽²⁾	T1	T2	T3	T4	MN
LVd ⁽¹⁾	1,49 aAB	1,40 aB	1,44 aAB	1,59 aA	1,58 aA	1,21
LVef	1,35 bB	1,30 aB	1,24 bB	1,21 bB	1,69 aA	0,98
F (1)= 34,24**						
F (2)= 19,94**						
F (1x2)= 10,56**						
CV (%)= 5,36						
Dr						
LVd ⁽¹⁾	0,79 aAB	0,74 aB	0,76 aAB	0,86 aA	0,85 bAB	0,80
LVef	0,84 aB	0,80 aB	0,78 aB	0,78 aB	1,02 aA	0,71
F (1)= 6,16*						
F (2)= 11,44**						
F (1x2)= 5,45**						
CV (%)= 6,71						
Mac (m ³ m ⁻³)						
LVd ⁽¹⁾	0,162 aAB	0,185 aAB	0,216 aA	0,136 aAB	0,128 aB	0,29
LVef	0,194 aA	0,131 aAB	0,139 bAB	0,188 aA	0,066 bB	0,34
F (1)= 2,64 ^{ns}						
F (2)= 5,06**						
F (1x2)= 3,95*						
CV (%)= 27,07						
MO (dag kg ⁻¹)						
LVd ⁽¹⁾	11 bA	9 bA	9,5 bA	12,5 bA	11,5 aA	22
LVef	18 aA	19 aA	18,5 aA	19,5 aA	9,5 aA	55
F (1)= 65,85**						
F (2)= 5,58**						
F (1x2)= 7,77**						
CV (%)= 17,51						
Prod (t ha ⁻¹)						
LVd ⁽¹⁾	9,23 aA	7,57 aB	7,72 aB	6,78 aB	7,28 aB	
LVef	7,31 bA	7,49 aA	6,70 bAB	5,62 bBC	5,17 bC	
F (1)= 43,28**						
F (2)= 17,53**						
F (1x2)= 3,63*						
CV (%)= 8,48						

⁽¹⁾Letras minúsculas comparam as médias de classes de solos (coluna). ⁽²⁾Letras maiúsculas comparam as médias dos tratamentos (linha). T0: sem compactação, T1, T2 e T3: uma passada do trator de 4, 7 e 10 t, respectivamente, T4: três passadas do trator de 10 t e MN: mata nativa em Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) e Latossolo Vermelho Eutroférico (LVef). Fc: valor do f calculado; P: probabilidade de se obter um valor de $F \geq Fc$. * e **: Significativo a 5% e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente, ^{ns}: não significativo.

No momento do tráfego do trator no campo, o conteúdo de água no LVd foi de 0,12 kg kg⁻¹, valor próximo da Ugc, que variou de 0,13 a 0,15 kg kg⁻¹. Assim, observa-se uma discordância desses resultados com os obtidos por Rossetti et al. (2012). Segundo esses autores, as elevadas faixas da argila (280 a 360 g kg⁻¹) e de MO (10 a 29 g

dm^{-3}) no LVd em comparação a este estudo, foram as responsáveis em permitir que as operações mecanizadas possam ser realizadas sem degradação física na faixa de 0,13 a 0,19 kg kg^{-1} de conteúdo de água. Para a condição do LVef, a umidade do solo foi de 0,22 kg kg^{-1} durante a compactação pelos tratores no campo, valor igual à Ugc obtida no T4; portanto, em que ocorreu a máxima compactação em laboratório. Embora o T4 não tenha apresentado diferença estatística em relação aos demais tratamentos e no LVef, nestes últimos a Ugc variou de 0,22 a 0,26 kg kg^{-1} de conteúdo de água. Conforme Trindade et al. (2011), quando o valor da Ugc é alto, confere menor capacidade de compactação ou maior intervalo para realização das operações motomecanizadas.

O LVd apresentou os maiores valores de areia e os menores de argila (Tabela 1) e MO, (com exceção no T4), em comparação ao LVef, resultando em maior valor de Dsmáx e menor Ugc. A posição do ponto máximo da curva de compactação é influenciada pelo teor de argila, MO, e estes também influenciam a posição da curva de compactação ao longo do eixo da umidade, enquanto o teor de areia influi na amplitude da curva de compactação. Em relação à argila, esta apresenta maior capacidade de troca catiônica (CTC) e maior área superficial específica do que a areia, e interage mais com a água, diminuindo o efeito lubrificante entre as partículas minerais; dessa maneira, em solo mais argiloso, há maior coesão entre as partículas de solo e menor suscetibilidade à compactação do solo em relação ao solo arenoso. De acordo com Braida et al. (2006), necessita-se de maior conteúdo de água em solo argiloso para que ocorra a compactação e a Dsmáx.

O valor superior de Dsmáx para o LVd, deve-se a mineralogia, ao maior teor de areia (310 e 280 g kg^{-1} de areia fina e areia grossa, respectivamente) e de densidade de partícula (2,89 Mg m^{-3}) em comparação ao LVef. A razão $\text{Ct}/(\text{Ct} + \text{Gb})$, diminuiu do LVd (0,75) para o LVef (0,45), coincidindo com o aumento dos óxidos de Fe no mesmo sentido (60 e 230 g kg^{-1} de Fe_2O_3 para o LVd e LVef, respectivamente) (Tabela 1). Os resultados de Dsmáx do LVd corroboram os de Beutler et al. (2005), que encontraram valores de 1,85 Mg m^{-3} para um LVd com 271 g kg^{-1} de argila e de 1,54 kg dm^{-3} para um LVef com 517 g kg^{-1} de argila. Esses autores constataram que a Dsmáx foi obtida em conteúdos de água de 0,14 e 0,27 kg kg^{-1} para o LVd e LVef, respectivamente.

Neste estudo, os valores de Dsmáx e Ugc não mostraram interação no LVd (1,84 a 1,87 Mg m^{-3} , 0,13 a 0,15 kg kg^{-1} , respectivamente) e no LVef (1,58 a 1,66 Mg m^{-3} , 0,22 a 0,26 kg kg^{-1} , respectivamente) em relação aos tratamentos de compactação realizados no campo. Isto se justifica em decorrência da utilização de amostras deformadas de solo e pela não variação na composição granulométrica, mineralogia e matéria orgânica, que são os principais responsáveis por essas alterações na Dsmáx e na Ugc entre esses tratamentos de tráfego de máquinas. Assim, o tráfego de máquinas sobre o solo pode aumentar sua compactação, mas sem influenciar a Dsmáx e Ugc obtida no ensaio de Proctor normal. O propósito de ter realizado esse ensaio para todos os tratamentos, já foi mencionado e justificado no item do material e métodos. Diante dos resultados, o recomendado nesse caso para o ensaio de Proctor normal é de realizar quatro ensaios para cada classe de solo.

Em outra condição sem considerar o tempo de adoção dos preparos Álvarez et al. (2010), observaram grandes variações na Dsmáx e na Ugc em Chernossolos, Gleissolos e Vertissolos da região dos Pampas na Argentina. Nesse estudo os valores oscilaram de 1,14 a 1,76 Mg m^{-3} para Dsmáx e de 150 a 431 g kg^{-1} para a Ugc, e a correlação entre esses parâmetros foi negativa ($R^2 = 0,717$, $p < 0,0001$, $n = 73$). Neste aspecto, os autores concluíram que os valores de Dsmáx foram maiores no preparo convencional do que em áreas sob plantio direto, independentemente dos conteúdos de carbono orgânico e de areia.

A área com uma passada de trator de 10 t (T3), no LVd, apresentou o maior valor de Ds (Tabela 4), que é superior apenas em relação à área de uma passada de trator de 4 t (T1) no LVd, oferecendo uma indicação de que a massa do trator potencializou a compactação do solo. Todavia, tal afirmação não pode ser sustentada, porque não diferiu do manejo T4 (três passadas do trator de 10 t) e no T2 (uma passada do trator de 7 t) ambos no LVd. A área com três passadas de trator de 10 t (T4), no LVef, apresentou valor de Ds superior em relação aos demais tratamentos. Essas alterações que ocorreram na estrutura de cada solo foram ocasionadas pelo manejo desse, e também estão associadas a granulometria e a mineralogia dos solos.

O preparo convencional (T0) no LVd apresentou maior produtividade de milho, mesmo tendo Ds semelhante em relação a alguns tratamentos com compactações induzidas por tratores. A justificativa do valor dessa Ds, deve-se ao período de amostragem de solo ter sido a 40 dias após a semeadura. A situação divergente no T0 pode ser explicada devido ao benefício do preparo do solo e pelas condições meteorológicas favoráveis decorrentes da precipitação pluviométrica de 881,2 mm durante o ciclo da cultura (Figura 1). Percebe-se que a produtividade de milho decresce a medida que o LVef é compactado para os tratamentos T3 e T4 quando comparados aos T0 e T1. Para a situação no LVd, as diferentes compactações induzidas por passadas dos tratores não interferiram na produtividade de milho para essa classe de solo (Tabela 4). O resultado da elevada Ds do T4 no LVef, refletiu em menor volume de macroporos para esse tratamento nesse solo. Todavia, essa macroporosidade também foi semelhante aos tratamentos T1 e T2 no LVef. A microporosidade (Tabela 3) foi

superior para o LVef em comparação ao LVd. Pode-se afirmar que a microporosidade não aumentou com o número de passadas ou com as massas dos tratores.

As diferenças nos valores de Ds entre os manejos dos solos interferiram nos valores da densidade relativa do solo (Dr) (Tabela 4). No LVef, o T4 apresentou uma Dr superior em comparação aos demais tratamentos, e comportamento semelhante em relação à Ds. Esse fato era esperado, uma vez que a Ds e a Dr são diretamente proporcionais conforme Almeida et al. (2014) ($r = 0,73^{**}$). Já para a condição da MN os valores da Dr foram de 0,80 (LVd) e 0,71 (LVef). Esses resultados foram superiores aos encontrados por Viana et al. (2011), em Latossolo Vermelho, com 90 g kg^{-1} de argila ($Dr = 66\%$). Os valores de Dr apresentaram uma amplitude de 0,74 a 0,86 e de 0,78 a 1,02, respectivamente, para o LVd e LVef sob manejo cultivado. O valor de Dr ótima para produtividade de milho (Figura 3) foi de 0,80 e 0,88, respectivamente para o LVd e LVef, apesar de a regressão polinomial ter sido não significativa. Neste estudo, a Dr ótima no LVd foi idêntica ao constatado por Rossetti & Centurion (2015) ($Dr = 0,80$ e $MO = 9$ a 20 g dm^{-3}) em LVd sob sistemas de preparo convencional e tempos de semeadura direta cultivado com milho. Essa semelhança deve-se a variação de MO do trabalho citado anteriormente em comparação a este estudo.

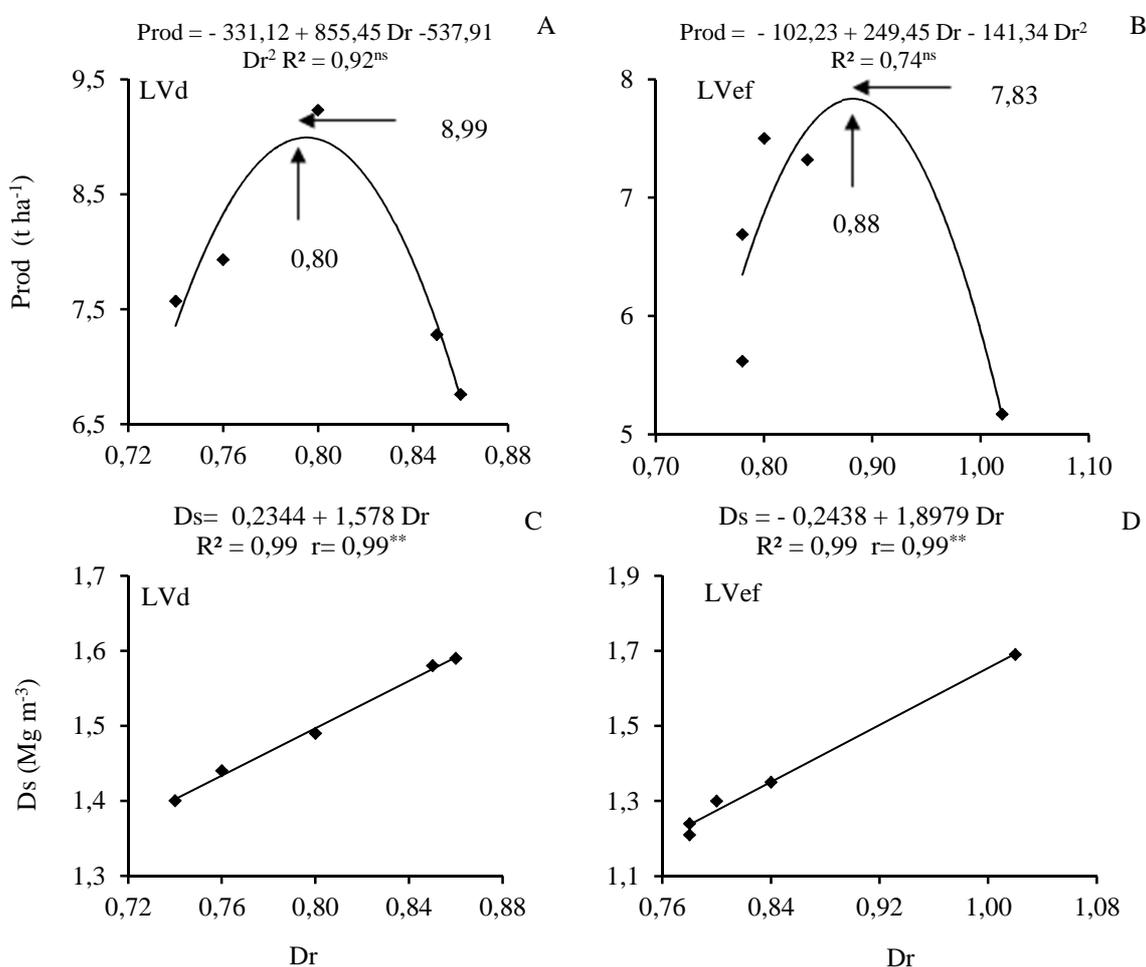


Figura 3. Correlações entre densidade relativa (Dr) com produtividade de milho (Prod) no LVd (A), produtividade de milho (Prod) no LVef (B), densidade (Ds) no LVd (C) e densidade (Ds) no LVef (D).

De acordo com Beutler et al. (2005), em LVd, a produtividade de soja no campo decresceu a partir da Dr de 0,80 concordando dessa maneira com esse estudo. Esse valor foi inferior ao observado por Rossetti et al. (2012), que verificaram uma Dr ótima de 0,86, a partir da qual diminuiu a produtividade de soja. Também, Suzuki et al. (2013) verificaram que a máxima produtividade de soja foi obtida em Dr de 85% em um Latossolo Vermelho (463 a 654 g kg^{-1} de argila). Em um, LVd, com 600 g kg^{-1} de argila, Bonini et al. (2011) relataram que a máxima produtividade do trigo foi obtida com valor de Dr de 0,83.

A D_r no T0 foi de 0,79 e 0,84 para o LVd e LVef, respectivamente, sem diferença estatística entre si (Tabela 4), portanto esses valores são superiores ao observado por Marasca et al. (2015) em LV de textura média. Esses autores verificaram que após o preparo convencional a D_r na camada de 0-0,15 m foi de 0,71. Mesmo quando Rodrigues et al. (2011) constataram que a D_r ultrapassou o valor de 0,88 em Nitossolo Vermelho (semeadura direta cultivada com sorgo forrageiro); os autores não observaram efeito significativo entre os sistemas de manejo estudados (que envolviam gradagens leves, pesadas e cultivo reduzido).

Quando se substitui os valores de D_r ótima para a equação de regressão da D_s versus D_r , constatou-se que a D_r ótima seria 1,50 e 1,43 $Mg\ m^{-3}$, respectivamente para o LVd e LVef (Figura 2). Logo, a partir desses valores de D_s ótima a produtividade de milho poderia sofrer um decréscimo. Assim, os tratamentos T3 e T4 no LVd seguidos do T4 no LVef proporcionariam esse comportamento para a produtividade. Após a análise do LVd na Tabela 4, os T3 e T4 possuem a mesma produtividade, os quais também são semelhantes ao T1 e T2, sendo todos inferiores ao T0 no LVd. Na condição do LVef o T4 apresenta produtividade semelhante ao T3. Dessa maneira, deve-se considerar na interpretação da D_r um maior número possível de atributos físicos do solo com a produtividade da cultura.

Para Munareto et al. (2010) a D_r , foi igual ou inferior a 0,64 na camada de 0-0,05 m, e igual ou inferior a 0,84 em 0,07-0,10 m sob experimentos com arroz irrigado por inundação em Neossolo Regolítico Eutrófico. Esses autores ressaltaram, que a maior D_r e a maior D_s no campo ocorreram em sistema plantio direto e convencional depois desse último ter sido cultivado após sete anos em pousio com cultivo de arroz e, com semeadura de azevém no inverno e pastejo animal o ano todo, na camada de 0,07-0,10 m. Essa compactação ocorreu pelo não revolvimento do solo nessa camada e pelo cultivo de arroz durante vários anos, devido ao tráfego de máquinas na superfície e, conseqüentemente pela compactação que resultou em menor macroporosidade e porosidade total do solo.

Os valores acima de 0,88 estão próximos ao limite críticos observados por Ortigara et al. (2014) em LVd de textura muito argilosa medida por meio da compressão uniaxial a 1600 kPa. Afirmção válida neste estudo para o T4 no LVef ($D_r = 1,02$), o qual obteve decréscimo na produtividade de milho justificada pelo alto valor de D_s no LVef, em comparação aos demais tratamentos somente para esse mesmo solo (Tabela 4).

4. CONCLUSÕES

O menor teor de matéria orgânica associado à presença de mais areia no Latossolo Vermelho Distrófico, aumentou a densidade máxima e reduziu a umidade crítica de compactação do solo;

As operações mecanizadas nos sistemas de manejo podem ser executadas na faixa de 0,13 a 0,15 e 0,22 a 0,26 $kg\ kg^{-1}$ de umidade em Latossolo Vermelho Distrófico (348 $g\ kg^{-1}$ de argila) e para Latossolo Vermelho Eutroférrico (560 $g\ kg^{-1}$ de argila), respectivamente, sem causar degradação física;

Neste estudo, o Latossolo Vermelho Distrófico é mais suscetível à compactação do que o Latossolo Vermelho Eutroférrico, independente das pressões exercidas pelos tratores estudados, em razão dos baixos valores de umidade crítica de compactação. Porém no Latossolo Vermelho Distrófico, as diferentes compactações induzidas por passadas dos tratores não foram prejudiciais para a produtividade de milho;

Menores valores de densidade relativa do solo foram observados no tratamento que foi trafegado pelo trator mais leve, no Latossolo Vermelho Distrófico, como também foi constatado no Latossolo Vermelho Eutroférrico. Sendo que nessa última classe de solo, o tratamento que foi trafegado com um maior número de vezes pelo trator mais pesado obteve maiores valores de densidade do solo, densidade relativa do solo e menor macroporosidade.

5. AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, C.X.; JORGE, R.F.; CENTURION, J.F.; BORGES, E.N.; ROSSETTI, K.V.; PEREIRA, F.S. Qualidade física de um Latossolo Vermelho, sob sistema de semeadura direta e cultivo convencional. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.30, n.5, p.1395-1411, 2014.
- ÁLVAREZ, C.R.; MICUCCI, F.G.; BUSTINGORRI, C.; TABOADA, M.A. Pedotransfer functions to estimate proctor test parameters under different tillage systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.6, p.1787-1793, 2010.

- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G.; FERRAZ, M.V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.6, p.843-849, 2005.
- BONINI, A.K.; SECCO, D.; SANTOS, R.F.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Atributos físico-hídricos e produtividade de trigo em um Latossolo sob estados de compactação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.41, n.9, p.1543-1548, 2011.
- 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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.4, p.605-614, 2006.
- CORTEZ, L.A. **Subsolagem em profundidade variada com base no mapeamento de áreas de manejo específico**. Jaboticabal-SP: Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2013. 57p. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2013.
- CUNHA, P.; MARQUES JÚNIOR, J.; CURI, N.; PEREIRA, G. T.; LEPSCH, I. F. Superfícies geomórficas e atributos de Latossolos em uma sequência arenítico-basáltica da região de Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.1, p.81-90, 2005.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. 2 edição revista. Rio de Janeiro: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2011. 230 p. Disponível em: <http://www.cnps.embrapa.br/publicacoes/>. Acesso em: 01 set. 2011.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3 edição. Rio de Janeiro: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2013. 353 p.
- KLEIN, V. A. **Física do solo**. 2 edição. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2012. 212 p.
- LUCIANO, R.V.; ALBUQUERQUE, J.A.; COSTA, A.; BATISTELLA, B.; WARMLING, M.T. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n.6, p.1733-1744, 2012.
- MARASCA, I.; LEMOS, S.V.; SILVA, R.B.; GUERRA, S.P.S.; LANÇAS, K.P. Soil compaction curve of an Oxisol under sugarcane planted after in-row deep tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.39, n.5, p. 1490-1497, 2015.
- MARCOLIN, C.D.; KLEIN, A.V. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, n.2, p.349-354, 2011.
- MUNARETO, J.D.; BEUTLER, A.N.; RAMÃO, C.J.; DIAS, N.P.; RAMOS, P.V.; POZZEBON, B. C.; ALBERTO, C.M.; HERNANDES, G.C. Propriedades físicas do solo e produtividade de arroz irrigado por inundação no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.12, p.1499-1506, 2010.
- NOGUEIRA, J. B. **Mecânica dos solos. Ensaio de Laboratório**. São Carlos: EESC-USP, 1998. 248 p.
- ORTIGARA, C.; KOPPE, E.; LUZ, F.B. DA; BERTOLLO, A.M.; KAISER, D.R.; SILVA, V.R. da. Uso do físico- solo e propriedades mecânicas de Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.38, n.2, p. 619-626, 2014.
- RAIJ, B. VAN; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.
- RODRIGUES, J.G.L.; FERNANDES, J.C.; NASCIMENTO, F.M.; GAMERO, C.A.; BICUDO, S. J. Caracterização física do solo e desempenho operacional de máquinas agrícolas na implantação da cultura do sorgo forrageiro. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.32, n.4, p. 1813-1824, 2011.
- ROSSETTI, K.V.; CENTURION, J.F. Ensaio de compactação em Latossolo cultivado com milho sob diferentes períodos de adoção de tipos de manejo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.10, n.4, p.499-505, 2015.
- ROSSETTI, K.V.; CENTURION, J.F.; OLIVEIRA, P.R. de; ANDRIOLI, I. Atributos físicos nos tempos de adoção de manejos em Latossolo cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n.2, p.367-376, 2012.
- SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; DIAS JÚNIOR, M.S.; IMHOFF, S.; KLEIN, V.A. **Indicadores da qualidade física do solo**. In: JONG VAN LIER, Q. (editor) Física do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. cap.7, p.241-281.
- SILVA, F. A. S; AZEVEDO, C. A. V (2016). The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **African Journal of Agricultural Research**, Nigéria, v.39, n.11, p. 3733-3740, 2016.
- SUZUKI, L.E.A.S.; REICHERT, J.M.; REINERT, J.M. Degree of compactness, soil physical properties and yield of soybean in six soils under no-tillage. **Soil Research**, Austrália, v.51, n.4, p.311-321, 2013.
- TRINDADE, T. P. DA; CARVALHO, C. A. B. DE; LIMA, D. C. DE; BARBOSA, P. S. A; SILVA, C. H. C; MACHADO, C. C. **Compactação dos solos: fundamentos teóricos e práticos**. 1ª ed. reimp. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2011. 95p.
- VIANA, E. T.; BATISTA, M. A.; TORMENA, C. A.; COSTA, A. C. S. da; INOUE, T. T. Atributos físicos e carbono orgânico em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.6, p.2105-2114, 2011.