



Ensaio de compactação em Latossolo cultivado com milho sob diferentes períodos de adoção de tipos de manejo

Karina de Vares Rossetti¹, José Frederico Centurion¹

¹ Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, Departamento de Solos e Adubos, Via de Acesso Donato Castellane, s/n, Zona Rural, CEP 14884-900, Jaboticabal-SP, Brasil. E-mail: krossetti@bol.com.br, jfcentur@fcav.unesp.br

RESUMO

Devido à necessidade de se mitigar a compactação do solo, sugere-se o uso preliminar do ensaio de Proctor para a obtenção de valores de referência. E para isso objetivou-se avaliar a influência dos sistemas e períodos de adoção de tipos de manejo por meio da densidade máxima e correlacionar a densidade relativa com o rendimento de grãos de milho e com outros atributos físicos do solo. O delineamento experimental usado foi o de blocos ao acaso, em parcelas subdivididas, com seis repetições, três camadas (0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30) e os tratamentos foram: semeadura direta por 6 anos (SD6), SD8, SD10, respectivamente, preparo convencional (SC) e uma área adjacente de mata nativa (MN). Observou-se que o comportamento das curvas de compactação do solo foi o mesmo em todas as camadas e manejos. Nos Latossolos Vermelhos de textura média, as operações mecanizadas com os tipos de manejo estudados podem ser efetuadas na faixa de umidade 0,14 a 0,20 kg kg⁻¹ sem causar degradação física.

Palavras-chave: aeração do solo, matéria orgânica do solo, Proctor normal, *Zea mays*

Soil compaction test in an Oxisol as affected by maize crop managed by different soil tillages

ABSTRACT

Due to the need for avoiding soil compaction, preliminary use of the proctor test is suggested to obtain reference values. For that purpose, the aim was to evaluate the effect of the systems and time periods of adoption of management techniques by means of maximum density and correlate relative density with maize yield and the others physical attributes of the soil. A completely randomized block design was used in split-plots with six replications and three soil layers (0-0.10, 0.10-0.20 and 0.20-0.30) and the treatments were: no-till planting for 6 years (NT6), NT8, NT10, respectively, conventional tillage system (CT) and an adjacent native forest area (NF). The results showed that the behavior of soil compaction curves was similar in all layers of all treatments. On the Red Oxisol under study, the mechanical operations required for the management systems can be performed in a moisture content 0.14-0.20 kg kg⁻¹, without causing physical degradation.

Key words: soil aeration, soil organic matter, Standard Proctor, *Zea mays*

Introdução

A compactação do solo pode ser definida como um aumento da densidade do solo, causado pelo homem ou por animais, resultado do rearranjo das partículas do solo e consequente redução da porosidade (Reichert et al., 2010). A intensidade dessa compactação é controlada por fatores como: conteúdo de água no preparo do solo, características dos rodados e cargas por eixo, sendo que o teor de água do solo é a variável que controla o momento ideal de preparo. O conteúdo de água ótimo para compactação do solo encontra-se dentro da faixa de friabilidade do solo, justamente a condição de conteúdo de água no solo na qual são realizadas as operações de preparo e semeadura. Essa constatação é no mínimo preocupante segundo Silva et al. (2010), uma vez que, essa poderia ser uma das causas do incremento da degradação física de muitos solos agrícolas.

Neste aspecto, o ensaio de Proctor desenvolvido para Engenharia Civil tem sido utilizado para estudar a dinâmica dos solos agrícolas por ser de baixo custo, adequada praticidade e rapidez. Consiste em determinar a curva de compactação do solo, na qual o ponto em que se obtém a densidade máxima é denominado umidade crítica de compactação para um dado nível de energia aplicado. Com a realização desse teste preliminarmente é possível quantificar o valor da umidade do solo, o qual se deve evitar a sua trafegabilidade para não predispor o mesmo à compactação. Pois com o aumento no teor de água, ocorre redução da coesão. A água atua como lubrificante entre as partículas de solo, permitindo o deslizamento e o empacotamento das partículas quando este é submetido a algum tipo de pressão (Luciano et al., 2012).

A densidade máxima do solo ($D_{smáx}$) é dependente da composição mineral (Klein et al., 2008), da quantidade de material orgânico existente (Braidá et al., 2006) e da adição de resíduos culturais (Blanco-Canqui et al., 2010). Uma dessas relações também foi verificada por Beutler et al. (2005), que encontraram valores de $1,85 \text{ Mg m}^{-3}$ em um Latossolo Vermelho distrófico (LVd) (271 g kg^{-1} de argila) e de $1,54 \text{ Mg m}^{-3}$ em um Latossolo Vermelho eutroférico (LVef) (517 g kg^{-1} de argila). Valor semelhante ($1,52 \text{ kg dm}^{-3}$) também foi observado por Betioli Jr. et al. (2012) em Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) com 750 g kg^{-1} de argila, após 30 anos com sistema plantio direto. De acordo com Luciano et al. (2012) a $D_{smáx}$ de distintas classes de solo decresce na seguinte ordem: Neossolo Litólico distrófico, Cambissolo Húmico alumínico, Nitossolo Bruno distrófico, Nitossolo Vermelho alumínico e Neossolo Litólico húmico. A explicação para isso conforme os autores é o fato de que, a $D_{smáx}$ aumenta com o teor de areia total e areia fina e reduz com os teores de argila. Conforme Braidá et al. (2006) esses fatos ocorrem porque a argila 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, além da maior porosidade total nos solos argilosos. Dessa maneira, pode apresentar maior coesão e diminuir a suscetibilidade à compactação do solo.

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 (Dr). Essa é definida como a relação entre a densidade do solo e a densidade máxima do solo obtida no ensaio de Proctor. Beutler et al. (2005) estudando um LVd verificaram que o rendimento de grãos de soja no campo decresceu a partir da Dr de 0,80, enquanto Suzuki et al. (2007) constataram, em um LVdf, máximo rendimento de soja quando a Dr estava próxima de 0,86.

Nos estudos de mitigação da compactação do solo, sugere-se o uso preliminar do ensaio de Proctor para a obtenção de valores de referência. E para isso objetivou-se avaliar a influência dos sistemas e períodos de adoção de tipos de manejo, por meio da densidade máxima e correlacionar a densidade relativa com o rendimento de grãos do milho e com outros atributos físicos do solo.

Material e Métodos

O experimento foi realizado em Jaboticabal, SP ($21^{\circ}14'S$, $48^{\circ}17' W$ e 615m de altitude). O clima da região, de acordo com a classificação climática de Köppen, é do tipo Cwa, com verão quente e inverno seco, precipitação média anual de 1.428 mm e temperatura média de $21^{\circ}C$. O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho distrófico típico de textura média.

Antes da instalação do experimento, o solo vinha sendo cultivado mediante preparo convencional por 30 anos, com a sucessão anual de milho e soja, no verão, e safrinha de milho no outono. A partir dos anos de 2000, 2002 e 2004, foram implantados, respectivamente, a semeadura direta de dez anos (SD10), a semeadura direta de oito anos (SD8) e a semeadura direta de seis anos (SD6). No ano agrícola 2008/09 quatro partes da área, com 60 m^2 cada, foram destinadas ao manejo com preparo convencional (SC) e as demais áreas dos sistemas de manejo foram demarcadas também com 60 m^2 cada. O SC foi constituído de uma escarificação do solo, até 0,30 m de profundidade, seguida de uma gradagem leve. Em dezembro de 2009, foi realizada a semeadura do milho, usando-se o híbrido Impacto[®] da empresa Syngenta[®], por meio da semeadora-adubadora de precisão da marca Marchesan[®], modelo Cop Suprema[®] equipada com 7 linhas espaçadas de 0,90 m, largura útil de 6,30 m, e profundidade média de semeadura de 0,03 m.

A adubação na semeadura consistiu da aplicação de $0,300 \text{ Mg ha}^{-1}$ nas parcelas da formulação N-P-K (8-20-20), para obtenção de rendimento de grãos esperado de 7 a 9 Mg ha^{-1} . A adubação de cobertura foi realizada no estádio V6 da cultura com $0,250 \text{ Mg ha}^{-1}$ da formulação N-P-K (20-0-10) aplicado em superfície, ao lado da linha de semeadura. Nas parcelas manejadas com o sistema de semeadura direta foi utilizado o sulcador de adubo tipo haste (facão) e nas parcelas manejadas com de preparo convencional, usou-se semeadora com discos duplos defasados tracionadas com um trator Valtra BH 140, para tracionar a semeadora-adubadora. Os tratamentos foram SD6, SD8, SD10, SC e uma área adjacente de mata nativa (MN) foi utilizada como controle. O experimento foi conduzido em delineamento blocos ao acaso e em parcelas subdivididas, com seis repetições. As parcelas foram constituídas pelos tratamentos e as subparcelas pelas camadas de solo amostradas (0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m).

A argila foi determinada pelo método da pipeta em amostras deformadas por meio da dispersão com NaOH (0,1 mol L⁻¹) e agitação lenta durante 16 h (Embrapa, 2011). Nas diferentes camadas, também foram retiradas amostras para a análise química visando à determinação da matéria orgânica do solo (MO), que foi obtida por oxidação em solução 1N de bicromato de potássio em meio ácido e titulação de excesso de bicromato em solução de sulfato ferroso amoniacal 0,5 N, usando difenilamina como indicador (Raij et al., 2001).

Em março de 2010, foram coletadas, em quatro pontos aleatórios em cada tratamento, amostras indeformadas na entrelinha do milho com cilindros de 53,16 10⁻⁶ m³ (0,032 m de altura e 0,046 m de diâmetro) para determinar a microporosidade e a macroporosidade do solo em mesa de tensão (0,006 MPa) e a densidade do solo (Embrapa, 2011).

Na determinação do ensaio de Proctor normal, amostras deformadas foram passadas em peneira de 4,0 mm com reutilização de material (Nogueira, 1998). A determinação da densidade máxima do solo (Dsmáx) consistiu da adição de um pouco de água à amostra, homogeneização, adição de solo até 1/3 do cilindro de 0,10m por 0,13m, que foi submetido a 25 golpes de um soquete de 2,5 kg caindo de uma altura de 0,305 m, correspondendo a uma energia de 60,2 KJ m⁻³. Em seguida, adicionou-se mais uma camada de solo até atingir 2/3 e depois outra até atingir a superfície do cilindro, procedendo da mesma forma para compactação. Nos pontos seguintes, adicionou-se mais água até que se verificou ter a densidade do solo diminuído e dessa forma obteve-se, a Dsmáx e a umidade gravimétrica crítica de compactação (Ugc).

Assim para cada amostra, obtiveram-se sete pares de valores de umidade (Ug) e densidade do solo (Ds), os quais foram ajustados por meio de regressão, conforme a equação polinomial quadrática (Ds= aUg² + bUg + c) em que a, b e c são os parâmetros estimados. Fazendo-se a derivada primeira dessa equação, foi obtida a umidade ótima para máxima compactação ou umidade crítica de compactação (Ugc= -b/2a) e a densidade máxima do solo [Dsmáx= - (b² - 4ac)/4a].

A densidade relativa do solo (Dr) foi obtida pela divisão da densidade do solo pela densidade máxima do solo obtida no teste de Proctor normal.

Na avaliação do rendimento de grãos, coletaram-se as plantas contidas na área útil de cada parcela (6 linhas de milho com 1 m cada); os grãos foram levados à estufa ventilada, a 65°C até alcançar peso constante. O rendimento de grãos de milho foi obtido extrapolando-se a produção de grãos da área útil da parcela para um ha, considerando-se a umidade-padrão de 13%. Os resultados foram submetidos à análise de variância, pelo software ASSISTAT versão 7.5 beta e quando esta indicou diferença entre médias, utilizou-se o teste de Tukey (p<0,05).

Resultados e Discussão

Ao comparar as equações das curvas de compactação do solo nas três camadas avaliadas, observou-se que o comportamento foi semelhante nos tipos de manejo. A MN apresentou menor valor de Dsmáx em comparação aos demais manejos nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m (Tabela 1), fato

Tabela 1. Equações quadráticas das curvas de compactação em função da densidade do solo (Ds) e da umidade (Ug), densidade máxima do solo (Dsmáx) e umidade crítica de compactação (Ugc) sob os tratamentos e camadas

Tratamento	Equação	R ²	Dsmáx	Ugc
0-0,10 m				
MN	Ds= -65,00Ug ² +24,75Ug-0,69	0,97 ^{ns}	1,67	0,19
SD6	Ds= -15,01Ug ² +4,57Ug+1,41	0,78*	1,75	0,15
SD8	Ds= -30,93Ug ² +10,96Ug+0,92	0,87*	1,89	0,18
SD10	Ds= -60,18Ug ² +20,10Ug-0,08	0,87*	1,76	0,17
SC	Ds= -120,81Ug ² +33,38Ug-0,43	0,96**	1,87	0,14
0,10-0,20 m				
MN	Ds= -48,02Ug ² +15,84Ug+0,45	0,75 ^{ns}	1,74	0,16
SD6	Ds= -111,07Ug ² +34,95Ug-0,93	0,72 ^{ns}	1,82	0,16
SD8	Ds= -70,53Ug ² +19,80Ug+0,48	0,93**	1,87	0,14
SD10	Ds= -89,20Ug ² +30,81Ug-0,88	0,85*	1,78	0,17
SC	Ds= -30,17Ug ² +11,55Ug+0,75	0,80*	1,86	0,19
0,20-0,30 m				
MN	Ds= -93,71Ug ² +31,32Ug-0,81	0,92**	1,80	0,17
SD6	Ds= -130,38Ug ² +36,26Ug-0,63	0,96 ^{ns}	1,89	0,14
SD8	Ds= -134,12Ug ² +39,44Ug-1,02	0,92**	1,87	0,15
SD10	Ds= -71,36Ug ² +25,01Ug-0,44	0,76 ^{ns}	1,75	0,18
SC	Ds= -58,91Ug ² +23,10Ug-0,38	0,75*	1,89	0,20

MN: mata nativa, SD6: semeadura direta por 6 anos, SD8: semeadura direta por 8 anos, SD10: semeadura direta por 10 anos e SC: sistema convencional no Latossolo Vermelho. ns: não significativo, *(0,01≤p<0,05) e **(<0,01).

esse que é justificado devido a maior concentração de MO da MN nessas camadas.

As regressões quadráticas dos sistemas de uso e manejo foram na maioria significativas nas camadas avaliadas, com exceção da MN na camada de 0-0,10 m; na MN e SD6 na camada de 0,10-0,20 m e no SD6 e SD10 na camada de 0,20-0,30 m. Estes resultados podem ser justificados pelo fato que a densidade nas baixas umidades pode ser influenciada pela água adicionada que gera filmes de água ao redor das partículas minerais, reduzindo o atrito entre as mesmas e facilitando a compactação do solo. Na umidade na qual a compactação é máxima, a adição de mais água resulta em ocupação dos espaços existentes entre as partículas do solo, o que causa o surgimento de pressões neutras, tornando o solo menos suscetível à compactação. A MN e o SC apresentaram valores superiores de umidade crítica de compactação (Ugc); (0,19; 0,19 e 0,20 kg kg⁻¹ nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,10-0,20 m, respectivamente), pois de acordo com Figueiredo et al. (2000) em Latossolo Roxo os valores que foram inferiores a 0,29 kg kg⁻¹ não ofereceram risco de compactação.

Resultados semelhantes na mata nativa também foram constatados por Silva et al. (2006) em Argissolo Amarelo. Esses autores verificaram na mata nativa (28,1 g kg⁻¹ de CO) maior valor de umidade ótima de compactação (0,179 kg kg⁻¹) e menor valor de densidade máxima de compactação (1,72 Mg m⁻³) na camada de 0-0,20 m em comparação a cana-de-açúcar em condição de sequeiro (11,8g kg⁻¹ de CO) e irrigado (91,75 g kg⁻¹ de CO). Uma vez que, a curva de compactação é influenciada principalmente pela argila e teor de carbono orgânico do solo e quando esses são elevados refletem em maiores valores de umidade crítica de compactação (Braidá et al., 2006).

Observa-se que as alterações para a Dsmáx (Tabela 1) e teor de MO (Tabela 2) para a MN, aumentaram e reduziram, no sentido da camada de 0-0,10 m à 0,20-0,30 m, respectivamente. Esses resultados refletem o comportamento inversamente

proporcional desses parâmetros que também foi verificado por Braida et al. (2006) em Argissolo Vermelho-Amarelo de textura franco-arenosa (155 g kg⁻¹ de argila) e em Nitossolo argiloso (787 g kg⁻¹ de argila). Esses autores constataram que, com o aumento do teor de C (de 9,3 para 18,8 g kg⁻¹), houve redução da Dsmáx e aumento da umidade necessária para atingi-la. Neste trabalho verificou-se correlação negativa e significativa com a variável MO e a Dsmáx (Figura 1A), confirmando semelhança com os resultados de Marcolin & Klein (2011). Contudo Viana et al. (2011) em Latossolo Vermelho da região noroeste do Paraná observaram, que os valores de Dsmáx oscilaram com os sistemas de manejo, uso do solo e aumentaram em 1,91; 1,93; 2,00 e 2,03 Mg m⁻³, e os estoques de C do solo, de 17,8; 16,6; 12,8 e 12,1 Mg ha⁻¹, para mata nativa, pastagem, mandioca e cana-de-açúcar, respectivamente. Os autores afirmaram que o teor de água crítico (TAC) à compactação não seguiu rigidamente a mesma ordem do teor de C do solo (pastagem > mata nativa > mandioca > cana-de-açúcar). Sendo que o maior valor do TAC da área de pastagem pode ser atribuído aos teores de areia fina e silte, que foram superiores aos dos solos das demais áreas estudadas, e conseqüentemente, à maior capacidade de reter água, devido ao manejo que essas partículas podem assumir.

A Dsmáx variou de 1,75 a 1,89 Mg m⁻³ e a Ugc, de 0,14 a 0,20 kg kg⁻¹ para os sistemas de uso e tempos de adoção de manejo (Tabela 1). Enquanto que Luciano et al. (2012) observaram uma faixa mais ampla de 1,02 a 1,81 g cm⁻³ para Dsmáx e de 0,14 a 0,48 g g⁻¹ para Ugc, na camada de 5 a 10 cm, ao analisarem Neossolos, Nitossolos, e Cambissolos. Os

Tabela 2. Densidade relativa, densidade, macroporosidade, microporosidade, argila e teor de matéria orgânica do Latossolo Vermelho em camadas e tratamentos

Camada (m)	MN	SD6	SD8	SD10	SC
Densidade relativa					
0-0,10	0,76	0,94	0,94	0,93	0,79
0,10-0,20	0,93	0,97	0,94	0,99	0,91
0,20-0,30	0,88	0,91	0,96	0,99	0,90
Densidade do solo (Mg m ⁻³)					
0-0,10	1,27	1,65 Aa	1,79 Aa	1,69 Aa	1,47 Bb
0,10-0,20	1,62	1,76 Aa	1,75 Aa	1,76 Aa	1,69 Aa
0,20-0,30	1,57	1,71 Aa	1,78 Aa	1,74 Aa	1,71 Aa
		CV (%) ¹	7,45	CV (%) ²	3,66
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)					
0-0,10	0,274	0,141 Ba	0,102 Ba	0,098 Ba	0,245 Aa
0,10-0,20	0,145	0,106 Aa	0,141 Aa	0,083 Aa	0,149 Ab
0,20-0,30	0,180	0,131 Aa	0,138 Aa	0,091 Aa	0,147 Ab
		CV (%) ¹	38,30	CV (%) ²	20,64
Microporosidade (m ³ m ⁻³)					
0-0,10	0,263	0,312 Ba	0,323 ABa	0,348 Aa	0,263 Cb
0,10-0,20	0,306	0,302 ABa	0,279 Bb	0,331 Aa	0,290 Ba
0,20-0,30	0,296	0,298 ABa	0,277 Bb	0,329 Aa	0,299 ABa
		CV (%) ¹	7,09	CV (%) ²	4,65
Argila (%)					
0-0,10	32	31 Bb	29 Cb	40 Ab	32 Ba
0,10-0,20	33	33 Ba	30 Cb	41 Aab	31 BCa
0,20-0,30	37	32 Bab	33 Ba	42 Aa	30 Cb
		CV (%) ¹	3,13	CV (%) ²	2,90
Matéria orgânica (g dm ⁻³)					
0-0,10	26	17 Ba	15 Ca	20 Aa	14 Da
0,10-0,20	18	12 Ab	11 Ab	12 Ab	12 Ab
0,20-0,30	13	12 Ab	9,0 Bc	11 Ab	11 Ab
		CV (%) ¹	7,31	CV (%) ²	6,22

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

autores relataram que a variação na Dsmáx foi maior nos solos com menor teor de carbono orgânico total (12 a 40 g kg⁻¹). Esse fato discorda com este estudo, já que a Dsmáx na MN variou de 1,67 a 1,80 Mg m⁻³, ou seja, com uma amplitude menor em comparação aos demais tratamentos. Para Braida et al. (2006) tal comportamento ocorre porque a densidade da matéria orgânica (± 1 g cm⁻³) é menor do que a densidade dos demais constituintes minerais do solo ($\pm 2,6$ g cm⁻³), resultando na redução da Ds e da Dsmáx com o aumento do teor de matéria orgânica.

Complementando esses resultados Blanco-Canqui et al. (2010), estudaram como o longo tempo de adoção de sistema de cultivo (33, 19 e 11 anos) em Chernossolos nos Estados Unidos, pode influenciar na compactação superficial do solo (0-5 e 5-10 cm de profundidade) e, verificaram que a Dsmáx foi menor nos sistemas de cultivo contínuo do que nos sistemas que incluíam um período sem cultivo. Os autores afirmaram que na textura franco-argilo-siltoso a Dsmáx na condição sem cultivo e a sequência trigo-sem cultivo (1,57 Mg m⁻³) foram maiores do que no trigo-trigo e sorgo-sorgo (1,47 Mg m⁻³). Na textura franca a Dsmáx na situação trigo-sem cultivo foi superior em relação ao milho-milheto por 0,24 Mg m⁻³ e a condição de grama perene por 0,11 Mg m⁻³. Já na condição de textura franco-siltosa os sistemas de cultivo contínuo não influenciaram a Dsmáx.

Esses autores também relataram que o longo tempo de adoção de sistemas de cultivo contínuo tiveram um impacto significativo na redução superficial da Dsmáx. Assim essas observações justificam as pequenas alterações ainda observadas neste estudo, já que o maior tempo de adoção deste experimento é de 10 anos de semeadura direta. 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 (R² = 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, independente dos conteúdos de carbono orgânico e de areia.

Os valores de densidade relativa (Dr) apresentados na Tabela 2 encontram-se na faixa de 0,76 a 0,99. A Dr em alguns casos excedeu o valor de 0,80 considerado crítico para a produtividade da soja conforme Beutler et al. (2005). Situação similar foi relatado por Bonini et al. (2011), com valor de Dr de 0,83 para produtividade do trigo em Latossolo Vermelho distroférico (600 g kg⁻¹ de argila). Neste aspecto, Carter (1990) trabalhando em solos arenosos (0,10 kg kg⁻¹ de argila; 0,30 kg kg⁻¹ silte e 0,60 kg kg⁻¹ de areia) obteve máximo rendimento de cereais quando a densidade relativa se manteve entre 0,77 e 0,84. O autor destaca ainda, que em áreas sob plantio direto, um valor de Dr de 0,89, já afeta o desenvolvimento das plantas principalmente por deficiência de aeração do solo, acarretada pela redução do volume de macroporos.

Lipiec et al. (1991) realizaram experimentos com cultura da cevada em dois solos: um com 0,20 kg kg⁻¹ e outro com 0,60 kg kg⁻¹ de argila. Concluíram que para ambos os solos o

crescimento das plantas e o rendimento de grãos é reduzido quando a D_r excede valor de 0,91 e 0,88, respectivamente. Mesmo quando Rodrigues et al. (2011), constataram que a densidade relativa ultrapassou o valor de 0,88 em Nitossolo Vermelho para semeadura direta cultivada com sorgo forrageiro não observaram efeito significativo entre os sistemas de manejo estudados (que envolviam gradagens leves, pesadas e cultivo reduzido).

Os valores da D_r da MN, SD6, SD10 e SC aumentaram em relação aos demais tratamentos da camada de 0-0,10 m para a de 0,10-0,20 m, provavelmente em decorrência do decréscimo da $D_{smáx}$ do SC. Desse modo, a diminuição significativa da macroporosidade no SC e da MN em relação a camada de 0-0,10 m para 0,10-0,20 m pode ter alterado os valores de D_r , pois a densidade do solo aumentou nessas últimas camadas e tratamentos. Segundo Ferreira et al. (1999), isso ocorre porque no Latossolo Vermelho distrófico predominam quartzo e caulinita com estrutura maciça, que conferem naturalmente menor porosidade.

Conforme Vieira & Klein (2007) a densidade relativa em LVd (450 g kg⁻¹ de argila) foi superior no plantio direto (PD) que no plantio direto escarificado (PDE), na profundidade de 12,5 cm (PD = 0,984 e PDE = 0,892) e 27,5 cm (PD = 0,930 e PDE = 0,849) indicando possível compactação do solo nessas profundidades. 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 densidade do solo no campo ocorreram em sistema plantio direto e convencional depois desse último ter sido cultivado após 7 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.

O aumento da densidade relativa ocasionou diminuição da macroporosidade do solo (Figura 1B) e quando estava próxima a macroporosidade de 0,10 m³ m⁻³, esse valor correspondeu a uma D_r de aproximadamente 95%. Considerou-se esse valor de macroporosidade, pois é o mínimo adequado para as trocas líquidas e gasosas entre o ambiente externo e o solo, e considerado crítico para o crescimento das raízes da maioria das culturas sendo esse superior ao observado por Suzuki et al. (2007) em Latossolo com aproximadamente 76% de D_r . Situação inversa ocorreu com a microporosidade (Figura 1C) e a densidade do solo (Figura 1D), ou seja, esses atributos foram diretamente proporcionais a densidade relativa. Considerando que na camada de 0-0,10 m as maiores densidades do solo ocorreram no SD6, SD8 e SD10 em comparação a MN e ao SC, optou-se pelo maior valor absoluto no SD8 (1,79 Mg m⁻³) e assim a D_r foi de aproximadamente 0,76. Nessa mesma camada, a microporosidade do solo foi superior nos tempos de adoção de semeadura direta em relação aos demais tratamentos e considerando o maior valor no SD10 (0,347 m³ m⁻³) a D_r correspondente foi de 0,99.

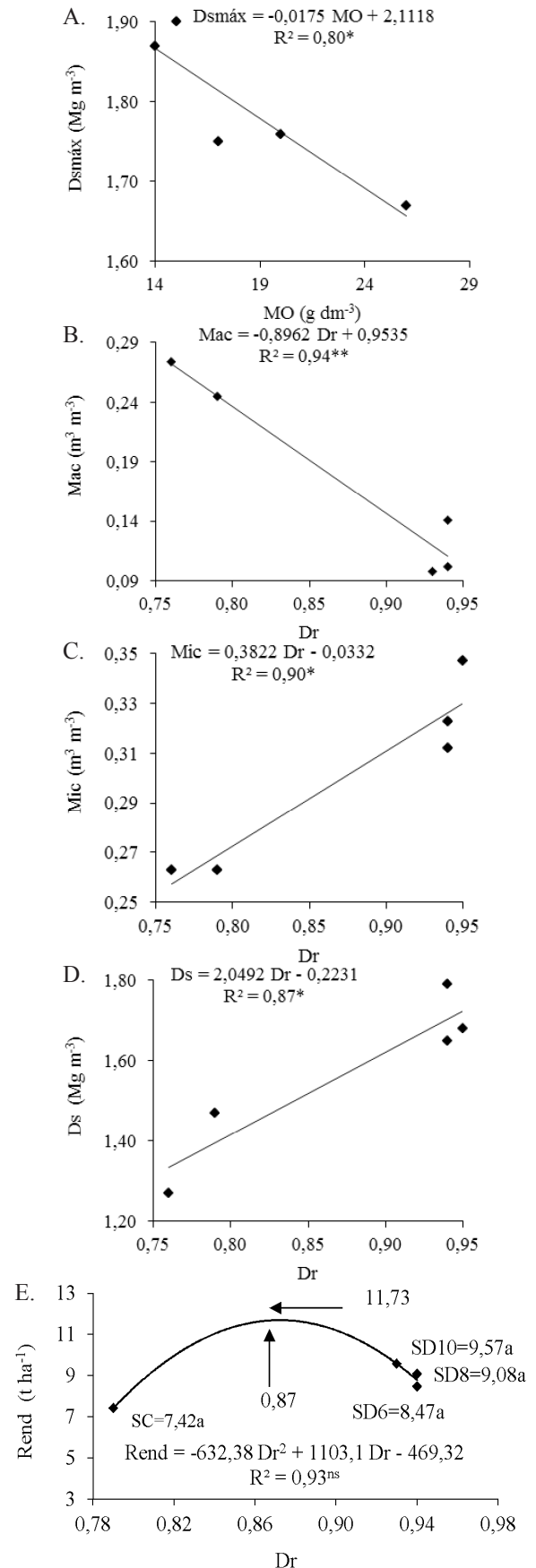


Figura 1. Correlações entre matéria orgânica (MO) e densidade máxima de compactação ($D_{smáx}$) (A), densidade relativa (D_r) com densidade do solo (D_s) (B), macroporosidade (Mac) (C), microporosidade (Mic) (D) e rendimento de grãos (Rend) na camada de 0-0,10 m (E)

A Dr ótima para o rendimento de grãos do milho (Figura 1E) no campo foi de 0,87, apesar da regressão polinomial não ter sido significativa. Nesse caso deve-se considerar também o rendimento da cultura em relação a densidade relativa do solo, uma vez que, essa associação com a macroporosidade crítica do solo ($0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) revelou uma Dr superior a 0,87. Situação semelhante foi verificada por Lindstron & Voorhees (1994), os quais constataram que valores acima de 0,86 são elevados e prejudiciais ao crescimento das culturas e abaixo de 0,80 podem alterar o rendimento de alguns cereais, com relação da capacidade de armazenamento de água no solo. Embora os tratamentos SD6, SD8 e SD10 terem apresentado valores de Dr superiores aos da ótima na camada de 0-0,10 m, esse comportamento não influenciou no rendimento de grãos. Assim pode-se afirmar nessa situação que a macroporosidade no SD10 mesmo sendo próxima de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ não influenciou negativamente no rendimento de grãos uma vez que ocorreu semelhança entre os tratamentos.

Conclusões

As operações mecanizadas nos sistemas de manejo podem ser executadas na faixa de 0,14 a 0,20 kg kg^{-1} de umidade em Latossolo Vermelho de textura média, sem causar degradação física.

A microporosidade e a densidade do solo possuem uma relação diretamente proporcional à densidade relativa. Apesar dessa ter apresentado valores superiores a 0,87, esse comportamento não foi prejudicial ao rendimento de grãos do milho nos sistemas e tempos de adoção de manejo estudado.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão da bolsa de estudos.

Literatura Citada

- 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*, v.34, n.6, p.1787-1793, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000600002>>.
- Betioli Júnior, E.; Moreira, W. H.; Tormena, C. A.; Ferreira, C. J. B.; Silva, A. P.; Giarola, N. F. B. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, n.3, p.971-982, 2012. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000300027>>.
- 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*, v.29, n.6, p.843-849, 2005. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832005000600002>>.
- Blanco-Canqui, H.; Stone, L. R.; Schlegel, A. J.; Benjamin, J. G.; Vigil, M. F.; Stahlman, P. N. Continuous cropping systems reduce near-surface maximum compaction in no-till soils. *Agronomy Journal*, v.102, n.4, p.1217-1225, 2010. <<http://dx.doi.org/10.2134/agronj2010.0113>>.
- 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*, v.41, n.9, p.1543-1548, 2011. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782011005000122>>.
- 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*, v.30, n.4, p.605-614, 2006. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832006000400001>>.
- Carter, M. R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on five sandy loams. *Canadian Journal of Soil Science*, v.70, n.3, p.425-433, 1990. <<http://dx.doi.org/10.4141/cjss90-042>>.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Manual de métodos de análises de solo. 2ª edição revista. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p. <<http://www.cnps.embrapa.br/publicacoes>>. 03 Mar. 2012.
- Ferreira, M. M.; Fernandes, B.; Curi, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.23, n.3, p.507-514, 1999. <<http://sbcs.solos.ufv.br/solos/revistas/v23n3a04.pdf>>. 02 Mar. 2014.
- Figueiredo, L. H. A.; Dias Júnior, M. S.; Ferreira, M. M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.24, n.3, p.487-493, 2000. <<http://sbcs.solos.ufv.br/solos/revistas/v24n3a02.pdf>>. 02 Mar. 2014.
- Klein, V. A. Física do solo. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2008. 212p.
- Lindstron, M.J.; Voorhees, W. B. Response of temperature crops to soil compaction. In: Soane, B.D.; van Ouwerkerk, C. (Orgs.). Soil compaction in crop production. London: Elsevier, 1994. p.265-286. (Developments in Agricultural Engineering, 2).
- Lipiec, J.; Håkansson, I.; Tarkiewicz, S.; Kassowski, J. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. *Soil and Tillage Research* v.19, n.2-3, p.307-317, 1991. <[http://dx.doi.org/10.1016/0167-1987\(91\)90098-I](http://dx.doi.org/10.1016/0167-1987(91)90098-I)>.
- 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*, v.36, n.6, p.1733-1744, 2012. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000600007>>.
- 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*, v.33, n.2, p.349-354, 2011. <<http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v33i2.6120>>.
- Munareto, J. D.; Beutler, A. N.; Ramão, C. J.; Dias, N. P.; Ramos, P. V.; Pozzebon, B. C.; Alberto, C. M.; Hernandez, G. C. Propriedades físicas do solo e produtividade de arroz irrigado por inundação no sistema plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.45, n.12, p.1499-1506, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2010001200022>>.

- Nogueira, J. B. Mecânica dos solos. Ensaio de Laboratório. São Carlos: EESC-USP, 1998. 248p.
- 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.
- Reichert, J. M.; Reinert, D. J.; Suzuki, L. E. A. S.; Horn, R. Mecânica do solo. In: Jong Van Lier, Q. (Org.). Física do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. Cap. 2, p.29-102.
- 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, v.32, n.4, p.1813-1824, 2011. <<http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2011v32n4Sup1p1813>>.
- Silva, A. J. N. da; Cabeda, M. S. V.; Carvalho, F. G. de. Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.10, n.3, p.579-585, 2006. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662006000300007>>.
- 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.(Orgs.). Física do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. Cap.7, p.241-281.
- Suzuki, L. E. A. S.; Reichert, J. M.; Reinert, J. M.; Lima, C. L. R. de. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo Argissolo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 42, n.8, p.1159-1167, 2007. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2007000800013>>.
- 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, v.35, n.6, p.2105-2114, 2011. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000600025>>.
- Vieira, M. L.; Klein, V. A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.31, n.6, p.1271-1280, 2007. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000600006>>.