

Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima

Clovis Dalri Marcolin¹ e Vilson Antonio Klein^{2*}

¹Programa de Pós-graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Passo Fundo, Instituto Federal do Rio Grande do Sul, Campus Sertão, Passo Fundo, Rio Grande do Sul, Brasil. ²Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Passo Fundo, Cx. Postal 611, 99001-970, Passo Fundo, Rio Grande do Sul, Brasil.

*Autor para correspondência. E-mail: vaklein@upf.br

RESUMO. O objetivo desse trabalho foi estimar a densidade relativa do solo (DR) a partir de uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima ($D_{s_{máx}}$). Amostras de dez solos, em sistema de plantio direto estabelecido há mais de dez anos, foram coletadas no Estado do Rio Grande do Sul, em camadas de 5 até 30 cm de profundidade, com a estrutura preservada e não-preservada. Determinaram-se a granulometria, os teores de matéria orgânica (MO), a densidade do solo (D_s) e a D_s do solo máxima ($D_{s_{Máx}}$) pela metodologia do ensaio de Proctor. Com esses dados foi ajustada uma equação de regressão linear para se obter o valor da $D_{s_{máx}}$ a partir dos teores de argila e MO no solo. Para os solos avaliados no Estado do Rio Grande do Sul a densidade do solo máxima pode ser estimada pela função $D_{s_{máx}} = 2,03133855 - 0,00320878 \text{ MO} - 0,00076508 \text{ argila}$, a partir da qual se pode prever a DR do solo a partir de valores medidos de D_s .

Palavras-chave: compactação do solo, plantio direto, textura, matéria orgânica.

ABSTRACT. Determination of relative soil density through a pedotransfer function of maximum bulk density. The objective of this study was to estimate the relative soil bulk density (RD) from a pedotransfer function of maximum bulk density (MBD). Undisturbed and disturbed soil samples of 10 soils, under no tillage, established for more than 10 years, were collected in Rio Grande do Sul State, Brazil, at 5 to 30 cm depths. Granulometry, organic matter (OM), bulk density (BD) and MBD were determined by Proctor test. A pedotransfer function was developed with these values to obtain the MBD from the clay and OM contents in the soil. Our conclusion is that the $MBD = 2.03133855 - 0.00320878 \text{ OM} - 0.00076508 \text{ clay}$ function can be used to estimate the RD of the soils studied.

Keywords: soil compaction, no-tillage, texture, organic matter.

Introdução

A textura descreve a distribuição relativa das partículas minerais do solo, tomando como base seu diâmetro equivalente; estas são denominadas de areia, de silte e de argila (KLEIN, 2008; RESENDE et al., 2007). As partículas minerais do solo apresentam propriedades e comportamentos bastante distintos. A fração areia, em função do maior tamanho, permite maior permeabilidade à água e ao ar no solo, mas baixa capacidade de retenção de água e são consideradas não-coesivas. A fração silte possui poros menores e mais numerosos, retendo mais água e menor taxa de drenagem do que areia. A argila, em função do reduzido diâmetro, apresenta grande área superficial específica, o que acarreta elevada retenção de água e fluxo lento de ar e água, além de elevada pegajosidade quando úmida e alta coesão, quando seca (BRADY; WEIL, 2008). Para Reichardt

e Timm (2004), a argila é a fração do solo que mais influencia o seu comportamento físico.

Os solos agrícolas apresentam grande amplitude de densidade em função de suas características mineralógicas, de textura e de teor de matéria orgânica. Essa variação da densidade do solo (D_s), em função de propriedades intrínsecas do solo, dificulta a sua utilização para quantificar o grau de compactação do solo (BRADY; WEIL, 2008). A D_s , conforme Klein (2008), é uma relação entre massa de solo seco e seu volume, sendo, portanto afetada por modificações na estrutura e no arranjo e volume dos poros. Solos arenosos apresentam densidade do solo superior aos argilosos enquanto que solos siltosos apresentam densidade intermediária (BUENO; VILAR, 1998; LIBARDI, 2005). Solos argilosos apresentam agregação das partículas de argila, da qual resulta a porosidade intra-agregados, que aumenta o volume do espaço poroso,

principalmente aqueles poros com diâmetro reduzido (BRADY; WEIL, 2008). O aumento no teor de matéria orgânica no solo reduz a densidade do solo, quer pelo efeito positivo na estabilidade estrutural do solo, quer pelo fato de o material orgânico apresentar baixa densidade, menor do que os sólidos minerais do solo (ARAGÓN et al., 2000; BRAIDA et al., 2006; DIAS JÚNIOR; MIRANDA, 2000; LIBARDI, 2005).

Em 1933, Ralf Proctor publicou uma série de artigos nos quais pela primeira vez se enuncia um dos mais importantes princípios da mecânica dos solos, o de que a compactação do solo é dependente da energia aplicada e da umidade do solo no momento da compactação (VARGAS, 1977). Desses estudos surgiu o ensaio de Proctor normal que é uma metodologia facilmente executável, de baixo custo e conceitualmente fácil de ser entendida. No entanto, a sua utilização para fins de estudo da dinâmica dos solos agrícolas é recente (FIGUEIREDO et al., 2000). Com a equação da curva de compactação do ensaio de Proctor normal é possível obter matematicamente a densidade do solo máxima ($D_{s_{máx}}$), bem como, a umidade ótima para compactação com aquele nível de energia aplicada. Como ponto negativo, esse ensaio é muito trabalhoso e necessita de grande quantidade de solo para determinação da curva de compactação, o que dificulta sua realização.

Para um solo argiloso (660 g kg⁻¹ argila), Klein (2008) encontrou $D_{s_{máx}}$ de 1,55 Mg m⁻³, enquanto que, num solo arenoso (320 g kg⁻¹ argila), de 1,77 Mg m⁻³. Por sua vez, Santos et al. (2005) obtiveram $D_{s_{máx}}$ de 1,68 e 1,51 Mg m⁻³, para solos com teor de argila de 490 e 356 g kg⁻¹, respectivamente, comprovando o efeito da textura na $D_{s_{máx}}$. Aragón et al. (2000) observaram a contribuição negativa do teor de silte sobre a $D_{s_{máx}}$, enquanto que, para Nhandumbo e Cambule (2006), a D_s foi máxima em solos com 200 g kg⁻¹ de argila, ou 250 g kg⁻¹ de argila mais silte. Dias Júnior e Miranda (2000) observaram contribuição positiva da fração areia, que obviamente apresenta proporção inversa da soma da argila e do silte.

Pelo discutido anteriormente, a D_s não fornece informações suficientes para se quantificar o grau de compactação de um solo agrícola. Visando normalizar os limites de D_s , em função da textura e outras propriedades do solo, tem sido utilizado o conceito de densidade relativa do solo (DR) ou grau de compactação (BEUTLER et al., 2005; HAKANSSON; LIPIEC, 2000; KLEIN, 2006, 2008; KRZIC et al., 2003; SANTOS et al., 2005; TORRES; SARAIVA, 1999) que é a relação da D_s com sua $D_{s_{máx}}$ obtida pelo ensaio de Proctor normal.

Estudos têm sido realizados, visando-se determinar a DR ótima, ou limitante, ao pleno desenvolvimento e máximo rendimento das culturas. Carter (1990) encontrou o máximo rendimento de grãos de cevada e de trigo quando a DR se situou na faixa de 0,77 a 0,84. Já Hakansson (1990) obteve máximo rendimento de cevada na DR de 0,87 e Lipiec et al. (1991), DR crítica de 0,91. A DR do solo para o máximo rendimento da soja, em casa-de-vegetação, foi de 0,84 em solo argiloso (520 g kg⁻¹ de argila) e 0,75 para solo de textura arenosa (270 g kg⁻¹ de argila). No campo, em solo de textura média, a DR ótima encontrada foi de 0,80 (BEUTLER et al., 2005).

O objetivo desse trabalho foi determinar a densidade relativa do solo a partir de uma função de pedotransferência da densidade do solo máxima de solos em plantio direto no Estado do Rio Grande do Sul.

Material e métodos

Amostras de dez solos, em sistema de plantio direto, estabelecido há mais de dez anos, foram coletadas no Estado do Rio Grande do Sul. Na Tabela 1 estão apresentadas a classificação e a unidade de mapeamento dos solos, bem como, a localização e as coordenadas geográficas das áreas onde os solos foram coletados.

Tabela 1. Classificação dos solos, unidade de mapeamento e localização das áreas amostradas.

N.º	Classificação *	Unidade Mapeamento *	Município - RS	Coordenadas geográficas
1	Argissolo Vermelho-amarelo distrófico típico	São Pedro	Santa Maria	S 29°43'11" W 53°42'15"
2	Latossolo Vermelho distrófico típico	Passo Fundo	Pontão	S 28° 13' 40" W 52° 23' 22"
3	Latossolo Vermelho distrófico típico	Passo Fundo	Passo Fundo (Biotério)	S 28°14'04" W 52°23'18"
4	Latossolo Vermelho distrófico típico	Passo Fundo	Passo Fundo (UPF)	S 28°13'40" W 52°23'22"
5	Latossolo Vermelho aluminoférrico típico	Erechim	Sarandi	S 27°55'18" W 52°47'03"
6	Latossolo Vermelho distrófico típico	Passo Fundo	Cruz Alta	S 28°37'35" W 53°41'16"
7	Latossolo Vermelho distrófico típico	Passo Fundo	Ibirubá	S 28°35'36" W 53°04'19"
8	Nitossolo Vermelho distroférrico alissólico	Estação	Água Santa	S 28°10'48" W 52°04'25"
9	Latossolo Bruno aluminico câmbico	Vacaria	Lagoa Vermelha	S 28°18'03" W 51°27'30"
10	Latossolo Vermelho aluminoférrico típico	Erechim	Ibiaçá	S 28°08'19" W 51°47'29"

*Classificação baseada em mapas de Streck et al. (2002).

Em cada solo foram coletadas amostras com estrutura deformada e preservada, nas profundidades de: 0 a 5; 5 a 10; 10 a 15; 15 a 20; 20 a 25 e 25 a 30 cm, em minitrincheiras, com seis repetições. Subamostras de solo com estrutura deformada, para

cada solo e camada, foram homogeneizadas, secas ao ar e peneiradas, formando uma amostra composta. As amostras foram peneiradas em peneira com malha de 4,76 mm para a obtenção da curva de compactação por meio do ensaio de Proctor normal e em peneira com malha 2 mm para a determinação da análise granulométrica (textura) e do teor de matéria orgânica.

As amostras com estrutura preservada foram secas em estufa a 105°C até peso constante, para determinação da D_s (Tabela 2).

A análise granulométrica (Tabela 2) foi realizada, utilizando-se como dispersante hidróxido de sódio e hexametáfosfato de sódio e o método da pipeta para separação das frações granulométricas (RUIZ, 2005). O teor de matéria orgânica do solo (Tabela 2) foi determinado, seguindo-se o método Walkley-Black descrito por Tedesco et al. (1995).

A $D_{s_{máx}}$ para cada solo e profundidade foi determinada a partir do ensaio de Proctor normal, com 560 kPa de energia aplicada (NOGUEIRA, 1998). Esse ensaio consiste em compactar o solo em três camadas de 4 cm de espessura num cilindro de 1.000 cm³, utilizando um soquete com massa de 2,5 kg, em 25 golpes por camada, numa altura de queda de 30 cm. A partir dos pares de dados, da D_s em função do teor de água do solo (em base de massa), fez-se o ajuste de equação polinomial de 2º grau. A primeira derivada da função permite estimar a UOC e a segunda, a $D_{s_{máx}}$ (KLEIN, 2008). A DR (Tabela 2) foi determinada pelo quociente entre a D_s e a $D_{s_{máx}}$ (BEUTLER et al., 2005; HAKANSSON; LIPIEC, 2000; KLEIN, 2006, 2008; KRZIC et al., 2003; TORRES; SARAIVA, 1999).

Para se avaliar a contribuição da textura e da matéria orgânica do solo na $D_{s_{máx}}$, realizaram-se ajustes dos resultados por meio de regressões lineares múltiplas e análise de significância pelo teste F, utilizando-se programa estatístico SAS (1996). Para se comparar os valores da DR calculada e estimada pela função (Tabela 2), utilizou-se o teste T.

Resultados e discussão

Os resultados da análise granulométrica, do teor de MO, da $D_{s_{máx}}$, D_s e da DR, para os solos estudados, em profundidade, estão apresentados na Tabela 2. Os solos apresentaram variação no teor de argila de 136 a 780 g kg⁻¹, no teor de silte de 86 a 299 g kg⁻¹, no teor de areia de 17 a 726 g kg⁻¹ e de MO entre 5 e 71 g kg⁻¹.

Dos ajustes estatísticos, verificou-se que somente as variáveis argila e a MO influenciaram significativamente ($p < 0,001$) a $D_{s_{máx}}$ (Equação 1), permitindo, com isso, obter uma função de pedotransferência capaz de descrever satisfatoriamente essa propriedade do solo.

$$D_{s_{máx}} = 2,03133855 - 0,00320878MO - 0,00076508 \text{ argila}$$

$$(R^2 = 0,95; p < 0,001) \quad (1)$$

A relação inversa da $D_{s_{máx}}$ com MO e argila também foi obtida por Aragón et al. (2000), Dias Júnior e Miranda (2000), Brady e Weil (2008), Reichardt e Timm (2004), Libardi (2005) e Braida et al. (2006). Solos argilosos apresentam agregação das partículas de argila, que possuem porosidade intra-agregados, aumentando o volume do espaço poroso, principalmente aqueles poros com diâmetro reduzido (BRADY; WEIL, 2008). A redução da D_s com o aumento no teor de MO no solo decorre do efeito positivo na estabilidade estrutural do solo associado ao fato de o material orgânico apresentar baixa densidade, menor do que a dos sólidos minerais do solo (ARAGÓN et al., 2000; BRAIDA et al., 2006; DIAS JÚNIOR; MIRANDA, 2000; LIBARDI, 2005). Quando se ajustaram os dados da $D_{s_{máx}}$, somente em função da argila ou MO, esse também foi altamente significativo, tendo essa propriedade comportamento linear e negativo com o aumento do teor de MO (Figura 1A) e argila (Figura 1B), concordando com Bueno e Vilar (1998), Reichardt e Timm (2004) e Libardi (2005).

A principal utilização agrícola da $D_{s_{máx}}$ é na obtenção da DR a partir da relação da D_s e sua respectiva $D_{s_{máx}}$ (BEUTLER et al., 2005; KLEIN, 2008; KRZIC et al., 2003; TORRES; SARAIVA, 1999). A determinação da $D_{s_{máx}}$ por meio da equação proposta tornaria mais simples e rápida a determinação da DR de um solo bem como o seu grau de compactação.

Da comparação dos valores da DR calculada, a partir da $D_{s_{máx}}$ obtida pelo ensaio de Proctor e da D_s e da DR calculada a partir de $D_{s_{máx}}$ estimada pela equação 1 e a D_s , utilizando-se o teste T para duas populações, verificou-se que essas populações não diferem entre si em um nível de probabilidade de 0,05.

As relações estabelecidas entre a DR e o teor de argila (Figura 2) indicaram que, nos solos em plantio direto, há redução da DR em função do aumento do teor de argila, indicando que, para esses solos, a energia aplicada no ensaio de Proctor Normal (560 kPa) altera a estabilidade estrutural dos microagregados, aumentando, assim, a $D_{s_{máx}}$. De qualquer forma, em solos argilosos, a DR crítica é menor comparada com solos arenosos, principalmente pelo incremento na resistência mecânica do solo à penetração das raízes pela maior coesão entre as partículas (ELLIES; MAC DONALD, 1985).

Tabela 2. Teor de argila, silte, areia e matéria orgânica (MO), densidade do solo máxima ($D_{s_{máx}}$), densidade do solo (D_s), densidade relativa (DR) calculada e estimada a partir $D_{s_{máx}}$ estimada.

Município / Profundidade (cm)	MO	Argila	Silte	Areia	$D_{s_{máx}}$	D_s^1	DR	
							(g kg ⁻¹)	
Santa Maria								
0 a 5	24	136,01	138,08	725,91	1,86	1,61	0,868	0,872
5 a 10	10	127,37	215,41	657,22	1,90	1,71	0,901	0,900
10 a 15	7	146,79	167,58	685,63	1,91	1,76	0,921	0,927
15 a 20	6	147,96	238,09	613,95	1,90	1,80	0,945	0,945
20 a 25	6	156,57	236,73	606,69	1,91	1,76	0,922	0,931
25 a 30	5	158,37	175,05	666,58	1,92	1,76	0,916	0,930
Pontão								
0 a 5	28	362,82	110,05	527,13	1,62	1,35	0,833	0,810
5 a 10	28	385,00	107,10	507,90	1,68	1,47	0,875	0,893
10 a 15	28	374,84	85,83	539,33	1,64	1,51	0,924	0,913
15 a 20	23	358,03	114,73	527,23	1,69	1,51	0,894	0,898
20 a 25	24	370,33	111,33	518,34	1,66	1,47	0,885	0,881
25 a 30	24	382,30	125,88	491,82	1,67	1,48	0,891	0,893
Passo Fundo (Biotério)								
0 a 5	43	382,38	118,41	499,21	1,56	1,25	0,801	0,778
5 a 10	36	399,86	122,43	477,72	1,62	1,46	0,901	0,905
10 a 15	26	420,62	100,17	479,21	1,64	1,53	0,928	0,938
15 a 20	14	408,90	127,58	463,52	1,64	1,49	0,907	0,887
20 a 25	14	426,61	106,04	467,35	1,58	1,44	0,914	0,867
25 a 30	14	450,57	99,48	449,95	1,60	1,38	0,863	0,841
Passo Fundo (UPF)								
0 a 5	35	467,72	163,86	368,42	1,55	1,31	0,844	0,838
5 a 10	33	481,80	158,97	359,24	1,55	1,38	0,889	0,887
10 a 15	26	479,46	155,21	365,33	1,57	1,38	0,879	0,872
15 a 20	26	482,22	162,72	355,06	1,57	1,37	0,876	0,869
20 a 25	26	468,06	157,21	374,73	1,55	1,36	0,873	0,853
25 a 30	26	485,78	160,23	353,99	1,54	1,36	0,882	0,862
Sarandi								
0 a 5	44	520,90	161,64	317,46	1,47	1,29	0,877	0,865
5 a 10	32	545,45	174,73	279,83	1,52	1,35	0,886	0,894
10 a 15	27	543,36	174,51	282,13	1,54	1,34	0,869	0,878
15 a 20	25	532,89	162,92	304,19	1,55	1,34	0,865	0,866
20 a 25	24	584,20	126,47	289,32	1,52	1,32	0,868	0,873
25 a 30	22	531,94	199,96	268,11	1,50	1,34	0,896	0,864
Cruz Alta								
0 a 5	46	519,34	252,80	227,86	1,47	1,28	0,871	0,858
5 a 10	36	568,73	219,11	212,16	1,53	1,48	0,967	1,001
10 a 15	27	588,85	229,31	181,84	1,55	1,48	0,950	0,988
15 a 20	17	606,37	217,45	176,18	1,54	1,39	0,903	0,920
20 a 25	16	586,36	242,56	171,08	1,50	1,33	0,890	0,869
25 a 30	15	615,88	216,91	167,21	1,51	1,33	0,883	0,880
Ibirubá								
0 a 5	38	569,88	219,74	210,38	1,52	1,37	0,901	0,928
5 a 10	33	586,84	221,70	191,46	1,56	1,38	0,888	0,937
10 a 15	31	586,88	226,95	186,17	1,53	1,39	0,914	0,940
15 a 20	28	626,46	194,26	179,27	1,50	1,34	0,894	0,914
20 a 25	24	645,82	194,98	159,20	1,46	1,31	0,900	0,898
25 a 30	24	652,62	187,18	160,20	1,44	1,25	0,866	0,858
Água Santa								
0 a 5	55	597,10	299,00	103,90	1,39	1,19	0,856	0,853
5 a 10	41	637,44	286,48	76,07	1,45	1,25	0,862	0,887
10 a 15	39	643,57	283,69	72,74	1,47	1,25	0,854	0,886
15 a 20	34	660,07	273,93	66,00	1,46	1,25	0,855	0,883
20 a 25	31	677,47	256,61	65,92	1,45	1,25	0,866	0,886
25 a 30	26	746,74	198,25	55,01	1,43	1,18	0,824	0,857
Lagoa Vermelha								
0 a 5	71	679,51	229,73	90,76	1,25	1,05	0,841	0,821
5 a 10	59	716,49	207,66	75,85	1,29	1,12	0,865	0,866
10 a 15	49	739,96	206,89	53,16	1,29	1,06	0,821	0,810
15 a 20	47	755,57	199,87	44,57	1,29	1,08	0,836	0,830
20 a 25	46	764,06	188,94	47,00	1,30	1,06	0,815	0,814
25 a 30	39	746,99	204,49	48,52	1,29	1,04	0,806	0,781
Ibiaçá								
0 a 5	59	739,38	234,90	25,72	1,30	1,08	0,831	0,845
5 a 10	43	732,28	240,21	27,51	1,31	1,11	0,842	0,829
10 a 15	37	751,84	229,52	18,64	1,31	1,12	0,856	0,837
15 a 20	33	775,44	207,25	17,31	1,32	1,07	0,814	0,804
20 a 25	32	776,69	205,38	17,93	1,30	1,06	0,818	0,796
25 a 30	30	779,48	202,59	17,93	1,27	1,06	0,834	0,791

1 = Média de seis repetições.

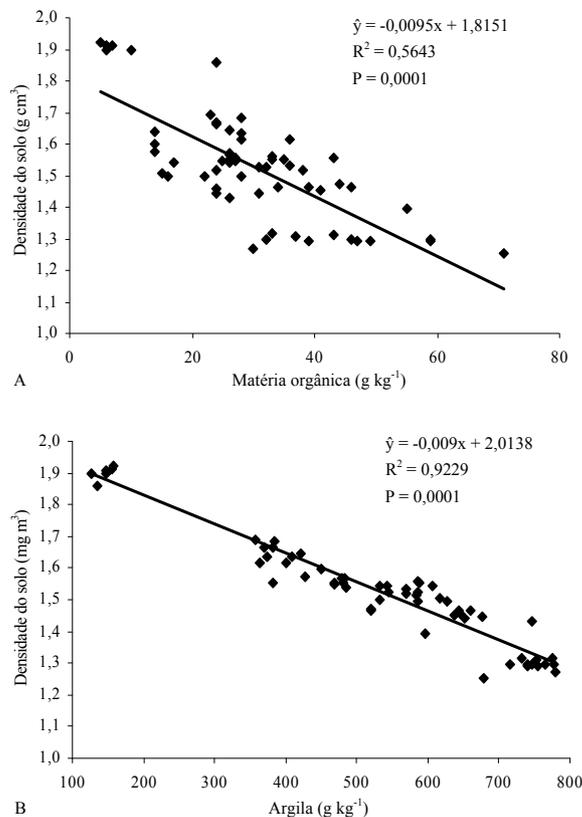


Figura 1. Variação da densidade do solo máxima em função dos conteúdos de matéria orgânica (A) e argila do solo (B).

A utilização da DR como uma variável que caracteriza o grau de compactação do solo por meio da D_s normalizada (CARTER, 1990; FERRERAS et al., 2001), como o próprio conceito propõe, é relativa, visto que a definição de valores ótimos ou restritivos ao desenvolvimento das plantas dependerá das condições climáticas vigentes (TORRES; SARAIVA, 1999). Entretanto, o modelo proposto pode servir com um bom indicador do grau de compactação dos solos agrícolas.

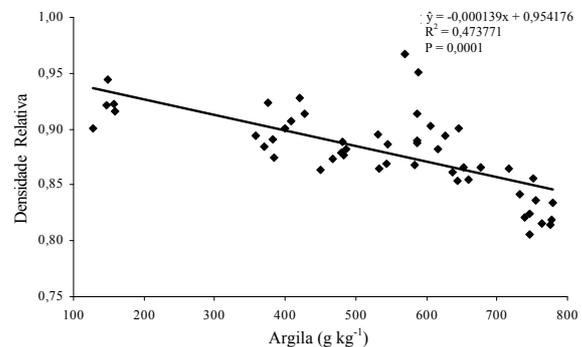


Figura 2. Densidade relativa (DR) em função do teor de argila.

Em acordo com os valores de DR crítica obtidos por Torres e Saraiva (1999), os quais variam entre 0,84 e 0,87 para um Latossolo Roxo, os solos

argilosos avaliados nesse estudo apresentam boa qualidade física.

Conclusão

Para os solos do Estado do Rio Grande do Sul pode ser utilizada a função para a densidade do solo máxima $D_{s_{m\acute{a}x}} = 2,03133855 - 0,00320878 MO - 0,00076508$ argila. A densidade relativa do solo pode ser estimada, utilizando-se a densidade do solo máxima estimada.

Agradecimentos

A Fapergs e ao CNPq pelo apoio financeiro e aos acadêmicos de Agronomia Fernando Fávero, Fábio Fernando Durigon e Fábio Francisco Signor pelo auxílio nas pesquisas.

Referências

ARAGÓN, A.; GARCIA, M. G.; FILGUEIRA, R. R.; PACHEPSKY, Y. A. Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test: the relationship with organic carbon and water content. **Soil and Tillage Research**, v. 56, n. 3, p. 197-204, 2000.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produção de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 6, p. 843-849, 2005.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 14th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2008.

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.

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. **Mecânica dos solos**. São Carlos: USP/EESC, 1998.

CARTER, M. R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 70, n. 3, p. 425-433, 1990.

DIAS JÚNIOR, M. S.; MIRANDA, E. E. V. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de Lavras (MG). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 24, n. 2, p. 337-346, 2000.

ELLIES, A.; MAC DONALD, R. Evaluacion de la consistencia de los principales suelos de las provincias de valdivia y osorno. **Agro Sur**, v. 13, n. 2, p. 77-83, 1985.

FERRERAS, L. A.; BATTISTA, J. J.; AUSILIO, A.; PECORARI, C. Parâmetros físicos del suelo en condiciones no perturbadas y bajo laboro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 1, p. 161-170, 2001.

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. 2, p. 487-493, 2000.
- HAKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil and Tillage Research**, v. 16, n. 1, p. 105-120, 1990.
- HAKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil and Tillage Research**, v. 53, n. 2, p. 71-85, 2000.
- KLEIN, V. A. Densidade relativa: um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. **Revista de Ciência Agroveterinária**, v. 5, n. 1, p. 26-32, 2006.
- KLEIN, V. A. **Física do solo**. Passo Fundo: Ediupf, 2008.
- KRZIC, M.; BULMER, C.; TESTE, F.; RAHMAN, S.; DAMPIER, L. **Relative measure of bulk density to characterize compaction of forest soils caused by harvest**. Vancouver: UBC, 2003. (Final Report R2003-0219).
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Edusp, 2005.
- LIPIEC, J.; HAKANSSON, I.; TARKIEWICZ, S.; KOSSOWSKI, 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, p. 307-317, 1991.
- NHANTUMBO, A. B. J. C.; CAMBULE, A. H. Bulk density by Proctor test as a function of texture for agricultural soils in Maputo province of Mozambique. **Soil and Tillage Research**, v. 87, n. 2, p. 231-239, 2006.
- NOGUEIRA, J. B. **Mecânica dos solos**: ensaios de laboratório. São Carlos: USP/EESC, 1998.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera**: conceito, processo e aplicações. Barueri: Manole, 2004.
- RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia, base para distinção de ambientes**. 5 ed. Lavras: UFLA, 2007.
- RUIZ, V. H. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte+argila). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 2, p. 297-300, 2005.
- SANTOS, G. A.; DIAS JÚNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; FURTINI NETO, A. E. Diferentes graus de compactação e fornecimento de fósforo influenciando no crescimento de plantas de milho (*Zea mays* L.) cultivado em solos distintos. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, n. 4, p.740-750, 2005.
- SAS-Statistical Analysis System. **SAS/STAT procedure guide for personal computers**. 5th ed. Cary: Statistical Analysis System Institute, 1996.
- STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Emater, 2002.
- TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHEN, H.; VOLRWEIS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 1995.
- TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Embrapa Soja, 1999. (Circular técnica, 23).
- VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: USP, 1977.

Received on January 10, 2009.

Accepted on May 1, 2009.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.