

Diâmetro Médio Ponderado de Partículas para Estimativa de Propriedades Físico-Hídricas dos Solos

Gilson Antonio Milde^(1,2), Renato Antonio Dedecek⁽¹⁾, José Luiz Gava⁽³⁾

⁽¹⁾Embrapa Florestas, Estrada da Ribeira, Km 111, Caixa Postal-319, CEP 83411-000, Colombo-PR. E-mail: milde@uol.com.br; dedecek@cnpf.embrapa.br; ⁽²⁾Parte da dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, UFPR. ⁽³⁾Cia Suzano de Papel e Celulose, Rodovia Raposo Tavares, Km 169, CEP 18200-000, Itapetininga-SP, E-mail: jgava@suzano.com.br

Resumo - O principal objetivo deste trabalho foi estimar características físico-hídricas do solo de difícil obtenção, através de modelos matemáticos baseados em variáveis das análises de rotina. Foram selecionados, em áreas de plantações florestais, 13 solos variando de 40 a 590 g kg⁻¹ de conteúdo de argila. Nestes solos, foram obtidas amostras deformadas e indeformadas na camada de 5 cm a 15 cm, e realizadas, em laboratório, análises químicas (complexo sortivo, pH, acidez potencial) e físicas (densidade do solo, curva de retenção de umidade e porosidades). Estabeleceram-se correlações entre as variáveis umidade ótima do solo para compactação e umidade na capacidade de campo com todos os parâmetros químicos e físicos analisados. A característica do solo que apresentou o maior índice de correlação com umidade ótima ($r = 0,95$) e com capacidade de campo ($r = 0,93$) foi o diâmetro médio ponderado de partículas (DMPP). O DMPP pode ser obtido em todos os levantamentos de solo já realizados e é a soma da multiplicação entre o diâmetro médio das quatro frações granulométricas e suas concentrações no solo. A umidade do solo à -1500 kPa também se correlacionou com o DMPP ($r = 0,93$), o que permite estimar a quantidade de água disponível para as plantas.

Termos para indexação: curva de retenção de água, função de pedotransferência, umidade ótima para compactação.

Average Soil Particles Diameter to Predict some Soil Physical Properties

Abstract - The main purpose of this work was to estimate soil physical characteristics that are time consuming, developing mathematical models based on others characteristics obtained routinely on soil laboratories. Thirteen soils were selected varying from 40 to 590 g kg⁻¹ of clay content. From these soils, undisturbed and bulk samples were obtained at 5 cm to 15 cm soil layer, and determined in laboratory, chemical (sorptive complex, pH and potential acidity) and physical (bulk density, desorption curve and porosities) characteristics. Correlation was established among optimum soil water content and soil water at field capacity and the chemical and physical soil characteristics obtained. The soil characteristic that showed the highest correlation coefficient with optimum water content ($r = 0.93$) and with water at field capacity ($r = 0.93$) was the average soil particle diameter (ASPD). This soil attribute can be obtained from most soil surveys existing in Brazil and it is the sum of the multiplication of average particle diameter of four particle classes to their soil content. Soil water content at -1500 kPa was also well correlated to ASPD; this allows calculating the amount of available water for plants.

Index terms: soil moisture retention curve, pedotransfer function, optimum soil water content to compaction.

Introdução

A colheita mecanizada de florestas envolve tráfego intenso e pesado de máquinas e tem sido a principal causa de compactação dos solos. O mais significativo impacto nas propriedades físicas do solo sob florestas ocorre nas operações de corte, baldeio e subsequente preparo do solo para exploração da rebrota ou replantio. Estas atividades alteram a estrutura e as propriedades físico-hídricas do solo, dificultando o crescimento e a

distribuição de raízes e, conseqüentemente, o desenvolvimento da floresta. O conhecimento das propriedades físico-hídricas do solo é indispensável para aprimorar o seu manejo e o da água, e com isso contribuir para a solução de problemas agrícolas, ecológicos e ambientais (HOWARD et al., 1981).

A umidade ótima para compactação do solo é uma importante propriedade para guiar o manejo, e refere-se ao conteúdo de água no qual o mesmo pode atingir a máxima densidade quando submetido a forças externas

de compactação. Segundo Howard et al. (1981), os solos que apresentam umidade ótima para compactação acima da capacidade de campo seriam mais susceptíveis à compactação por um tempo maior. Esta tensão de água em solos bem estruturados, como os Latossolos, corresponde normalmente à -10 kPa, uma vez que tem se observado que a porosidade de aeração nestas tensões é maior que o limite mínimo (10 % a 15 %) para respiração das raízes das plantas (WEAVER; JAMISON, 1951).

A umidade equivalente à capacidade de campo corresponde a uma das tensões da curva de retenção de água do solo e pode ser relacionada com várias características e propriedades físicas e químicas do solo, que são únicas para cada um (MINASNY et al., 1999; CORNELIS et al., 2001, ZHUANG et al., 2001). Nesse sentido, embora de grande importância, tanto a umidade ótima para compactação como a curva de retenção de água no solo são pouco usadas porque a mensuração é muito cara, consome muito tempo e trabalho laboratorial intenso.

Muito esforço tem sido feito no sentido de obter modelos matemáticos para estimar propriedades físico-hídricas do solo de um modo mais simples e mais rápido, com base na granulometria e na estrutura do solo. Estes modelos são chamados de funções de pedotransferência (BOUMA, 1989; CORNELIS et al., 2001). Segundo Minasny et al. (1999), as funções de pedotransferência, usadas na predição da curva de retenção de água no solo, podem ser divididas em três tipos: estimativa pontual, estimativa paramétrica e modelo físico-empírico.

Na Austrália, onde o estudo de funções de pedotransferência tem sido mais intenso, Minasny et al. (1999) comentam que, pelas características distintas dos solos existentes, modelos de pedotransferência desenvolvidos em outros locais não seriam diretamente aplicáveis àquelas condições. No Brasil, vários modelos estimativos da curva característica de retenção de água no solo têm sido desenvolvidos, como pode ser verificado pelo número de trabalhos nesta linha apresentados no último congresso da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, em 2005 (OLIVEIRA; COSTA, 2005; LOPES-ASSAD et al., 2005; SANTOS et al., 2005; OLIVEIRA et al., 2005).

Neste trabalho, procurou-se desenvolver um modelo matemático, usando-se características e propriedades do solo que são obtidas por determinações de rotina nos

laboratórios, para estimar outras características físico-hídricas, que são mais demoradas, exigem aparelhos específicos e apresentam custo mais elevado.

Material e Métodos

Os solos amostrados foram obtidos em plantações florestais da Cia. Suzano de Papel e Celulose, mais especificamente nas fazendas Ariona e Santa Rosa, situadas, respectivamente, nos municípios de Itatinga e São Miguel do Arcanjo, no Estado de São Paulo. Os municípios localizam-se na Bacia do Rio Paraná, em dois grandes grupos litológicos: no primeiro, os grupos São Bento e Bauru, e no segundo, em sedimentos e depósitos, principalmente arenitos, siltitos e filitos.

Com base no levantamento Semi-detalhado de 1994 de solos das áreas da empresa, procuraram-se solos de diferente composição granulométrica, variando desde 40 g Kg⁻¹ de argila até 590 g Kg⁻¹ de argila, conforme discriminado na Tabela 1.

Tabela 1. Teor de argila e abreviatura usada para as classes de solo que constaram deste estudo, classificadas pelo teor de argila.

Classe de solo	Símbolo	Teor de argila g.kg ⁻¹
Neossolo Quartzarênico Órtico	RQ1	40
Neossolo Quartzarênico Órtico	RQ2	40
Neossolo Quartzarênico Órtico	RQ3	80
Latossolo Vermelho Eutrófico	LV1	88
Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico	LA1	250
Argissolo Vermelho-Amarelo Álico	PA1	250
Argissolo Vermelho-Amarelo Álico	PA2	288
Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico	LA2	300
Latossolo Vermelho Distrófico	LV2	330
Latossolo Vermelho Distrófico	LV3	350
Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico	LA4	400
Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	PA3	470
Latossolo Vermelho Distrófico	LV4	590

Para cada um dos 13 solos selecionados foram coletadas amostras deformadas e indeformadas na profundidade de 5 cm a 15 cm, em quatro repetições. A análise granulométrica foi efetuada em amostras deformadas e secas ao ar, pelo método da pipeta, usando-se hidróxido de sódio 1 mol L⁻¹ como dispersante, e os teores de areia foram obtidos por peneiramento, de acordo com Embrapa (1997).

As determinações químicas dos solos contemplaram Ca, Mg, K, Na, Al, H + Al, C orgânico, pH em água, pH em HCl, pH em CaCl₂, e P disponível (RAIJ; QUAGGIO, 1983; EMBRAPA, 1997). A partir dos valores obtidos, foram calculadas a soma de bases (S), a CTC (T), a saturação por bases (V) e a saturação por Al.

Amostras indeformadas de solo foram coletadas em anéis volumétricos para determinação da curva de retenção de água no solo, densidade do solo, porosidade total e macro e microporosidade. Para a determinação da curva de retenção de água no solo, foram aplicadas as seguintes tensões aos corpos de prova: saturação, -6, -10, -100 e -1500 kPa (EMBRAPA, 1997). O método usado para determinação dos limites plástico e líquido dos solos seguiu descrição apresentada em Embrapa (1997). Para obtenção da curva de compactação e a compactação máxima do solo, foram utilizadas amostras deformadas, sendo, para cada classe de solo, utilizados sete corpos de prova que receberam 25 golpes do martelo usado no ensaio de PROCTOR normal, correspondendo a uma energia de compactação de 200 kPa cm⁻². Cada corpo de prova foi compactado em sete umidades distintas, sendo três umidades para obter dados no ramo seco, uma umidade próxima ao ponto de máxima compactação e três no ramo úmido da curva de compactação (HÄKANSSON, 1990). Para cada umidade, terminado os ensaios de compactação, foi coletada, na parte central do corpo de prova, uma amostra para a determinação da curva característica de água do solo por secagem (KLUTE, 1986).

Para a avaliação dos dados obtidos, foram utilizados testes de regressão linear entre os parâmetros químicos e físicos do solo e as principais características físico-hídricas que interessavam estimar, com ênfase na umidade ótima do solo para compactação e umidade na capacidade de campo. Com base nesta análise, foram selecionadas as variáveis químicas e físicas para geração de um modelo para estimativa dos atributos físico-hídricos do solo a partir de características e propriedades do solo de mais fácil determinação em laboratório, sendo

utilizado o teste de regressão (*Foward Stepwise Regression*).

Resultados e Discussão

Os solos amostrados encontram-se identificados na Tabela 2 em ordem crescente de teor de argila, mesma seqüência da Tabela 1, onde são apresentadas algumas propriedades químicas determinadas neste estudo.

Tabela 2. Alguns atributos químicos dos solos amostrados na camada de 5 cm a 15 cm.

Classe de solo*	pH CaCl ₂	K	Ca	Mg	CTC	Saturação		P Mg.dm ⁻³	C orgânico g.kg ⁻¹
						Bases %	Al %		
RQ1	3,50	0,02	0,17	0,16	4,15	8,4	81,9	0,3	9,8
RQ2	3,50	0,02	0,19	0,09	3,40	8,8	78,0	1,9	10,4
RQ3	3,70	0,02	0,32	0,29	7,03	9,0	74,9	1,4	9,6
LV1	3,90	0,02	0,16	0,10	3,68	7,6	75,0	1,6	7,5
LA1	4,10	0,60	5,00	2,00	13,08	65,3	10,6	1,6	21,0
PA1	4,20	0,98	5,00	2,00	12,08	67,4	4,7	1,9	20,0
PA2	4,50	0,50	7,00	1,60	12,60	73,0	6,1	1,7	17,9
LA2	4,70	0,70	6,80	2,00	13,80	68,8	8,7	1,8	18,0
LV2	4,56	0,40	6,00	1,80	12,50	65,6	9,9	1,5	17,5
LV3	5,30	0,98	6,00	2,00	13,58	66,6	10,0	1,3	16,3
LA4	4,80	0,60	7,00	2,00	14,60	66,4	5,8	1,9	19,0
PA3	4,30	0,98	6,1	1,70	13,55	71,3	3,1	1,5	18,3
LV4	4,30	0,10	3,40	1,00	9,0	51,1	11,5	1,6	16,5

* Código usado para identificar as diferentes classes de solo conforme Tabela 1.

É importante notar que os valores baixos, principalmente de C orgânico são principalmente devido à camada de solo amostrada de 5 cm a 15 cm. Algumas características químicas apresentaram altos coeficientes de correlação (r) com a umidade do solo ótima para compactação e na capacidade de campo, como os teores de Ca (0,85 e 0,88, respectivamente), Mg (0,84 e 0,85), Al (-0,93 e -0,96), carbono orgânico (0,84 e 0,89), soma de bases (0,82 e 0,85) e CTC (0,81 e 0,83). A capacidade de troca de cátions é a característica química mais usada em funções de pedotransferência para estimar características mecânicas do solo, combinada com teor de argila para estimar índice de plasticidade e umidade ótima de compactação (SILVA et al., 1994) e/ou com o teor de silte (ARAGÓN et al., 2000). Estas características químicas, quando combinadas com outras

características do solo em testes de regressão, não melhoraram os modelos obtidos, sendo mais eficiente o uso isolado do diâmetro médio ponderado das partículas (DMPP).

Os solos foram selecionados para este trabalho em função do teor de argila, independente do tipo de solo ou da sua classificação. O DMPP foi calculado com base na separação de dois tamanhos de areia (fina e grossa), silte e argila, a mesma distribuição usada na maioria dos levantamentos de solo (EMBRAPA, 1999). Tomou-se o valor médio de cada intervalo de classe de tamanho de partículas e multiplicou-se pelo teor em gramas por grama. Assim, o diâmetro médio da partícula areia fina é de 0,15 mm, para areia grossa 1,125 mm, para silte 0,026 mm e para argila usou-se o valor de 0,002 mm. Exemplificando para o solo RQ1 (Neossolo Quartzarênico Órtico):

$DMPP = (0,19 \cdot 0,15) + (0,73 \cdot 1,125) + (0,04 \cdot 0,026) + (0,04 \cdot 0,002) = 0,851$ (Tabela 3).

Usando-se esta expressão, quanto mais arenoso o solo, maior o valor do DMPP, ocorrendo o inverso quando a dominância é da fração argila. O valor máximo do DMPP seria de 1,125, no caso de um solo constituído apenas de areia grossa. Foi testada a divisão da fração areia em quatro classes, semelhante ao usado pelo Serviço de Conservação de Solos dos Estados Unidos, que usa dividir em cinco classes (SCS, 1967), no entanto, o diâmetro médio ponderado de partículas assim calculado apresentou menores índices de correlação com as características físico-hídricas do solo.

Seguem, na Tabela 4, os valores médios de algumas das propriedades físico-hídricas do solo determinadas para os solos selecionados, que formaram o banco de dados usados para as correlações com os valores de DMPP de cada solo. Como se observa, a variação dos valores de cada uma das características determinadas ocorre principalmente em função da distribuição granulométrica de cada solo. Alguns valores mais altos de densidade do solo são devidos à compactação existente, uma vez que se trata de área de rebrota de

Tabela 3. Distribuição do tamanho de partículas e valores calculados do diâmetro médio ponderado de partículas (DMPP) dos solos amostrados.

Classe de solo*	Areia			Silte	Argila	DMPP
	Fina	Grossa	Total			
g.kg ⁻¹						
RQ1	190	730	920	40	40	0,851
RQ2	210	740	950	10	40	0,864
RQ3	260	620	880	40	80	0,738
LV1	350	490	840	70	88	0,606
LA1	290	330	620	130	250	0,419
PA1	530	120	650	100	250	0,218
PA2	390	200	590	120	288	0,287
LA2	240	300	540	160	300	0,378
LV2	410	120	530	120	330	0,200
LV3	220	280	500	150	350	0,353
LA4	360	90	450	150	400	0,160
PA3	300	70	370	160	470	0,129
LV4	200	60	260	150	590	0,103

* Código usado para identificar as diferentes classes de solo conforme Tabela 1.

eucaliptos em segunda rotação, o que pressupõe que, no mínimo, três cortes rasos tenham sido efetuados. Além da passagem das máquinas de colheita, ocorrem as passagens de máquinas para preparo do solo, aplicação de herbicida e distribuição de adubo. Observa-se, também, que a partir de um determinado teor de argila no solo, a variação dos valores de umidade ótima para compactação é muito pequena.

Tabela 4. Algumas propriedades físico-hídricas dos solos amostrados na camada de 5 cm a 15 cm.

Classe de solo*	Densidade		Umidade ótima	Porosidade		Retenção de água (kPa)			
	Global	Máxima compact.		Total	Macro	-6	-10	-100	-1500
	Kg.dm ⁻³		g.g ⁻¹						
RQ1	1,300	1,770	0,14	0,475	0,174	0,419	0,135	0,086	0,035
RQ2	1,340	1,770	0,15	0,504	0,158	0,463	0,150	0,082	0,034
RQ3	1,470	1,858	0,16	0,447	0,142	0,449	0,120	0,079	0,032
LV1	1,480	1,940	0,18	0,487	0,169	0,397	0,142	0,081	0,033
LA1	1,523	1,870	0,22	0,401	0,151	0,380	0,372	0,195	0,135
PA1	1,830	2,235	0,28	0,293	0,146	0,270	0,269	0,167	0,129
PA2	1,600	2,060	0,25	0,389	0,163	0,361	0,357	0,211	0,160
LA2	1,280	1,860	0,24	0,513	0,195	0,451	0,431	0,228	0,177
LV2	1,690	2,160	0,26	0,357	0,154	0,343	0,337	0,219	0,159
LV3	1,315	1,850	0,24	0,513	0,195	0,418	0,409	0,209	0,140
LA4	1,530	1,970	0,25	0,414	0,171	0,372	0,365	0,230	0,180
PA3	1,630	1,920	0,25	0,378	0,177	0,327	0,319	0,246	0,186
LV4	1,780	2,170	0,26	0,323	0,159	0,293	0,290	0,209	0,136

* Código usado para identificar as diferentes classes de solo conforme Tabela 1.

Na Tabela 5, são mostradas as equações de regressão lineares obtidas entre os valores de algumas propriedades físico-hídricas do solo e os valores de DMPP, além do índice de correlação e os valores de probabilidade destes índices. Foram encontradas altas correlações com DMPP e a quantidade de água retida a -10, -100 e -1.500 kPa e a quantidade de água ótima para compactação do solo. Lopes-Assad et al. (2005) também encontraram forte correlação entre o teor de silte mais argila e a quantidade de água retida a -33 e -1.500 kPa. Wösten et al. (2001) comentam que a distribuição de tamanho das partículas é usada em quase todas as funções de pedotransferência e que é desejável ter funções para aproximar a distribuição inteira, especialmente quando esta distribuição de tamanho de partículas é caracterizada por um limitado número de frações. Minasny et al. (1999) afirmam que o diâmetro médio das partículas é muito útil em solos com grande variação granulométrica.

Na menor tensão de água no solo (-6 kPa), foi obtida a menor correlação com o DMPP, provavelmente

porque neste parâmetro não está incluída nenhuma variável que caracterize a estrutura atual do solo. Conforme Hillel (1980), a água retida no solo nas baixas tensões é dependente principalmente da estrutura do solo. Índices de correlação relativamente altos foram obtidos entre o DMPP e a umidade no solo para os limites líquido e plástico. A tensão da água no solo de -10 kPa pode ser usada como a capacidade de campo para os solos amostrados, porque, nesta tensão, dificilmente a porosidade de aeração (diferença do teor de umidade na porosidade total e na umidade a -10 kPa) é menor que 10 % a 15 % (Tabela 4), tido como limite para o suprimento de O₂ para as raízes das plantas (WEAVER; JAMISON, 1951). Usando-se o teor de água no solo a -1.500 kPa como o mínimo de água passível de extração pelas plantas, o intervalo de água entre estas duas tensões poderia ser estimado com precisão, como se pode observar nos altos valores de (r) na Tabela 5. O teor de água disponível tem sido uma variável muito importante para a agricultura de precisão e raramente encontrada nos levantamentos de solo, além da dificuldade operacional em obtê-la.

A estimativa das variáveis – umidade do solo na capacidade de campo e teor de umidade do solo ótimo para a compactação – foram as que mais se destacaram neste trabalho. Estas estimativas obtidas por meio do DMPP foram significativas, considerando-se o alto índice de correlação apresentado (Tabela 5).

Tabela 5. Índice de correlação, equação de regressão linear e probabilidade entre algumas características físico-hídricas e o diâmetro médio ponderado de partículas para os solos amostrados.

Variável Y	Equação	r	Valor-P
Umidade gravimétrica a -6kPa	y = 0,058X + 0,442	0,685	2,15E-08
Umidade gravimétrica a -10 kPa	y = -0,541X + 0,579	0,932	1,01E-23
Umidade gravimétrica a -100 kPa	y = -0,539X + 0,531	0,915	2,29E-21
Umidade gravimétrica a -1500 kPa	y = -0,398X + 0,358	0,934	5,39E-24
Densidade global	y = -0,411X + 1,695	0,621	9,15E-7
Umidade ótima para compactação	y = -0,168X + 0,290	0,947	2,42E-26
Límite líquido	y = -0,119X + 0,313	0,804	7,15E-13
Límite plástico	y = -0,310X + 0,330	0,840	7,35E-15

Nas Figuras 1 e 2, estão representados os valores estimados, com base nas equações apresentadas na Tabela 5, e determinados para a umidade do solo na capacidade de campo e o teor de umidade ótima para compactação. Interessante salientar que o índice de regressão linear entre as variáveis calculadas pelo DMPP e determinadas em laboratório é o mesmo para a capacidade de campo e a umidade ótima para

compactação. Considerando-se que os dados apresentados nestas figuras mais próximos à origem dos eixos pertencem aos solos arenosos e os mais distantes aos solos argilosos, percebe-se que não há uma melhor correlação para as diferentes granulometrias do solo, diferente do observado por Wösten et al (2001), que constataram haver melhor estimativa das características de retenção de água para solos arenosos.

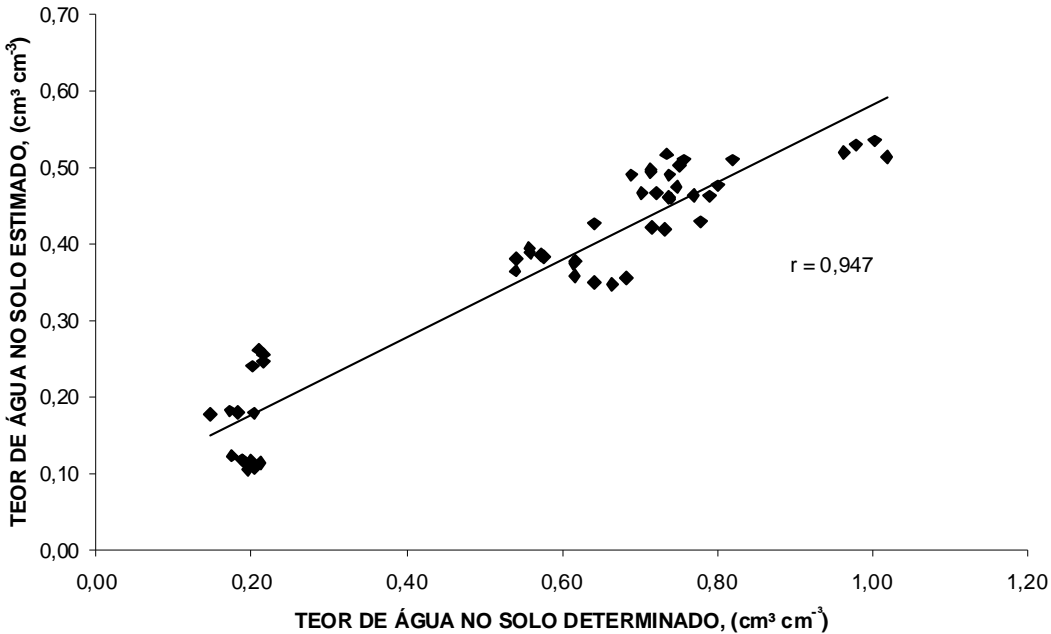


Figura 1. Regressão linear entre os valores determinados e estimados do teor de água no solo na capacidade de campo (-10 kPa) para os solos amostrados (n = 52).

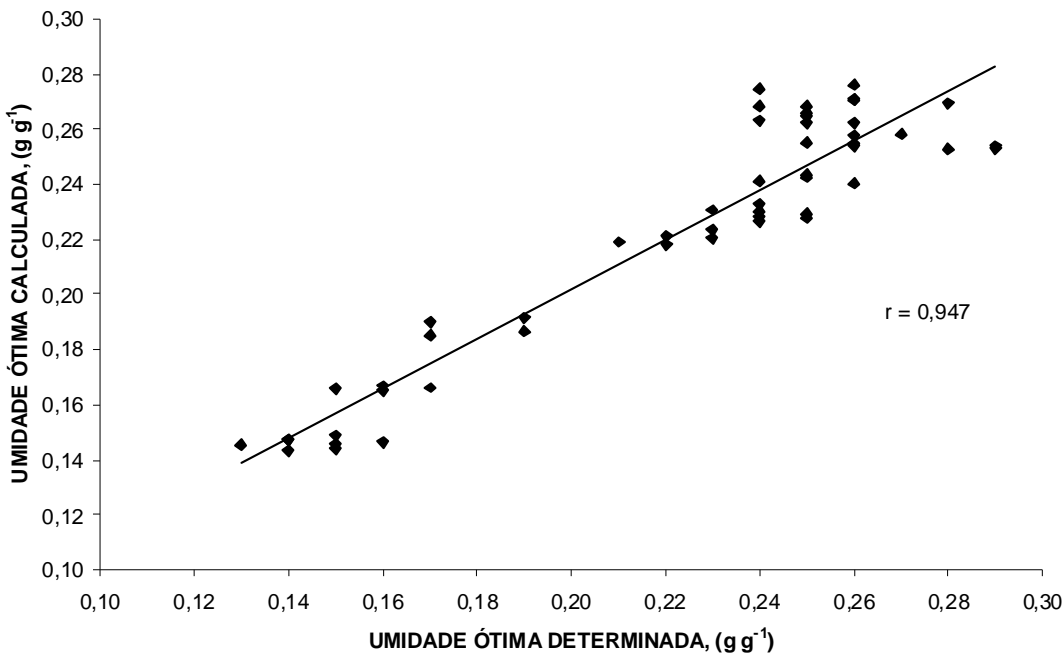


Figura 2. Regressão linear entre os valores determinados e estimados pelo uso do DMPP do teor de água ótimo para máxima compactação dos solos amostrados (n = 52).

Conclusões

1) O diâmetro médio ponderado das partículas do solo (DMPP) é o parâmetro, de mais fácil determinação, que permite estimar alguns atributos físico-hídricos do solo de mais difícil obtenção, com altos índices de correlação: umidade nas tensões de -10, -100 e -1.500 kPa e nos limites plástico e líquido;

2) O DMPP do solo permite estabelecer um modelo matemático para estimar o teor de água ótimo para compactação do solo e o teor de água na capacidade de campo (-10 kPa);

3) O DMPP permite estabelecer modelos matemáticos para estimar o teor de água no solo nas tensões de -100 e -1.500 kPa, o que possibilita a estimativa do teor de água disponível para as plantas;

4) Outras características químicas e físico-hídricas do solo apresentam altos índices de correlação com o teor de água no solo ótimo para compactação e na capacidade de campo, porém menores que os obtidos com o DMPP e não contribuem para o aumento dos índices de correlação quando incluídas nos modelos desenvolvidos.

Referências

- ARAGÓN, A.; GARCÍA, M. G.; FILGUEIRA, R. R.; PACHEPSKY, Ya. A. Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor Test. *Soil Tillage Research*, v. 56, p. 197-204. 2000.
- BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advances in Soil Science*, v. 9, p. 177-213. 1989.
- CORNELIS, W. M.; RONYSN, J.; van MEIRVENNE, M.; HARTMANN, R. Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve. *Soil Science Society of America Journal*, v. 65, p. 638-648. 2001.
- EMBRAPA Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997. 212 p. (EMBRAPA-CNPq; 1).
- EMBRAPA Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.
- HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil and Tillage Research*, v. 16, n. 1/2, p. 105-120. 1990.
- HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. 413 p.
- HOWARD, R. F.; SINGER, M. J.; FRANTZ, G. A. Effects of soil properties, water content, and compactive effort on the compaction of selected California forest and range soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 45, n. 2, p. 231-236. 1981.
- KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. ed. **Methods of soil analysis**. 2 ed. Madison, ASA – SSSA, 1986. p. 635-660.
- LOPES-ASSAD, M. L.; MARTINHO, P. R. R.; SILVA, C. P.; STORANI, D.; SANS, L. M. A. Estimativa de água retida em solos a partir da granulometria, teor de matéria orgânica e capacidade de troca catiônica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., 2005, Recife, PE. **Anais...** Recife: SBCS, 2005. 1 CD-ROM.
- MINASNY, B.; McBRATNEY, A. B.; BRISTOW, K. L. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. *Geoderma*, v. 93, p. 225-253. 1999.
- OLIVEIRA, C. A. S.; COSTA, W. A. Modelos de ajuste e métodos para determinação da curva característica de um latossolo vermelho-amarelo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., 2005, Recife, PE. **Anais...** Recife: SBCS, 2005. 1 CD-ROM.
- OLIVEIRA, L. B.; FONTES, M. P. F.; RIBEIRO, M. R.; KER, J. C. Funções de pedotransferência para estimativa da umidade retida a potenciais específicos por luvisolos do Nordeste Brasileiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., 2005, Recife, PE. **Anais...** Recife: SBCS, 2005. 1 CD-ROM.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A. Métodos de análise de solo para fins de fertilidade. **Boletim Técnico do Instituto Agrônomo de Campinas**, n. 81, p.1-31, 1983.
- SANTOS, M. L. M.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Predição e mapeamento de capacidade de retenção de água do solo usando funções de pedotransferência e modelagem quantitativa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., 2005, Recife, PE. **Anais...** Recife: SBCS, 2005. 1 CD-ROM.
- SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. *Soil Science Society of America Journal*, v. 58,1 p. 775-1781. 1994.
- SOIL CONSERVATION SERVICE. **Soil survey laboratory methods and procedures for collecting soil samples**. Washington: USDA/SCS, 1967. 246 p. (Soil Survey Investigations Report, 1).
- WEAVER, H. A.; JAMISON, V. C. Effects of moisture on tractor tire compaction of soil. *Soil Science*, v. 71, n. 1, p. 15-23. 1951.
- WÖSTEN, J. H. M.; PACHEPSKY, Ya. A.; RAWLS, W. J. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, v. 251, n. 3-4, p. 123-150. 2001.
- ZHUANG, J.; JIN, Y.; MIYAZAKI, T. Estimating water retention characteristic from soil particle-size distribution using a non-similar media concept. *Soil Science*, v. 166, n. 5, p. 308-321. 2001.

