

RELAÇÕES ENTRE PROPRIEDADES FÍSICAS E CARACTERÍSTICAS DE SOLOS DA REGIÃO SUL DO BRASIL⁽¹⁾

N. F. B. GIAROLA⁽²⁾, A. P. SILVA⁽³⁾ & S. IMHOFF⁽⁴⁾

RESUMO

Relações funcionais entre atributos dos solos podem ser utilizadas para associar certas propriedades físicas com características desses solos. Este trabalho teve como objetivo determinar as relações entre algumas propriedades físicas dos solos, especificamente densidade do solo (D_s), densidade de partículas (D_p) e capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e água disponível (θ_{AD}) e atributos rotineiramente determinados em levantamentos pedológicos. No estudo, foram utilizados 18 perfis representativos dos solos ocorrentes nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, região Sul do Brasil. Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas nos horizontes A e B para a determinação de D_s , D_p , θ_{CC} , θ_{PMP} e θ_{AD} , granulometria, matéria orgânica, óxidos de ferro e alumínio. As relações obtidas (regressões múltiplas) demonstraram que D_s , D_p , θ_{CC} , θ_{PMP} e θ_{AD} foram influenciadas por um número reduzido de características dos solos, especificamente teores de argila, silte e teor de óxidos de ferro e alumínio. Esses resultados preliminares podem servir para nortear o desenvolvimento de funções de pedotransferência para a região Sul do Brasil.

Termos de indexação: atributos físicos do solo, atributos químicos do solo, análise de regressão múltipla.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em janeiro de 2002 e aprovado em agosto de 2002.

⁽²⁾ Professora do Departamento de Ciências Agrárias, Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE. Rua Pernambuco 1777, CEP 85960-000 Marechal Rondon (PR) e Doutoranda em Solos e Nutrição de Plantas, Departamento de Solos e Nutrição de Plantas. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP. Av. Pádua Dias 11, CEP 13400-970 Piracicaba (SP). E-mail: neydef@unioeste.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP. E-mail: apisilva@esalq.usp.br

⁽⁴⁾ Professora da Universidad Nacional del Litoral (Argentina) e Doutoranda em Solos e Nutrição de Plantas, ESALQ/USP. E-mail: simhoff@fca.unl.edu.ar

SUMMARY: *RELATIONSHIPS BETWEEN PHYSICAL SOIL PROPERTIES AND CHARACTERISTICS OF SOUTH BRAZILIAN SOIL*

Functional relations between soil attributes may be used to associate different physical soil properties with soil characteristics. The objective of this work was to determine the relationships between some soil physical properties, namely bulk density (BD), particle density (PD), field capacity (θ_{FC}), permanent wilting point (θ_{PWP}) and available water capacity (θ_{AD}) with soil attributes measured in routine soil surveys. Eighteen representative soil profiles from Rio Grande do Sul and Santa Catarina State, Southern Brazil, were used in this study. Disturbed and undisturbed soil samples were collected from A and B horizons to quantify BD, PD, θ_{FC} , θ_{PWP} and θ_{AD} , particle size, organic matter, iron, and aluminum oxides. Multiple regressions demonstrated that BD, PD, θ_{FC} , θ_{PWP} and θ_{AD} were related with some soil characteristics, chiefly clay, silt and iron oxide contents. These preliminary results may help direct further studies on pedotransfer functions for Southern Brazil.

Index terms: physical soil attributes, chemical soil attributes, multiple regression analysis.

INTRODUÇÃO

Relações funcionais podem ser utilizadas para estimar propriedades físicas do solo a partir de características facilmente mensuráveis. Relações quantitativas entre a capacidade de campo, ponto de murcha permanente e a densidade do solo com a textura do solo foram determinadas por Arruda et al. (1987), para solos de São Paulo. Outras relações entre Ds e granulometria e carbono orgânico também foram obtidas por Bernoux et al. (1998), para solos da Bacia Amazônica. A evolução dessas relações consiste no desenvolvimento de funções mais abrangentes denominadas “funções de pedotransferência”.

As funções de pedotransferência (FPTs) são métodos utilizados para estimar atributos de solo a partir de dados de fácil aquisição (Bouma, 1989). As FPTs são úteis para transformar, por meio de regressões ou relações funcionais, a informação básica encontrada nos levantamentos de solos numa informação de aplicação mais ampla, tal como na modelagem de processos no solo (Wagenet et al., 1991; Bernoux et al., 1998).

As funções de pedotransferência foram utilizadas para estimar propriedades físicas do solo, como condutividade hidráulica e retenção de água, a partir da distribuição do tamanho de partículas, conteúdo de matéria orgânica e densidade do solo (Tietje & Tapkenhinrichs, 1992). Van den Berg et al. (1997) desenvolveram FPTs para modelar a retenção de água em Ferralsols/Oxisols da África, Ásia e América do Sul. Nesse trabalho, os parâmetros da equação de van Genuchten (1980) foram estimados utilizando valores da distribuição do tamanho de partículas, Fe e Al ditionito, teor de carbono orgânico e capacidade de troca de cátions. Recentemente, no Brasil, FPTs foram desenvolvidas e validadas por Tomasella et al. (2000), utilizando dados de 500 horizontes de solos

coletados nas regiões Norte, Nordeste e Sudeste. Essas FPTs permitem predizer os parâmetros da equação de van Genuchten.

O número de amostras para desenvolver FPTs deve ser elevado, para que as estimativas sejam representativas e confiáveis (Pachepsky & Rawls, 1999), o que, às vezes, torna o processo difícil e oneroso. Além disso, a qualidade de uma FPT pode ser melhorada, se forem definidas relações prévias com um número menor de amostras que indiquem as variáveis com maior grau de associação. A partir dessas relações, o número, o local de amostragem e as variáveis a serem analisadas podem ser mais bem definidas.

Na literatura, poucos trabalhos abordam as relações funcionais entre propriedades físicas e características de solos da região Sul do Brasil. Perfis de solos que abrangem a variação dos tipos de solos ocorrentes nessa região foram apresentados e discutidos na VI Reunião de Correlação, Classificação e Aplicação de Levantamentos de Solos (2000). Esse banco de perfis pode ser usado para estabelecer relações quantitativas entre atributos de solo.

O objetivo deste trabalho foi determinar as relações entre algumas propriedades físicas do solo, especificamente densidade do solo, densidade de partículas e retenção de água, e os atributos de solos representativos da região Sul do Brasil, com vistas em prover uma base de informações para orientar a tomada de decisão nos estudos de desenvolvimento de funções de pedotransferência, quanto à importância das variáveis analisadas.

MATERIAL E MÉTODOS

Neste estudo, foram utilizadas amostras deformadas e indeformadas dos horizontes A e B

provenientes de 18 perfis de solos representativos de diversos locais dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul (Quadro 1), apresentados e discutidos na VI Reunião de Correlação, Classificação e Aplicação de Levantamentos de Solos (2000), cujos resultados analíticos encontram-se no quadro 2. A classificação dos solos foi efetuada de acordo com EMBRAPA (1999).

As amostras deformadas foram secas ao ar e passadas por peneira com abertura de malha de 2 mm. A fração < 2 mm foi utilizada para as seguintes análises: distribuição do tamanho de partículas, usando a mistura hexametáfosfato de sódio + hidróxido de sódio 0,1 N como agente dispersante (IAC, 1986); o método da tamisação, para separar as cinco frações areia (0,053-2 mm), e o método do densímetro, para determinar silte (2-50 μm) e argila (< 2 μm); teor de carbono orgânico, de acordo com Walkley/Black; óxidos Al_2O_3 e Fe_2O_3 , determinados após digestão com H_2SO_4 1:1, conforme Vettori (1969) e EMBRAPA (1979). A retenção de água no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), foi realizada aplicando-se um potencial

mátrico (Ψ) de -1,5 MPa, em painéis de pressão de Richards, conforme Klute (1986), também foi determinada em amostras deformadas.

A retenção de água na capacidade de campo (θ_{CC}) foi medida em amostras com estrutura indeformada, coletadas em anéis cilíndricos de aço inox de 100 cm^3 . Em cada horizonte, foram coletadas duas amostras, perfazendo um total de 35 amostras, uma vez que do Cambissolo Háptico (Quadro 1) só foi coletado o horizonte A. Esse material foi, então, saturado por água e, em seguida, submetido a um ψ de -0,01 MPa em mesa de tensão, conforme Klute (1986). Posteriormente, determinou-se a densidade do solo (D_s), de acordo com Blake & Hartge (1986), após secagem do material em estufa a 105 °C, por 24 horas.

Os procedimentos estatísticos utilizados foram: (a) PROC MEANS (SAS, 1991), para caracterizar os dados; (b) PROC CORR (SAS, 1991), para estabelecer a correlação entre as variáveis, e (c) PROC REG (SAS, 1991), para desenvolver regressões múltiplas entre propriedades físicas e características rotineiramente determinadas em levantamentos de

Quadro 1. Classificação e localização dos perfis modais dos solos utilizados no estudo

Classificação	Localização	Material de origem
Planossolo Hidromórfico	Pelotas (RS)	sedimentos areno-argilosos do Grupo Patos, Quaternário
Podzólico Bruno-Acinzentado ⁽¹⁾	Canguçu (RS)	migmatitos do Sub-grupo Cambaí, Grupo Porongos, Pré-Cambriano
Argissolo Amarelo	Pinheiro Machado (RS)	migmatitos do Sub-grupo Cambaí, Grupo Porongos, Pré-Cambriano
Chernossolo Ebânico	Bagé (RS)	folhelhos silticos do Grupo Passa Dois, Permiano
Planossolo Hidromórfico	Bagé (RS)	folhelhos da Formação Irati, Grupo Passa Dois, Permiano
Luvissolo Hipocrômico	Bagé (RS)	migmatitos do Sub-Grupo Cambaí, Grupo Porongos, Pré-Cambriano
Luvissolo Hipocrômico	Bagé (RS)	folhelhos da Formação Irati, Grupo Passa Dois, Permiano
Podzólico Vermelho-Amarelo Álico ⁽¹⁾	Santa Maria (RS)	arenitos silticos das Formações Santa Maria e Rosário do Sul, Sub-Grupo Rio do Rastro, Triássico
Luvissolo Hipocrômico	São Sepé (RS)	siltitos areno-argilosos da Formação Palermo, Grupo Tubarão, Permiano
Latossolo Vermelho	Tupanciretã (RS)	arenitos da Formação Tupanciretã, Terciário
Latossolo Vermelho	Ibirubá (RS)	rochas basálticas do Grupo São Bento, Juro-Cretáceo
Latossolo Bruno	Muitos Capões (RS)	rochas basálticas do Grupo São Bento, Juro-Cretáceo
Latossolo Bruno	Vacaria (RS)	rochas basálticas do Grupo São Bento, Juro-Cretáceo
Cambissolo Háptico	Lages (SC)	Rochas vulcânicas ácidas (riodacito) do Grupo São Bento, Juro-Cretáceo
Nitossolo Háptico	Lages (SC)	rochas basálticas, Grupo São Bento, Juro-Cretáceo
Terra Bruna Estruturada Álica ⁽¹⁾	Lebon Régis (SC)	rochas basálticas do Grupo São Bento, Juro-Cretáceo
Latossolo Vermelho Ácrico	Canoinhas (SC)	folhelhos siltico-argilosos da Formação Rio Bonito, Grupo Guatá, Super Grupo Tubarão, Permiano
Podzólico Vermelho-Escuro ⁽¹⁾	Otaçílio Costa (SC)	siltitos da Formação Rio do Rastro, Grupo Passa Dois, Permiano

⁽¹⁾ Classificação de acordo com EMBRAPA (1988), pois não foi possível a classificação de acordo com EMBRAPA (1999).

Quadro 2. Resultados analíticos dos atributos dos solos analisados

Classificação do solo	Hor.	Característica do solo											
		MO	Dp	Ds	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{AD}	AG	AF	S	A	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
		%	g cm ⁻³		cm ³ cm ⁻³			g kg ⁻¹					
Planossolo Hidromórfico	Ap	1,97	2,56	1,51	0,22	0,11	0,12	285	356	258	101	19	7
	Bt _{gf}	0,67	2,60	1,38	0,34	0,28	0,06	193	214	215	378	109	38
Podzólico Bruno-Acinzentado ⁽¹⁾	Ap	2,84	2,53	1,35	0,32	0,17	0,15	266	203	285	246	71	26
	B	1,21	2,63	1,50	0,32	0,26	0,06	224	158	202	416	134	44
Argissolo Amarelo	Ap	2,33	2,60	1,35	0,20	0,13	0,07	442	215	221	122	38	21
	Bt ₁	1,19	2,63	1,48	0,31	0,29	0,03	276	100	188	436	146	38
Chernossolo Ebânico	Ap	3,93	2,60	1,48	0,37	0,22	0,15	21	475	256	248	46	25
	B	1,95	2,53	1,54	0,23	0,21	0,02	12	369	264	355	82	32
Planossolo Hidromórfico	Ap	1,78	2,53	1,32	0,28	0,09	0,19	274	312	313	101	17	8
	Bt _{g1}	1,05	2,60	1,64	0,37	0,33	0,04	206	227	210	357	86	29
Luvissolo Hipocrômico	Ap	2,59	2,50	1,37	0,27	0,15	0,13	382	212	243	163	44	23
	Bt	1,97	2,56	1,04	0,38	0,28	0,11	185	77	227	511	170	59
Luvissolo Hipocrômico	Ap	2,52	2,60	1,53	0,35	0,20	0,14	221	197	418	164	32	15
	Bt	1,62	2,53	1,39	0,43	0,34	0,09	168	145	393	294	70	25
Podzólico Vermelho-Amarelo Álico ⁽¹⁾	Ap	0,95	2,63	1,66	0,19	0,07	0,11	537	245	158	60	13	8
	Bt ₁	0,50	2,67	1,76	0,24	0,13	0,11	401	186	168	245	74	26
Luvissolo Hipocrômico	Ap	1,95	2,53	1,27	0,28	0,13	0,15	136	370	331	163	30	16
	Bt	1,48	2,63	1,33	0,41	0,31	0,11	103	286	238	373	89	29
Latossolo Vermelho	Ap	1,29	2,78	1,36	0,22	0,10	0,11	200	499	99	202	58	24
	Bw	0,52	2,67	1,51	0,29	0,18	0,11	148	466	123	263	86	34
Latossolo Vermelho	A ₁	3,28	2,74	1,04	0,36	0,25	0,11	78	137	212	573	173	187
	Bw ₁	1,19	2,78	1,15	0,44	0,34	0,10	31	51	135	783	220	169
Latossolo Bruno	Ap	5,34	2,63	1,06	0,42	0,32	0,10	29	43	264	664	197	179
	Bw ₁	0,72	2,78	0,91	0,47	0,32	0,15	16	27	151	806	219	197
Latossolo Bruno	A ₁	4,14	2,63	1,12	0,51	0,33	0,18	25	35	274	666	198	176
	Bw ₁	1,84	2,82	0,90	0,42	0,30	0,12	21	14	155	810	220	189
Cambissolo Háptico	A	6,78	2,74	0,93	0,44	0,31	0,08	81	58	341	520	177	98
Nitossolo Háptico	A ₁	4,59	2,74	1,19	0,45	0,29	0,16	116	109	280	495	166	140
	Bt ₁	1,07	2,74	1,38	0,50	0,36	0,14	89	99	151	661	191	155
Terra Bruna Estruturada Álica ⁽¹⁾	Ap	3,93	2,70	1,18	0,50	0,34	0,16	51	70	220	659	170	169
	Bt ₁	1,66	2,82	1,30	0,48	0,37	0,11	70	74	216	640	172	179
Latossolo Vermelho Ácrico	Ap	3,88	2,56	1,00	0,44	0,21	0,23	107	209	146	538	198	82
	Bw ₁	1,67	2,63	0,85	0,37	0,19	0,18	66	207	127	600	212	96
Podzólico Vermelho-Escuro ⁽¹⁾	Ap	4,93	2,67	0,92	0,40	0,26	0,15	42	121	231	606	184	76
	Bt ₂	0,93	2,63	1,18	0,48	0,33	0,15	23	94	196	687	232	92

⁽¹⁾ MO = teor de matéria orgânica; Dp = Densidade de partículas; Ds = Densidade do solo; θ_{CC} = conteúdo de água a -0,01 MPa de potencial de água no solo; θ_{PMP} = conteúdo de água a -1,5 MPa de potencial de água no solo; $\theta_{AD} = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$; AG = areia grossa; AF = areia fina; S = silte; A = argila; Al₂O₃ = teor de óxidos de alumínio; Fe₂O₃ = teor de óxidos de ferro.

solos. O procedimento STEPWISE (SAS, 1991) selecionou as variáveis que entraram nas equações de regressão com 5 % de significância. A variável independente "horizonte" foi introduzida no modelo como variável qualitativa e codificada com o valor 0 (zero), para o horizonte (A), e o valor 1 (um), para o horizonte B. De acordo com Neter et al. (1989), este procedimento permite fazer uma estimativa mais precisa dos coeficientes, visto que a totalidade dos

dados é analisada em conjunto e, dessa forma, maior número de graus de liberdade é associado com o quadrado médio do erro do modelo. No caso da densidade do solo, por exemplo, os dados foram ajustados ao seguinte modelo:

$$Ds = a + b(Al_2O_3) \quad (1)$$

Na equação 1, *a* foi calculado como demonstrado na equação 2:

$$a = (a_0 + a_1 \cdot \text{horizonte}) \quad (2)$$

Desta forma, nos casos em que houve influência significativa do horizonte na propriedade analisada, foram geradas duas equações: uma em que $a = a_0$ e outra em que $a = a_0 + a_1$. No caso em que não houve influência da variável "horizonte", somente foi gerada uma equação. O mesmo procedimento foi utilizado para as outras propriedades físicas analisadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estatística descritiva das variáveis consideradas nos modelos é apresentada no quadro 3.

A maior parte dos atributos dos solos apresenta grande amplitude de variação, fundamental para o

estabelecimento de relações. Esta variação pode ser explicada pela gênese diferenciada dos perfis estudados, decorrente de materiais de origem distintos, além de climas e relevos específicos (Quadro 1).

No intuito de demonstrar as relações univariadas existentes entre as propriedades dos solos, foi determinada, primeiramente, a correlação entre elas (Quadro 4).

A densidade do solo foi negativamente correlacionada com Al_2O_3 , argila, Fe_2O_3 e matéria orgânica e positivamente correlacionada com areia grossa e fina. Relações similares entre Ds e matéria orgânica e Ds e textura do solo foram demonstradas nos trabalhos desenvolvidos por Alexander (1980), Adams (1983), Rawls (1983), Silva et al. (1997) e Bernoux et al. (1998). Em solos tropicais, teores elevados de óxidos de ferro e alumínio estão associados à formação de uma estrutura granular

Quadro 3. Número de observações (n), valores médios (X), desvios-padrão (s), coeficientes de variação (CV), valores mínimos (Mín.) e máximos (Máx.) dos atributos dos solos consideradas no estudo

Atributos do solo ⁽¹⁾	n	X	s	C.V. (%)	Mínimo	Máximo
Ds, g cm ⁻³	35	1,28	0,24	18,75	0,85	1,76
Dp, g cm ⁻³	35	2,64	0,09	3,41	2,50	2,82
θ_{CC} , cm ³ cm ⁻³	35	0,36	0,097	26,94	0,19	0,51
θ_{PMP} , cm ³ cm ⁻³	35	0,24	0,089	37,08	0,07	0,37
θ_{AD} , cm ³ cm ⁻³	35	0,12	0,047	39,17	0,02	0,23
Areia Grossa, %	35	15,78	13,46	85,30	1,20	53,70
Areia Fina, %	35	19,04	13,28	69,75	1,40	49,90
Silte, %	35	22,60	7,47	33,05	9,90	41,80
Argila, %	35	42,59	22,53	52,90	6,00	81,00
MO, %	35	2,29	1,53	66,81	0,50	6,78
Al_2O_3 , g kg ⁻¹	35	124,77	71,71	57,47	13,00	232,00
Fe_2O_3 , g kg ⁻¹	35	77,63	66,76	86,00	7,00	197,00

⁽¹⁾ Ds = Densidade do solo; Dp = Densidade de partículas; θ_{CC} = conteúdo de água a -0,01 MPa de potencial de água no solo; θ_{PMP} = conteúdo de água a -1,5 MPa de potencial de água no solo; $\theta_{AD} = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$; MO = teor de matéria orgânica; Al_2O_3 = teor de óxidos de alumínio; Fe_2O_3 = teor de óxidos de ferro.

Quadro 4. Coeficientes de correlação linear entre propriedades físicas e características de solos rotineiramente determinadas em levantamentos pedológicos

Propriedade física ⁽¹⁾	Característica do solo						
	Argila	Silte	AG	AF	MO	Al_2O_3	Fe_2O_3
Ds, g cm ⁻³	-0,71**	NS	0,62**	0,52**	-0,48**	-0,74**	-0,66**
Dp, g cm ⁻³	0,62**	-0,47**	-0,39*	-0,39*	NS	0,57**	0,71**
θ_{CC} , cm ³ cm ⁻³	0,81**	NS	-0,73**	-0,68**	0,39*	0,79**	0,74**
θ_{PMP} , cm ³ cm ⁻³	0,80**	NS	-0,67**	-0,69**	NS	0,74**	0,67**
θ_{AD} , cm ³ cm ⁻³	NS	NS	NS	NS	0,48**	NS	NS

⁽¹⁾ Ds = Densidade do solo; Dp = Densidade de partículas; θ_{CC} = conteúdo de água a -0,01 MPa de potencial de água no solo; θ_{PMP} = conteúdo de água a -1,5 MPa de potencial de água no solo; $\theta_{AD} = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$; AG = conteúdo de areia grossa; AF = conteúdo de areia fina; MO = teor de matéria orgânica; Al_2O_3 = teor de óxidos de alumínio; Fe_2O_3 = teor de óxidos de ferro; * = significativo a 5 %; ** = significativo a 1 %; NS = não-significativo.

típica, que determina, normalmente, menores valores de D_s (Schwertmann & Taylor, 1977; Ferreira et al., 1999a,b).

Os óxidos de ferro e alumínio são importantes para a agregação do solo. Funcionam como agentes de ligação entre as partículas minerais, condicionando o tipo de estrutura do solo (Pinheiro-Dick & Schwertmann, 1996; Igwe et al., 1999; Muggler et al., 1999). Apesar disso, segundo alguns autores, os óxidos de ferro nem sempre influenciam a agregação (Desphande et al., 1968; Muggler et al., 1997; Muggler et al., 1999) e, em alguns casos, o efeito dos sesquióxidos pode ser atribuído à interação entre a matéria orgânica e os óxidos e, ou, o teor de argila (Guérif, 1990; Bartoli et al., 1992). Chen et al. (1998) analisaram dados de solos de diversas partes do mundo (incluindo solos do Brasil) e concluíram que a textura, especificamente o teor de argila, foi o maior determinante das variações de D_s .

A densidade das partículas correlacionou-se positivamente com argila, Al_2O_3 e Fe_2O_3 e negativamente com silte e areia grossa e fina. A influência dos óxidos de ferro na D_p é esperada para solos subtropicais e tropicais, os quais contêm esses minerais dentro da fração argila e apresentam densidade específica elevada (Schwertmann & Taylor, 1977).

No caso da capacidade de campo e do ponto de murcha permanente, o coeficiente de correlação mais elevado foi obtido com a fração argila. No entanto, valores elevados também foram observados com Al_2O_3 , Fe_2O_3 , areia fina e areia grossa. Para os óxidos, a correlação foi positiva e, para a areia, negativa. Estreita dependência da umidade na θ_{CC} e θ_{PMP} em relação à textura também foi observada para solos do estado de São Paulo por Arruda et al. (1987). Silva & Kay (1997) verificaram que a água, em diferentes potenciais mátricos, estava diretamente relacionada com o teor de argila, D_s e teor de carbono orgânico

dos solos. Neste estudo, não foi constatada influência da matéria orgânica no θ_{PMP} e, para o θ_{CC} , a correlação foi significativa a 5 %.

A água disponível (θ_{AD}) apresentou coeficiente de correlação significativo (48 %) apenas com matéria orgânica. Este comportamento pode ser atribuído à elevada capacidade de retenção de água da matéria orgânica, conforme mencionado por Silva & Kay (1997).

Os resultados da análise de regressão múltipla entre as variáveis dependentes (D_s , D_p , θ_{CC} , θ_{PMP} e θ_{AD}) e as variáveis independentes (Horizonte, Silte, Argila, MO, Al_2O_3 e Fe_2O_3) encontram-se nos quadros 5 e 6. O quadro 5 mostra a contribuição parcial (R^2 parcial) de cada uma das variáveis independentes (características), e o quadro 6, as equações de regressão para cada propriedade do solo analisada.

Para a D_s , a equação gerada inclui Al_2O_3 e horizonte (Quadro 6). Os óxidos de alumínio, quando na forma de gibbsita e associados a outros óxidos, podem influenciar a agregação do solo, sendo um dos fatores condicionantes do tipo e tamanho de estrutura (Ferreira et al., 1999a). Os óxidos de alumínio geralmente estão associados à maior estabilidade da estrutura granular, com agregados mais individualizados, o que resulta numa menor D_s (Schwertmann & Taylor, 1977; Ferreira et al., 1999a,b). A menor D_s do horizonte A pode estar associada às modificações da estrutura impostas pelo sistema radicular da vegetação, além da influência da maior atividade biológica. Os modelos de Chen et al. (1998) e Silva et al. (1997) revelam apenas a influência da textura e matéria orgânica na D_s , embora esses autores não mencionem se avaliaram a influência dos óxidos nos solos testados.

O teor de óxidos de ferro foi a característica que mais influenciou a D_p . A equação indica que

Quadro 5. Coeficientes de determinação parciais e níveis de significância das variáveis independentes nas equações de regressão obtidas

Propriedade física estimada ⁽¹⁾	Variável independente						R^2 total
	Horizonte	Silte	Argila	MO	Al_2O_3	Fe_2O_3	
D_s , g cm ⁻³	0,14**	NS	NS	NS	0,55**	NS	0,69
D_p , g cm ⁻³	NS	0,09*	NS	NS	NS	0,50**	0,59
θ_{CC} , cm ³ cm ⁻³	NS	0,13**	0,66**	NS	NS	NS	0,79
θ_{PMP} , cm ³ cm ⁻³	0,08**	0,09**	0,64**	NS	NS	NS	0,81
θ_{AD} , cm ³ cm ⁻³	0,24**	NS	NS	NS	0,18**	NS	0,42

⁽¹⁾ D_s = Densidade do solo; D_p = Densidade de partículas; θ_{CC} = conteúdo de água a -0,01 MPa de potencial de água no solo; θ_{PMP} = conteúdo de água a -1,5 MPa de potencial de água no solo; $\theta_{AD} = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$; MO = teor de matéria orgânica; Al_2O_3 = teor de óxidos de alumínio; Fe_2O_3 = teor de óxidos de ferro; * = significativo a 5 %; ** = significativo a 1 %; NS = variáveis que não foram significativas nos modelos.

Quadro 6. Equações de regressão obtidas para as propriedades físicas do solo analisadas e coeficiente de determinação do modelo gerado

Propriedade física estimada ⁽¹⁾	Horizonte	Equações de regressão	R ² total	P > F
Ds, g cm ⁻³	A	Ds = 1,56 - 0,003 Al ₂ O ₃	0,69	< 0,0001
	B	Ds = 1,75 - 0,003 Al ₂ O ₃	0,69	< 0,0001
Dp, g cm ⁻³	A e B	Dp = 2,66 - 0,004 Silte + 0,00085 Fe ₂ O ₃	0,59	< 0,0001
θ _{PMP} , cm ³ cm ⁻³	A	θ _{PMP} = -0,031 + 0,005 Silte + 0,003 Argila	0,81	< 0,0001
	B	θ _{PMP} = 0,024 + 0,005 Silte + 0,003 Argila	0,81	< 0,0001
θ _{CC} , cm ³ cm ⁻³	A e B	θ _{CC} = 0,081 + 0,005 Silte + 0,004 Argila	0,79	< 0,0001
θ _{AD} , cm ³ cm ⁻³	A	θ _{AD} = 0,115 + 0,0003 Al ₂ O ₃	0,42	0,0030
	B	θ _{AD} = 0,055 + 0,0003 Al ₂ O ₃	0,42	0,0030

⁽¹⁾ Ds = Densidade do solo; Dp = Densidade de partículas; θ_{CC} = conteúdo de água a -0,01 MPa de potencial de água no solo; θ_{PMP} = conteúdo de água a -1,5 MPa de potencial de água no solo; θ_{AD} = conteúdo de água disponível; MO = teor de matéria orgânica; Al₂O₃ = teor de óxidos de alumínio; Fe₂O₃ = teor de óxidos de ferro.

aumentos no teor de silte resultaram em diminuição dos valores da Dp (Quadro 6), embora tenha sido baixa a correlação entre esses dois atributos (Quadro 5). A maior contribuição parcial foi dada pelo Fe₂O₃. A relação direta entre óxidos de ferro e Dp depende das maiores densidades específicas apresentadas por esses minerais e pela elevada proporção em que se encontram na maior parte dos solos estudados (Schwertmann & Taylor, 1977).

As equações obtidas para as variáveis θ_{PMP} e θ_{CC} apresentaram elevados coeficientes de determinação, sendo 64 % da variação da θ_{PMP} e 66 % da variação da θ_{CC} explicadas pela variação do teor de argila. A contribuição da fração silte foi pequena (Quadro 5). A variável qualitativa “horizonte” foi significativa apenas para o modelo da θ_{PMP}. A diferença de θ_{PMP} entre os horizontes A e B pode estar relacionada com a influência de íons e sais na retenção de água do solo (por exemplo, Na⁺ nos Planossolos Hidromórficos).

De maneira geral, esses resultados concordam com os obtidos por Piedgeon (1972), para solos de Uganda; Silva & Kay (1997), para solos do Canadá, e Van den Berg et al. (1997), para Ferralsols/Oxisols e solos relacionados da América do Sul, África e sudeste da Ásia. Arruda et al. (1987). Van den Berg et al. (1997) geraram equações para retenção de água para solos das regiões Sul e Sudeste do Brasil, mas utilizaram como variável independente a soma argila + silte. No presente estudo, a contribuição parcial das variáveis silte e argila foi altamente significativa, optando-se por incluí-las separadamente no modelo.

O coeficiente de determinação total para a equação obtida para θ_{AD} foi baixo, embora tenha sido altamente significativo (Quadro 6). Valores baixos de coeficientes de determinação para θ_{AD} já tinham

tinham sido relatados por Van den Berg et al. (1997), para solos tropicais. A ausência de relação de θ_{AD} com algumas das frações granulométricas tem sido atribuída ao fato de que os parâmetros θ_{CC} e θ_{PMP}, a partir dos quais é calculada a θ_{AD}, são obtidos em laboratório e, muitas vezes, com amostras deformadas, ocasionando alteração da estrutura, fator este determinante da quantidade de água retida pelo solo e disponível para as plantas. Com a perda da estrutura natural do perfil dificilmente são simuladas as condições de movimentação de água que ocorrem no campo (Arruda et al., 1987). A água disponível (θ_{AD}) foi positivamente influenciada pelos óxidos de alumínio e pela variável qualitativa “horizonte”. A diferença de θ_{AD} entre os horizontes pode estar relacionada com variações no tipo e tamanho de estrutura dos solos que acarretam diferente distribuição e tamanho de poros (Barral et al., 1998).

De maneira geral, observou-se que os coeficientes de determinação dos modelos obtidos foram altamente significativos (Quadro 6), apesar de requererem um número pequeno de variáveis. Isso demonstra que, a princípio, o comportamento das propriedades físicas estudadas está relacionado com poucas características dos solos, rotineiramente determinadas em levantamentos pedológicos.

CONCLUSÕES

1. A densidade do solo foi influenciada pelos óxidos de alumínio e tipo de horizonte considerado; a densidade de partículas, por silte e óxidos de ferro.
2. A umidade na capacidade de campo foi influenciada por silte e argila; o ponto de murcha

permanente, por silte, argila e tipo de horizonte, e o teor de água disponível, por óxidos de alumínio.

3. Tais resultados podem auxiliar o desenvolvimento de funções de pedotransferência para estimar propriedades físicas dos solos da região Sul do Brasil.

LITERATURA CITADA

- ADAMS, W.A. The effect of organic matter on the bulk and true densities of some uncultivated podzolic soils. *J. Soil Sci.*, 24:10-17, 1983.
- ALEXANDER, E.B. Bulk densities of California soils in relation to other soil properties. *Soil Sci. Soc. A. J.*, 44:689-692, 1980.
- ARRUDA, F.B.; JÚLIO Jr., J. & OLIVEIRA, J.B. Parâmetros de solo para cálculo de água disponível com base na textura do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 11:11-15, 1987.
- BARRAL, M.T.; ARIAS, M. & GUÉRIF, J. Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates. *Soil Till. Res.*, 46:261-272, 1998.
- BARTOLI, F.; BURTIN, G. & GUÉRIF, J. Influence of organic matter on aggregation in Oxisols rich in gibbsite or in goethite. II. Clay dispersion, aggregate strength and water stability. *Geoderma*, 54:259-274, 1992.
- BERNOUX, M.; ARROUAYS, D.; CERRI, C. VOLKOFF, B. & JOLIVET, C. Bulk densities of Brazilian Amazon soil related to other soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62:743-749, 1998.
- BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. v.1, p.363-375.
- BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Adv. Soil Sci.*, 9:177-213, 1989.
- CHEN, Y.; TESSIER, S. & ROUFFIGNAT, J. Soil bulk density estimation for tillage systems and soil textures. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 41:1601-1610, 1998.
- DESPHANDE, T.L.; GREENLAND, D.J. & QUIRK, J.P. Charges in soil properties associated with the removal of iron and aluminum oxides. *J. Soil Sci.*, 19:108-122, 1968.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de solos. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, 1999. 257p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, 1979. Não paginado.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Critérios para distinção de classes de solos e de fases de unidades de mapeamento: normas em uso pelo SNLC. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, 1988. 67p. (Documentos SNLCS, 11)
- FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B. & CURTI, N. Influência da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:515-524, 1999b.
- FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B. & CURTI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:507-514, 1999a.
- GUÉRIF, J. Factors influencing compaction-induced increases in soil strength. *Soil Till. Res.*, 16:167-178, 1990.
- IGWE, C.A.; AKAMIGBO, F.O.R. & MBAGWU, J.S.C. Chemical and mineralogical properties of soils in southeastern Nigeria in relation to aggregate stability. *Geoderma*, 92:111-123, 1999.
- INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS - IAC. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas. Campinas, 1986. 94p. (Boletim Técnico, 106)
- KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. 2 ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. v.1, p.635-660.
- MUGGLER, C.C.; PAPE, TH. & BUURMAN, P. Laser grain-size determination in soil genetic studies 2. Clay content, clay formation, and aggregation in some Brazilian Oxisols. *Soil Sci.*, 162:219-228, 1997.
- MUGGLER, C.C.; VAN GRIETHUYSEN, C.; BUURMAN, P. & PAPE, T. Aggregation, organic matter, and iron oxide morphology in Oxisols from Minas Gerais, Brazil. *Soil Sci.*, 164:759-770, 1999.
- NETER, J.; WASSERMAN, W. & KUTNER, M. H. *Applied linear regression models*, 2 ed. Boston, 1989. 667p.
- PACHEPSKI, Ya.A. & RAWLS, W.J. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63:1748-1757, 1999.
- PIDGEON, J.D. The measurement and prediction of available water capacity of Ferrallitic soils in Uganda. *J. Soil Sci.*, 23:431-441, 1972.
- PINHEIRO-DICK, D. & SCHWERTMANN, U. Microaggregates from Oxisols and Inceptisols: dispersion through selective dissolutions and physicochemical treatments. *Geoderma*, 74:49-63, 1996.
- REUNIÃO DE CORRELAÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E APLICAÇÃO DE LEVANTAMENTOS DE SOLOS, 6. 2000, Colombo. Guia de excursão de estudos de solos nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Colombo: Embrapa Floresta/Rio de Janeiro: Embrapa Solos/Campinas, IAC, 2000. 222p. (Embrapa Florestas, Documentos, 222p)
- RAWLS, W.J. Estimation soil bulk density from particle size analysis and organic matter content. *Soil Sci.*, 135:123-125, 1983 (Note).
- SAS INSTITUTE. *Statistical Analysis System Institute - SAS/STAT Procedure guide for personal computers*. Version 5, SAS Inst. Cary, NC. 1991.
- SCHWERTMANN, U. & TAYLOR, R.M. Iron Oxides. In: DIXON, J.B., ed. *Minerals in soil environments*. Madison, Soil Science Society of America, 1977. 948p.
- SILVA, A.P. & KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:877-883, 1997.

- SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Management versus inherent properties effects on bulk density and relative compaction. *Soil Till. Res.*, 44:81-93, 1997.
- TIETJE, O. & TAPKENHINRICHS, M. Evaluation of pedo-transfer functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:1088-1095, 1992.
- TOMASELLA, J.; HODNETT, M.G. & ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in brazilian soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64:327-338, 2000.
- Van den BERG, M.; KLAMT, E.; van REEUWIJK, L.P. & SOMBROEK, W.G. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. *Geoderma*, 78:161-180, 1997.
- Van GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-898, 1980.
- VETTORI, L. Métodos de análises de solos. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, 1969. 24p. (Boletim Técnico, 7)
- WAGENET, R.J.; BOUMA, J. & GROSSMAN, R.B. Minimum data sets for use of soil survey information in soil interpretive models. In: MAUSBACH, M.J. & WILDING, L.P., eds. Spatial variabilities of soils and landforms. Madison, Soil Science Society of America, 1991. (Special Publication, 28)

