

SEÇÃO I - FÍSICA DO SOLO

RELAÇÃO ENTRE ATRIBUTOS FÍSICOS, MINERALOGIA DA FRAÇÃO ARGILA E FORMAS DE ALUMÍNIO NO SOLO⁽¹⁾

A. PEDROTTI⁽²⁾, M. M. FERREIRA⁽³⁾, N. CURI⁽³⁾, M. L. N. SILVA⁽³⁾,
J. M. LIMA⁽³⁾ & R. CARVALHO⁽⁴⁾

RESUMO

O alumínio (Al) é um dos elementos mais abundantes em massa nos solos brasileiros, estando presente em diferentes minerais e formas. Considerando a carência de informações sobre a sua participação no comportamento físico do solo, buscou-se, no presente estudo, avaliar a relação entre a mineralogia da fração argila, formas de Al e atributos físicos de diferentes solos. Para tanto, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas dos horizontes A e B de solos representativos das Zonas Fisiográficas Sul e Campos das Vertentes do estado de Minas Gerais. As amostras foram submetidas às caracterizações física, química e mineralógica. Estudos de correlação mostraram que os atributos físicos dos solos estudados estavam associados às diferentes formas de Al presentes e à mineralogia da fração argila: as formas de Al amorfas e menos cristalinas associaram-se mais aos atributos físicos relacionados com a agregação das partículas do solo, podendo esta associação ser atribuída à afinidade deste elemento com a matéria orgânica, enquanto os componentes cristalinos associaram-se mais aos atributos físicos relacionados com a organização estrutural dos solos.

Termos para indexação: caulinita, gibbsita, matéria orgânica, agregação, estrutura do solo.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Universidade Federal de Lavras – UFLA. Recebido para publicação em outubro de 2000 e aprovado em outubro de 2002.

⁽²⁾ Professor do Departamento de Engenharia Agrônômica da Universidade Federal de Sergipe – UFS. CEP 49100-000 São Cristóvão (SE). E-mail: alceupedrotti@uol.com.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras – UFLA. Caixa Postal 37, CEP 37200-000 Lavras (MG). E-mail: mozartmf@ufla.br

⁽⁴⁾ Professor do Departamento de Química, UFLA. E-mail: ruycarv@ufla.br

SUMMARY: *RELATIONSHIP BETWEEN PHYSICAL ATTRIBUTES, CLAY FRACTION MINERALOGY AND ALUMINUM FORMS IN SOIL*

Aluminum (Al) is one of the most abundant elements in weight in Brazilian soils, found in different minerals and forms. Considering the lack of information about its participation in the physical behavior of soil, the present study aimed to evaluate the relationship between the mineralogy of the clay fraction, different forms of Al and physical attributes of different soils. Disturbed and undisturbed samples of A and B horizons of representative soils from the South and Campos das Vertentes physiographic regions in the State of Minas Gerais were therefore collected. The samples were subjected to physical, chemical and mineralogical characterizations. Correlation studies performed with the resulting data from the different characterizations showed that the physical attributes of the different studied soils are associated to the different forms of Al and to the mineralogy of the clay fraction: the amorphous and less crystalline forms of Al were more associated to physical attributes related with particle aggregation, such association being ascribed to the affinity of this element with organic matter, while the crystalline components were more associated to physical attributes related with the structural organization of the soils.

Index terms: kaolinite, gibbsite, organic matter, aggregation, soil structure.

INTRODUÇÃO

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante em massa na crosta terrestre, antecedido pelo oxigênio e silício. É um importante componente dos solos e materiais geológicos, incluindo-se minerais de argila, tais como: caulinita, gibbsita e outros óxidos (termo inclusivo para óxidos, oxidróxidos e hidróxidos), inclusive de Fe. Pode-se apresentar ainda como íon trocável, adsorvido ou precipitado, como componente de compostos hidroxilados complexos e associações organominerais (Shuman, 1990; Soon, 1993; McBride, 1994).

Os diferentes minerais e formas de Al presentes no solo participam na retenção de ânions e cátions, provocam a fitotoxidez em solos ácidos, reduzem a CTC do solo, além de influenciar alguns atributos físicos do solo (Rich, 1968; Wada & Harward, 1974; Hsu, 1989; Goldberg, 1989).

Jones & Uehara (1973), utilizando técnicas de microscopia eletrônica, observaram a presença de gel amorfo de Al (hidróxido de Al não-cristalino) unindo partículas de argila. Reichert & Norton (1994) e Itami & Kyuma (1995) verificaram a atuação dos óxidos de Al como agentes ligantes de partículas coloidais. Tisdall & Oades (1982), ao proporem um modelo de agregação do solo, relataram que os aluminossilicatos menos cristalinos participavam, juntamente com óxidos e substâncias húmicas, como agentes inorgânicos adsorvidos à superfície das argilas e com propriedades ligantes, principalmente no tocante a agregados menores que 2 mm. Para Lima & Anderson (1997), este modelo pode não ser apropriado para o horizonte B de Latossolos, pois os principais fenômenos responsáveis por essa agregação são a floculação e as cargas eletrostáticas.

Segundo esses autores, a maior influência na gênese de agregados menores deve ser atribuída à composição mineralógica do solo, enquanto, para os agregados maiores, a matéria orgânica atua como principal agente de formação desses agregados.

Mendonça & Rowel (1994) avaliaram o efeito do cultivo do solo sobre a dinâmica dos compostos orgânicos e suas interações com o Al, por meio das relações entre diferentes frações de Al e matéria orgânica. Os resultados encontrados evidenciaram não só uma forte atuação da matéria orgânica na complexação e, ou, disponibilização de formas de Al na solução do solo, mas também a passagem de Al fortemente complexado para formas mais reativas, em decorrência de sua oxidação.

Os solos tropicais revelam, de modo geral, a predominância na composição mineralógica da fração argila de argilominerais do tipo 1:1 e de óxidos de ferro e de alumínio, o que resulta numa tendência de maior agregação do que solos com elevados teores de argilominerais 2:1 e pobres em óxidos de ferro e de alumínio (Troeh et al., 1980). Os óxidos de ferro (hematita e goethita) e de alumínio (gibbsita) são importantes na agregação do solo, uma vez que, sendo considerados agentes desorganizadores em nível microscópico, com um aumento dos seus teores, as partículas tendem a um arranjo mais casualizado e a estrutura tende a granular (Resende, 1985). Ferreira et al. (1999a,b) encontraram resultados que confirmam a importância dos óxidos de alumínio na agregação de Latossolos.

Considerando a carência de informações mais específicas à participação do Al no comportamento físico do solo, buscou-se, no presente estudo, avaliar a relação entre a mineralogia da fração argila, várias formas de Al e atributos físicos de diferentes solos

representativos das Zonas Fisiográficas Sul e Campos das Vertentes do estado de Minas Gerais.

MATERIAL E MÉTODOS

Na seleção das amostras utilizadas no presente estudo, buscou-se identificar solos que exibissem, nas suas condições naturais, uma ampla variação em seus atributos físicos. Foram selecionados 10 perfis de solos representativos das Zonas Fisiográficas Sul e Campos das Vertentes do estado de Minas Gerais. Para as caracterizações, física, química e mineralógica, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas (cilindros) dos horizontes A e B dos solos (Quadro 1 e Figura 1).

Na caracterização física dos solos, foram determinados: (a) granulometria e argila dispersa em água (ADA), pelo método da pipeta (Day, 1965); (b) densidade de partículas (D_p), pelo método do picnômetro (Blake & Hartge, 1986a); (c) densidade do solo (D_s), pelo método do anel volumétrico (Blake & Hartge, 1986b); (d) índice de floculação (IF), calculado pela expressão:

$$IF (\%) = \frac{\text{Argila total} - \text{Argila dispersa em água}}{\text{Argila total}} \cdot 100$$

(e) porosidade total (VTP) (Danielson & Sutherland, 1986); (f) macroporosidade (Macro) e microporosidade (Micro) (Oliveira, 1968); (g) estabilidade de agregados em água (Kemper & Rosenau, 1986), tendo-se adotado, como índice de agregação, o diâmetro médio geométrico (DMG), de acordo com

Quadro 1. Classificação e localização dos solos utilizados no presente estudo

Solo	Simbologia	Classificação ⁽¹⁾	Zona fisiográfica
01	CXbd	Cambissolo Háptico Tb distrófico	Campos das Vertentes (MG)
02	PVAd	Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico	Sul de Minas
03	PVAd	Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico	Sul de Minas
04	PVd	Argissolo Vermelho distrófico	Sul de Minas
05	NVdf	Nitossolo Vermelho distroférico	Sul de Minas
06	LVAd	Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico	Sul de Minas
07	LVw	Latossolo Vermelho ácrico	Campos das Vertentes (MG)
08	LVd	Latossolo Vermelho distrófico	Sul de Minas
09	LVwf	Latossolo Vermelho acriférico	Sul de Minas
10	LVAw	Latossolo Vermelho-Amarelo ácrico	Campos das Vertentes (MG)

⁽¹⁾ Conforme EMBRAPA (1999).



Figura 1. Zonas fisiográficas Sul e Campos das Vertentes do estado de Minas Gerais.

Mazurak (1950), e (h) condutividade hidráulica do solo saturado (Ks) por meio de permeâmetro de carga constante, conforme Fernandes et al. (1983).

Na caracterização química dos solos, as seguintes análises foram realizadas: (a) carbono orgânico, conforme Defelipo & Ribeiro (1981); (b) óxidos de Al livres totais (Al_d) (quatro extrações sucessivas), extraídos da fração argila, por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB) (Mehra & Jackson, 1960), sendo o Al no sobrenadante lido por espectrofotometria de absorção atômica - EAA; (c) óxidos de Al menos cristalinos (Al_o), extraídos em uma única extração pelo Reagente de Tamm (ácido oxálico - $C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O$ e oxalato de amônio - $(NH_4)_2C_2O_4 \cdot H_2O$ - pH 2,8) (Schwertmann, 1973) e leitura do Al no sobrenadante por EAA; (d) Al solúvel em água (Al_s), Al trocável (Al_t) e outras formas de Al, procedendo-se da maneira explicitada a seguir.

O Al solúvel em água (Al_s) foi obtido por meio de lixiviação de 60 g de solo com 300 mL de água destilada-deionizada, durante uma hora, e leitura do Al no lixiviado em EAA. Após a obtenção do Al_s , a amostra lixiviada foi subdividida, extraíndo-se, de maneira isolada, as outras formas de Al com: (a) cloreto de potássio (Al trocável, Al_t) - KCl 1 mol L^{-1} (pH 5,7); (b) cloreto de lantânio - $LaCl_3 \cdot 7H_2O$ 0,33 mol L^{-1} (pH 4,7); (c) oxalato de amônio - $(NH_4)_2C_2O_4 \cdot H_2O$ 0,2 mol L^{-1} (pH 4,8) e (d) cloreto de cobre (II) - $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ 0,5 mol L^{-1} (pH 2,8).

Para atender às etapas “a” a “d”, agitaram-se 5 g de amostra com 50 mL de cada solução extratora, por uma hora, filtrando-se em papel quantitativo 42, conforme Mendonça (1995); e (e) pirofosfato de sódio - $Na_4P_2O_7 \cdot 10 H_2O$ (pH 10,3) 0,025 mol L^{-1} , agitando-se 1 g de amostra de solo com 50 mL da solução extratora por uma hora, centrifugando-se a 3.600 rpm por 20 min e filtrando-se em papel quantitativo 42 (van Reeuwijk, 1987; Parfitt, 1989). Os teores de Al foram determinados nos diferentes sobrenadantes por EAA.

Com os resultados destas extrações, obtiveram-se as seguintes formas de Al, conforme Mendonça & Rowel (1994) e Mendonça (1995): (a) Al reativo fracamente associado à matéria orgânica (Al_{mo}): diferença entre o teor de Al extraído com $LaCl_3$ e KCl; (b) Al das formas reativas fortemente associadas às frações orgânicas e minerais (Al_r): diferença entre o teor de Al extraído com $CuCl_2$ e $LaCl_3$; (c) Al não-reativo fortemente complexado à matéria orgânica (Al_c): diferença entre o teor de Al extraído com $Na_4P_2O_7$ e $LaCl_3$; e (d) Al amorfo inorgânico (Al_a): diferença entre o teor de Al extraído com oxalato de amônio e pirofosfato de sódio.

Na semiquantificação da caulinita e gibbsita da fração argila desferrificada, utilizou-se o método da análise térmica diferencial - ATD.

Os dados resultantes das caracterizações, física, química e mineralógica, foram submetidos à análise

de correlação simples pelo programa do Sistema SAS - *Statistical Analysis System* - versão 6.10 (SAS, 1995).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das caracterizações (física, química e mineralógica) dos horizontes A e B dos diferentes solos estudados são apresentados nos quadros 2 a 5. Nota-se que os solos possuem atributos físicos bastante contrastantes, sendo importante destacar as variações na composição granulométrica e, principalmente, nos valores de DMG, Ds, Macro e Ks (Quadro 2). Estes atributos estão associados à estrutura dos solos e determinam comportamentos bastante distintos entre eles.

Quando se comparam, em um mesmo solo, os horizontes A e B, verifica-se que, de modo geral, o horizonte A destaca-se pelos maiores valores de DMG e ADA. Já o horizonte B destaca-se pelos maiores valores de Dp e IF. Esses resultados estão associados, basicamente, às diferenças nos teores de matéria orgânica desses horizontes (Resende et al., 1999).

Quando se observam os valores de Ks, verifica-se que, no solo com horizonte Bi (solo 01) e nos solos com horizonte Bt (solos 02 a 04), esses valores são menores no horizonte B em relação ao A. Já nos solos com horizonte Bw (solos 06 a 10), com exceção do LVAw, os valores de Ks do horizonte B são maiores do que os do horizonte A. Esse comportamento da condutividade hidráulica pode ser atribuído aos tipos de estruturas presentes nos respectivos horizontes desses grupamentos de solos, conforme demonstrado por Sales et al. (1999).

Os teores dos óxidos extraídos pelo ataque sulfúrico e de matéria orgânica (MO) são apresentados no quadro 3. Observam-se variações acentuadas, envolvendo os diferentes óxidos e horizontes analisados. Estas variações nos teores dos óxidos nos horizontes dos diferentes solos refletem-se nas relações moleculares Ki e Kr. Verifica-se, ainda, que predominam teores mais elevados de Al_2O_3 em relação aos teores de SiO_2 , na maioria dos horizontes dos solos analisados, com exceção dos horizontes A e B dos solos PVd (solo 04) e PVAd (solo 03) e horizonte A do PVAd (solo 02).

O quadro 4 apresenta os resultados dos teores de óxidos de alumínio extraídos por DCB (Al_d) e oxalato de amônio ácido (Al_o), gibbsita (Gb), caulinita (Ct) e as diversas relações envolvendo estes componentes. Com exceção do PVd (solo 04), os valores de Al_d são mais elevados do que os de Al_o , refletindo-se em baixos valores da relação Al_o/Al_d . Estes resultados indicam que o Al ocorre predominantemente na forma cristalina (Gualberto et al., 1987). Observam-se variações acentuadas na composição mineralógica dos solos estudados,

Quadro 2. Caracterização física dos horizontes A e B dos diferentes solos estudados

Solo	Horizonte	Areia	Silte	Argila	ADA	IF	DMG	Dp	Ds	VTP	Micro	Macro	Ks	
		g kg ⁻¹				%	mm	—Mg m ⁻³ —		m ³ m ⁻³			mm h ⁻¹	
01	CXbd	A Bi	115 80	190 268	696 652	27 1	61 99	3,54 3,36	2,71 2,77	1,08 1,21	0,60 0,60	0,46 0,48	0,14 0,12	45,5 25,8
02	PVAd	A Bt	548 354	145 125	307 521	14 10	86 88	2,66 0,63	2,63 2,64	1,35 1,46	0,45 0,45	0,30 0,37	0,15 0,08	33,8 0,7
03	PVAd	A Bt	390 128	158 378	452 495	28 19	74 95	2,87 0,47	2,62 2,68	1,28 1,36	0,48 0,52	0,38 0,43	0,10 0,09	18,1 8,0
04	PVd	A Bt	204 172	590 466	206 362	9 5	54 81	4,75 0,25	2,78 2,83	1,21 1,37	0,56 0,52	0,43 0,45	0,13 0,06	62,5 4,5
05	NVdf	A B	425 231	202 118	372 651	15 1	60 99	4,38 1,00	2,69 2,74	1,14 1,30	0,52 0,58	0,31 0,39	0,20 0,20	205,5 79,3
06	LVAd	A Bw	523 400	116 118	360 482	10 1	56 98	2,76 0,49	2,55 2,64	1,37 1,28	0,46 0,51	0,30 0,36	0,16 0,15	103,0 344,3
07	LVw	A Bw	144 122	200 224	656 655	9 8	38 61	4,71 2,12	2,66 2,72	1,10 0,91	0,58 0,66	0,40 0,40	0,19 0,26	107,4 281,9
08	LVd	A Bw	108 108	229 144	663 748	10 7	85 91	3,89 1,45	2,63 2,65	1,10 0,87	0,58 0,67	0,36 0,34	0,22 0,33	86,0 147,2
09	LVwf	A Bw	172 138	291 206	536 656	16 1	70 99	4,20 0,80	2,71 2,85	1,20 0,96	0,56 0,66	0,37 0,33	0,18 0,33	80,1 606,2
10	LVAw	A Bw	177 113	239 310	584 577	1 3	71 99	4,77 3,65	2,69 2,76	1,12 0,99	0,58 0,64	0,40 0,42	0,18 0,22	97,7 91,3

Quadro 3. Óxidos do ataque sulfúrico e matéria orgânica (MO) dos horizontes A e B dos diferentes solos estudados

Solo	Horizonte	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Ki	Kr	Al ₂ O ₃ /Fe ₂ O ₃	MO	
g kg ⁻¹										dag kg ⁻¹	
01	CXbd	A	272,1	283,6	152,8	35,2	0,7	1,63	1,21	1,86	3,7
		Bi	268,2	301,9	158,9	36,5	0,5	1,51	1,13	1,90	2,2
02	PVAd	A	135,2	130,0	50,0	19,0	0,4	1,77	1,42	1,93	3,0
		Bt	224,5	228,9	73,3	17,7	0,4	1,67	1,38	2,03	0,7
03	PVAd	A	223,5	218,0	61,8	11,6	0,4	1,74	1,48	2,00	3,0
		Bt	302,2	276,0	134,0	20,3	0,3	1,86	1,42	1,88	0,7
04	PVd	A	198,4	192,4	249,4	83,2	2,6	1,75	0,96	2,60	4,0
		Bt	220,8	204,8	284,2	67,4	1,6	1,83	0,97	3,12	0,4
05	NVdf	A	142,6	166,2	87,9	24,0	0,7	1,46	1,09	1,89	4,1
		B	182,8	268,1	129,3	26,7	0,7	1,16	0,89	2,07	0,7
06	LVAd	A	131,6	183,0	56,4	18,1	0,4	1,22	1,02	0,77	2,3
		Bw	162,7	246,3	67,6	16,1	0,4	1,12	0,96	0,72	0,7
07	LVw	A	140,4	308,2	159,4	45,4	1,1	0,77	0,58	3,53	4,3
		Bw	143,0	345,1	169,7	41,3	0,6	0,70	0,54	2,06	1,4
08	LVd	A	160,7	356,0	126,7	24,9	0,5	0,77	0,62	2,81	1,7
		Bw	163,5	357,7	124,6	25,8	0,5	1,78	0,64	2,87	1,3
09	LVwf	A	167,3	251,2	230,9	40,3	0,8	1,13	0,71	1,09	3,1
		Bw	175,9	265,1	256,8	25,6	0,8	1,13	0,70	1,03	0,9
10	LVAw	A	167,6	297,6	149,0	45,4	0,6	0,96	0,72	3,24	3,8
		Bw	146,9	314,0	166,9	39,7	0,6	0,80	0,59	3,64	1,6

principalmente com relação aos teores de Gb (Quadro 4). Os solos com maior grau de desenvolvimento (Latossolos) apresentam enriquecimento relativo de Gb em relação aos menos evoluídos. Esse aspecto reflete-se nos maiores valores da relação Gb/(Gb + Ct).

Verifica-se que o Al amorfo inorgânico (Al_a) apresenta-se nos solos com os maiores teores, seguido do Al não-reativo fortemente complexado à matéria orgânica (Al_c), Al das formas reativas fortemente associadas às frações (orgânica e mineral (Al_r)), Al reativo fracamente associado à matéria orgânica (Al_{mo}), Al trocável (Al_t) e, por último, do Al solúvel em água (Al_s) (Quadro 5). Verifica-se que os horizontes A e B apresentam, entre si, diferentes quantidades das formas de Al determinadas.

Generalizando, pode-se afirmar que os maiores teores das formas Al_{mo} , Al_a , Al_t e Al_c , são encontrados no horizonte A, provavelmente em virtude da complexação pela matéria orgânica, uma vez que estas formas estão a ela associadas. Já para o Al_r , os maiores teores localizam-se no horizonte B, provavelmente por esta forma de Al encontrar-se associada tanto à fração orgânica quanto à fração mineral dos solos. Mendonça (1995) afirma que com a mineralização da matéria orgânica do solo pode haver aumento dos teores de Al_{mo} e Al_r , provavelmente, em decorrência da passagem de parte do Al_c para

formas mais reativas, podendo acarretar aumento do Al na solução do solo.

Buscando avaliar a relação entre os atributos físicos, os conteúdos das diversas formas de Al e a mineralogia da fração argila presentes nos diferentes solos, foram feitos estudos de correlação envolvendo estes conjuntos de informações (Quadro 6).

Inicialmente, a estabilidade de agregados em água, representada pelo DMG, correlacionou-se positiva e significativamente com os conteúdos de matéria orgânica (MO) e com as seguintes formas de alumínio: Al_d , Al_o , Al_{mo} e Al_a . Esses resultados evidenciam que, quanto maior o conteúdo destas formas, maior a estabilidade dos agregados do solo. A associação entre matéria orgânica e estabilidade de agregados é bem conhecida e decorre da ação cimentante da matéria orgânica, responsável pela agregação das partículas do solo, conforme demonstrado nos trabalhos de Tisdall & Oades (1982), Emerson et al. (1986), Barberis et al. (1991) e Colombo & Torrent (1991).

As correlações positivas e significativas envolvendo DMG e Al_o e Al_{mo} podem ser creditadas indiretamente à matéria orgânica, considerando a grande capacidade que esta possui de complexar o Al (Soon, 1993; McBride, 1994). Deve-se ressaltar que estas formas de Al originam-se de compostos amorfos ou pouco cristalinos fracos ou fortemente

Quadro 4. Formas de alumínio e composição mineralógica da fração argila dos horizontes A e B dos diferentes solos estudados

Solo	Horizonte	Al _d	Al _o	Al _o /Al _d	Al _d /Al ₂ O ₃	Gb	Ct	Gb/(Gb + Ct)	
		——— g kg ⁻¹ ——				——— g kg ⁻¹ ——			
01	CXbd	A	5,052	1,647	0,326	0,026	92	199	0,32
		Bi	4,610	1,735	0,376	0,023	79	203	0,28
02	PVAd	A	1,304	0,716	0,549	0,033	23	96	0,19
		Bt	2,969	1,064	0,358	0,025	52	178	0,23
03	PVAd	A	1,906	1,445	0,758	0,019	48	187	0,21
		Bt	1,757	1,221	0,695	0,013	88	149	0,37
04	PVd	A	0,477	0,599	1,256	0,012	13	50	0,20
		Bt	0,678	0,782	1,153	0,009	44	162	0,21
05	NVdf	A	2,141	0,926	0,433	0,035	60	121	0,33
		B	3,736	1,536	0,411	0,021	185	182	0,50
06	LVAd	A	1,622	1,011	0,624	0,025	89	92	0,49
		Bw	1,898	1,025	0,540	0,016	168	140	0,55
07	LVw	A	7,038	1,650	0,234	0,035	260	374	0,41
		Bw	7,725	1,706	0,221	0,034	315	361	0,47
08	LVd	A	3,193	2,345	0,734	0,014	307	323	0,49
		Bw	5,435	1,929	0,355	0,020	358	196	0,65
09	LVwf	A	3,148	1,329	0,422	0,023	176	136	0,56
		Bw	3,665	1,500	0,409	0,021	226	204	0,53
10	LVAw	A	5,954	1,477	0,248	0,034	205	164	0,56
		Bw	6,930	1,226	0,177	0,038	237	135	0,64

Quadro 5. Formas de Al presentes nos horizontes A e B dos diferentes solos estudados

Solo	Horizonte	Al _{mo}	Al _r	Al _c	Al _a	Al _t	Al _s
g kg ⁻¹							
01	CXbd	A	0,257	0,166	0,184	0,332	0,013
		Bi	0,115	0,242	0,217	0,186	0,016
02	PVAd	A	0,103	0,057	0,128	0,135	0,019
		Bt	0,015	0,126	0,192	0,113	0,019
03	PVAd	A	0,055	0,047	0,123	0,364	0,008
		Bt	0,010	0,040	0,124	0,113	0,004
04	PVd	A	0,173	0,076	0,066	0,321	0,003
		Bt	0,020	0,164	0,050	0,147	0,004
05	NVdf	A	0,044	0,140	0,185	0,231	0,024
		B	0,022	0,148	0,167	0,126	0,025
06	LVAd	A	0,140	0,055	0,215	0,489	0,005
		Bw	0,021	0,075	0,092	0,146	0,005
07	LVw	A	0,216	0,177	0,433	0,406	0,015
		Bw	0,006	0,229	0,267	0,098	0,018
08	LVd	A	0,011	0,123	0,294	0,145	0,003
		Bw	0,006	0,158	0,299	0,126	0,005
09	LVwf	A	0,006	0,052	0,122	0,192	0,006
		Bw	0,003	0,123	0,111	0,233	0,003
10	LVAw	A	0,247	0,143	0,229	0,537	0,016
		Bw	0,013	0,225	0,149	0,339	0,018

associados à matéria orgânica. É interessante notar que as correlações envolvendo o DMG, caulinita (Ct) e gibbsita (Gb) não foram significativas (Quadro 6).

O índice de floculação (IF) correlacionou-se negativa e significativamente com MO, Al_a e Al_t, indicando que o aumento dos teores desses constituintes favorece a dispersão da fração argila dos solos. A participação da matéria orgânica no fenômeno de dispersão está relacionada com a presença de grupamentos carboxílicos, responsáveis, por sua vez, pelo surgimento de cargas negativas. No caso do Al, em que pese o seu elevado poder floculante, as correlações negativas e significativas encontradas com o IF podem ser atribuídas, mais uma vez, à sua complexação pela matéria orgânica.

A densidade do solo (Ds) correlacionou-se significativamente com os teores de Ct, Gb, Al₂O₃, Al_d, Al_o, Al_r e Al_c. Apenas a correlação entre Ds e Ct foi positiva, indicando que, quanto maior o teor de caulinita, maior o valor de Ds. Ferreira et al. (1999a), trabalhando com Latossolos, também verificaram que os valores de Ds variaram diretamente com os teores de caulinita e inversamente com os teores de gibbsita. De acordo com Ferreira et al. (1999b), esse comportamento da Ds é determinado pelo desenvolvimento estrutural daqueles solos. Segundo esses autores, os Latossolos cauliniticos, em razão do ajuste face a face das placas de caulinita,

desenvolvem um plasma denso, contínuo, que lhes confere valores mais altos de Ds. Assim sendo, aos maiores teores de caulinita corresponderão Latossolos com os maiores valores de Ds. O contrário tende a ocorrer com os Latossolos gibbsíticos.

Os resultados deste estudo mostram que o comportamento da Ds encontrado nos Latossolos pode ser estendido para outros grupamentos de solos. Semelhantemente aos dados obtidos por Ferreira et al. (1999a), a Ds correlacionou-se negativa e significativamente com o teor de Al₂O₃ do ataque sulfúrico.

Considerando que nos solos estudados esta forma de Al provém basicamente da decomposição da caulinita e da gibbsita (Vettori, 1969), estes resultados reforçam a importância do Al no comportamento de atributos físicos associados à estrutura destes solos. As correlações negativas e significativas envolvendo Ds e Al_o, Al_r e Al_c evidenciam a participação das formas amorfas ou menos cristalinas do solo, notadamente associadas à fração orgânica, na diminuição dos valores de Ds.

Considerando ser o volume total de poros (VTP) uma variável dependente e inversamente proporcional à Ds, verifica-se que o resultado das correlações envolvendo VTP e os componentes da caracterização química e mineralógica segue a mesma tendência de Ds, porém com sinal invertido.

Quadro 6. Coeficientes de correlação simples entre os atributos físicos e os componentes das caracterizações, química e mineralógica, dos horizontes A e B dos diferentes solos estudados

	MO	Ct	Gb	Al ₂ O ₃	Al _d	Al _o	Al _{mo}	Al _r	Al _c	Al _a	Al _t	Al _s
DMG	0,89**	0,23 ^{ns}	0,41 ^{ns}	0,43 ^{ns}	0,45*	0,49*	0,60**	0,11 ^{ns}	0,28 ^{ns}	0,61**	0,10 ^{ns}	0,10 ^{ns}
I.F.	-0,75**	-0,41 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	-0,33 ^{ns}	0,19 ^{ns}	-0,60**	-0,41 ^{ns}	-0,38 ^{ns}	-0,54*	-0,63**	-0,08 ^{ns}
Ds	-0,38 ^{ns}	0,60*	-0,76**	-0,67**	-0,72**	-0,57**	-0,26 ^{ns}	-0,54*	-0,48*	0,01 ^{ns}	0,08 ^{ns}	-0,17 ^{ns}
VTP	0,34 ^{ns}	-0,51*	0,75**	0,78**	0,73**	0,61**	0,38 ^{ns}	0,65**	0,38 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,13 ^{ns}
Micro	0,46*	-0,24 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,52*	0,46*	0,28 ^{ns}	0,60**	0,44*	0,01 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,42 ^{ns}	-0,22 ^{ns}
Macro	-0,17 ^{ns}	-0,42 ^{ns}	0,80**	0,44*	0,52*	0,43 ^{ns}	-0,28 ^{ns}	0,43 ^{ns}	0,57**	0,23 ^{ns}	-0,41 ^{ns}	-0,28 ^{ns}
Ks	0,28 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,42 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	0,14 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-0,13 ^{ns}	0,42 ^{ns}	0,34 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,45 ^{ns}

*, ** e ^{ns} = Significativos a 5 e 1 %, pelo Teste t e não-significativo, respectivamente.

Quanto à distribuição de poros por tamanho (Quadro 6), a microporosidade (Micro) correlacionou-se positiva e significativamente com MO, Al₂O₃, Al_d, Al_{mo} e Al_r, enquanto a macroporosidade (Macro) correlacionou-se positiva e significativamente com Gb, Al₂O₃, Al_d e Al_c, sendo os coeficientes das correlações todos positivos. Embora não significativa, observa-se que a Macro correlacionou-se negativamente com a Ct. Sabe-se que a macroporosidade é um atributo dependente da estruturação do solo e que, de acordo com Ferreira et al. (1999a), caulinita e gibbsita são os constituintes mineralógicos que maior influência exercem sobre as propriedades associadas à estrutura dos Latossolos. Confirmando o trabalho daqueles autores, os resultados obtidos com as correlações mostram que, enquanto a gibbsita contribui para a maior macroporosidade, a caulinita atua no sentido contrário.

CONCLUSÕES

1. Os atributos físicos dos diferentes solos estudados mostraram-se associados às diferentes formas de Al presentes e à mineralogia da fração argila.

2. As formas de Al amorfas e menos cristalinas associaram-se mais aos atributos físicos relacionados com a agregação das partículas do solo, podendo esta associação ser atribuída à afinidade deste elemento com a matéria orgânica.

3. Os componentes cristalinos associaram-se mais aos atributos físicos relacionados com a organização estrutural dos solos.

LITERATURA CITADA

- BARBERIS, E.; MARSAN, F.A. & BOERO, V. Aggregation of soil particles by iron oxides in various size fractions of soil B horizons. *J. Soil Sci.*, 42:535-542, 1991.
- BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986a. pt.1, p.363-375. (Agronomy Monography, 9)
- BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Particle density. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986b. pt.1, p.377-382. (Agronomy Monography, 9)
- COLOMBO, C.P. & TORRENT, J.C. Relationships between aggregation and iron oxides in Terra Rossa soils from southern Italy. *Catena*, 18:51-59, 1991.
- DANIELSON, R.E. & SUTHERLAND, P.L. Porosity. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. pt.1, p.443-461. (Agronomy Monography, 9)
- DAY, P.R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C.A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1965. pt.1, p.545-566. (Agronomy Monography, 9)
- DEFELIPO, B.V. & RIBEIRO, A.C. Análise química do solo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1981. 17p. (Boletim de Extensão, 29)
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- EMERSON, W.W.; FOSTER, R.C. & OADES, J.M. Organo-mineral complexes in relation to soil aggregation and structure. In: HUANG, P.M. & SCHNITZER, M., eds. *Interactions of soil minerals with natural organics and microbes*. Madison, Soil Science Society of America, 1986. p.521-548. (SSSA Special Publications, 17)
- FERNANDES, B.; GALLOWAY, H.M.; BRONSON, R.D. & MANNERING, J.V. Condutividade hidráulica do solo saturado, em três sistemas de manejo. *R. Ceres*, 30:232-241, 1983.
- FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B. & CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:515-524, 1999a.
- FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B. & CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:507-514, 1999b.

- GOLDBERG, S. Interaction of aluminum and iron oxides and clay minerals and their effect on soil physical properties: a review. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 20:1181-1207, 1989.
- GUALBERTO, V.; RESENDE, M. & CURI, N. Química e mineralogia de Latossolos, com altos teores de ferro, da Amazônia e do Planalto Central. *R. Bras. Ci. Solo*, 11:245-252, 1987.
- HSU, P.H. Aluminum hydroxides and oxyhydroxides. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. *Minerals in soil environment*. Madison, Soil Science Society of America, 1989. p.331-378.
- ITAMI, K. & KYUMA, K. Dispersion behavior of soil from reclaimed lands with poor physical properties and their characteristics with special reference to clay mineralogy. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 41:45-54, 1995.
- JONES, R.C. & UEHARA, G. Amorphous coatings on mineral surfaces. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 37:792-798, 1973.
- KEMPER, W.D. & ROSENEAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. pt. 1, p.425-442. (Agronomy Monography, 9)
- LIMA, J.M. & ANDERSON, S.J. Aggregation and aggregate size effects on extractable iron and aluminum in two Hapludox. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:965-970, 1997.
- MAZURAK, A.P. Effect of gaseous phase on water-stable synthetic aggregates. *Soil Sci.* 69:135-148, 1950.
- McBRIDE, M.B. *Environmental chemistry of soils*. Madison, Oxford University Press, 1994. 406p.
- MEHRA, O.P. & JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clay Miner.*, 7:317-327, 1960.
- MENDONÇA, E.S. Oxidação da matéria orgânica e a sua relação com as diferentes formas de alumínio de Latossolos. *R. Bras. Ci. Solo*, 19:25-30, 1995.
- MENDONÇA, E.S. & ROWEL, D.L. Dinâmica do alumínio e de diferentes frações orgânicas de um Latossolo argiloso sob cerrado e soja. *R. Bras. Ci. Solo*, 18:295-303, 1994.
- OLIVEIRA, L.B. Determinação da macro e microporosidade pela "mesa de tensão" em amostras de solo com estrutura indeformada. *Pesq. Agropec. Bras.*, 3:197-200, 1968.
- PARFITT, R.L. Optimum conditions for extraction of Al, Fe and Si from soils with acid oxalate. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 20:801-816, 1989.
- REICHERT, J.M. & NORTON, L.D. Aggregate stability and rain impacted sheet erosion of air dried and prewetted clayey surface soil under intensive rain. *Soil Sci.*, 158:159-169, 1994.
- RESENDE, M. Aplicações de conhecimentos pedológicos à conservação de solos. *Inf. Agropec.*, 11:3-18, 1985.
- RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B. & CORRÊA, G.F. *Pedologia: base para distinção de ambientes*. 3.ed. Viçosa, NEPUT, 1999. 338p.
- RICH, C.I. Hydroxy interlayers in expansible layer silicates. *Clays Clay Miner.*, 16:15-30, 1968.
- SALES, L.E. O.; FERREIRA, M.M.; OLIVEIRA, M.S. & CURI, N. Estimativa da velocidade de infiltração básica do solo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 34:2091-2095, 1999.
- SAS Institute. *SAS language and procedure: usage*. Version 6. Cary NC: SAS Institute, 1995. 373p.
- SCHWERTMANN, U. Use of oxalate for Fe extraction from soils. *Can. J. Soil Sci.*, 53:244-246, 1973.
- SHUMAN, L.M. Comparison of exchangeable Al extractable Al and Al in soil fractions. *Can. J. Soil Sci.*, 70:263-275, 1990.
- SOON, Y.K. Fractionation of extractable aluminum in acid soil: A review and a proposed procedure. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 24:1683-1708, 1993.
- TISDALL, J.M. & OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soil. *J. Soil Sci.*, 33:141-163, 1982.
- TROEH, F.R.; HOBBS, J.A. & DANAHUE, R.L. *Soil and water conservation: for productivity and environment protection*. New Jersey, Prentice-Hall, 1980. 718p.
- van REEUWIJK, L.P. *Procedure of soil analysis*. Wageningen, ISRIC, 1987. s.p. (Technical paper, 9)
- VETTORI, L. *Métodos de análises de solo*. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo, 1969. 24p. (Boletim Técnico, 7)
- WADA, K. & HARWARD, N.E. Amorphous clay constituents of soils. *Adv. Agron.*, 26:211-260, 1974.