

SEÇÃO II - QUÍMICA E MINERALOGIA DO SOLO

IMPORTÂNCIA DAS ESPÉCIES MINERAIS NO POTÁSSIO TOTAL DA FRAÇÃO ARGILA DE SOLOS DO TRIÂNGULO MINEIRO⁽¹⁾

V. F. MELO⁽²⁾, G. F. CORRÊA⁽³⁾, P. A. MASCHIO⁽⁴⁾,
A. N. RIBEIRO⁽⁴⁾ & V. C. LIMA⁽²⁾

RESUMO

Poucos trabalhos relacionam a reserva de K em solos desenvolvidos sob clima tropical úmido com os minerais presentes na fração argila. Com esse propósito, coletaram-se amostras de 19 solos no Triângulo Mineiro, originados de diferentes materiais de origem e estádios de desenvolvimento. Dada a significativa ocorrência, tomou-se maior número de amostras no Grupo Bauru, abrangendo todas as formações geológicas encontradas na região. Os teores totais de K foram determinados após digestão das amostras de terra fina e das frações areia, silte e argila com ácidos concentrados (HF, HNO₃ e H₂SO₄). Para avaliar a contribuição de cada espécie mineral nos teores totais de K, amostras da fração argila saturadas por Na foram submetidas a extrações sequenciais e seletivas de minerais, na seguinte ordem: extração de Al e óxidos de Fe de baixa cristalinidade; extração de óxidos de Fe mais cristalinos; extração de gibbsita e caulinita; extração de minerais do tipo 2:1; extração de feldspatos e minerais resistentes. A composição mineralógica da fração argila refletiu o intenso grau de intemperismo e lixiviação dos solos do Triângulo Mineiro, com baixos teores de minerais de baixa cristalinidade, predomínio de caulinita e presença de outros minerais secundários resistentes. Mesmo com essa mineralogia, a fração argila apresentou o maior teor de K total, principalmente para os solos mais intemperizados. Considerando a abundância de caulinita na fração argila, este mineral foi uma importante fonte de formas não-trocáveis do nutriente. Por outro lado, a contribuição dos óxidos de Fe e de Al de baixa cristalinidade e dos óxidos de Fe mais cristalinos nos teores totais de K da fração argila foi

⁽¹⁾ Parte do trabalho de Recém-Doutor do primeiro autor (bolsa da FAPEMIG) e de iniciação científica do terceiro e quarto autores (bolsa do CNPq). Recebido para publicação em abril de 2002 e aprovado em maio de 2003.

⁽²⁾ Professor do Departamento de Solos, Universidade Federal do Paraná – UFPR. Rua dos Funcionários 1540, Juvevê, CEP 80035-050 Curitiba (PR). E-mail: vanderfm@agrarias.ufpr.br

⁽³⁾ Professor do Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia – UFU. Caixa Postal 593, CEP 38400-902 Uberlândia (MG). Bolsista do CNPq. E-mail: gfcorreia@ufu.br

⁽⁴⁾ Aluno do Curso de Agronomia, Universidade Federal do Paraná – UFPR. Bolsista do CNPq. E-mail: anderphoenix@pop.com.br

inexpressiva. Em geral, os minerais primários facilmente intemperizáveis (mica e feldspato) contribuíram em grande proporção para o K total da fração argila, principalmente para os solos mais jovens desenvolvidos de arenito da Formação Uberaba, migmatito/micaxisto do Grupo Araxá e basalto da Formação Serra Geral.

Termos de indexação: extração seqüencial, caulinita, mica, feldspato.

SUMMARY: *IMPORTANCE OF MINERAL SPECIES IN TOTAL POTASSIUM CONTENT OF CLAY FRACTION IN SOILS OF THE TRIÂNGULO MINEIRO, MINAS GERAIS STATE, BRAZIL*

Few studies relate the K reserve in soils developed in a humid tropic climate with the minerals found in the clay fraction. Nineteen soils were collected for this purpose in the Triângulo Mineiro region, Minas Gerais State, Brazil, developed from different parent materials and different weathering degrees. Due to the greater occurrence, a larger number of samples of the Bauru Group was collected, comprising all the geological formations found in the region. The total K content in soil and the sand, silt, and clay fractions were determined after the digestion of the soil samples by HF, HNO₃ and H₂SO₄. To quantify the contribution of each mineral species to the total K content, Na-saturated clay samples were submitted by a sequential and selective mineral extraction procedure, following the order: amorphous Al and Fe oxides; crystalline Fe oxides; kaolinite and gibbsite; mica and other 2:1 minerals and; feldspar and resistant minerals. The clay mineralogy composition reflects the high weathering and leaching degree in soils of the Triângulo Mineiro, with low contents of amorphous minerals, a predominant proportion of kaolinite and the presence of other secondary resistant minerals. In spite of this mineral composition, the clay fraction presented the highest total K content, mainly in the most weathered soils. Due to the high proportion of kaolinite in the clay fraction, this mineral was an important source of non-exchangeable K forms. On the other hand, the contribution of amorphous Fe and Al oxides and crystalline Fe oxides to the total K content of the clay fraction was negligible. In general, easily weathered primary minerals (mica and feldspar) contributed largely to the total K of the clay fraction, principally to the youngest soils developed from the Uberaba (sandstone) and Serra Geral (basalt) Formations, and the Araxá Group (migmatite/micaschist).

Index terms: sequential extraction, kaolinite, mica, feldspar.

INTRODUÇÃO

Existe um equilíbrio entre as formas de K no solo. As plantas absorvem o K da solução, o qual é tamponado pelas formas trocáveis (CTC), que são normalmente repostas pelas reservas do solo (formas não-trocáveis e estruturais) (Sparks, 1987). As formas não-trocáveis e estruturais de K são as reservas de médio e longo prazo para as plantas.

A quase totalidade do K total dos solos está na fase mineral (Martin & Sparks, 1985). Os minerais mais comuns relacionados como fontes de K estrutural são as micas e os feldspatos, com a seguinte seqüência, em ordem decrescente de facilidade de liberação de K: biotita, ortoclásio, microclínio e muscovita (Song & Huang, 1988).

O K não-trocável é retido nos poros ditrigonais entre camadas tetraédricas adjacentes de minerais de argila do tipo 2:1 com alta densidade de carga

negativa (Song & Huang, 1988), tais como: vermiculita e minerais de argilas interestratificadas (Martin & Sparks, 1985). O íon K liga-se por forças coulômbicas em coordenação com as cargas negativas geradas por substituição isomórfica, sendo a ligação favorecida pelo seu raio iônico (1,33 Å), que se ajusta ao tamanho do poro ditrigonal, e por sua baixa energia de hidratação (0,337 kJ mol⁻¹) (Wada & Kakuto, 1993). A força de ligação excede a de hidratação do íon, resultando na desidratação do K e no colapso parcial da estrutura do mineral (Sparks, 1987).

Assim, os íons K são fisicamente presos em graus variados, limitando a sua difusão (Martin & Sparks, 1985). A liberação numa taxa apreciável envolveria expansão das unidades do mineral e hidratação dos íons K nas entrecamadas. O K não-trocável também pode ser encontrado nas bordas parcialmente intemperizadas de micas ("zonas em cunha") (Kirkman et al., 1994). Nessas áreas, os cátions com menor energia de hidratação, como o K, podem

perder a água de hidratação e penetrar mais profundamente nas cunhas, atingindo locais mais estreitos (sítios de adsorção específica), onde os cátions com maior raio iônico hidratado e alta energia de hidratação (Ca e Mg) não conseguem alcançar (Douglas, 1989). A determinação do K não-trocável tem sido feita em diversos estudos, empregando HNO_3 fervente 1 mol L^{-1} , lavagens sucessivas com $\text{HCl } 0,01 \text{ mol L}^{-1}$, ácidos orgânicos de baixo peso molecular (cítrico e oxálico) e resinas trocadoras de cátions (Richards et al., 1988).

As formas não-trocáveis de K não são detectadas pelos métodos de rotina (por exemplo, Mehlich-1 e oxalato de amônio 1 mol L^{-1} , Pavan et al., 1992), razão por que as recomendações de adubação baseiam-se apenas nas formas trocáveis do nutriente. Em determinadas situações, a quantidade extraída pelas plantas é superior à detectada por esses métodos de extração, nos quais as formas não-trocáveis de K contribuem com grande parte do total absorvido pelas plantas (Richards et al., 1988). Nesses casos, pode-se ter ausência de resposta na absorção de K e produtividade das plantas frente à aplicação de fertilizantes potássicos, com desperdício de adubo, aumento do custo de produção e maior contaminação ambiental.

Contudo, antes do estudo com plantas, é necessário conhecer a reserva de K nas frações do solo e a contribuição de cada espécie mineral nos teores totais do nutriente, uma vez que a taxa de liberação de K é determinada, principalmente, pela natureza, tamanho e concentração dos minerais presentes no solo.

Em solos altamente intemperizados de regiões tropicais úmidas, obtêm-se teores de K total desde muito baixo (150 mg kg^{-1}) até valores mais elevados (2.000 mg kg^{-1}); contudo, por meio da difração de raios-X, não se detectam minerais primários fontes do nutriente, como mica e feldspato, em virtude da baixa concentração e cristalinidade destes minerais (Fanning et al., 1989; Melo et al., 1995). Melo et al. (2002b), utilizando técnicas de dissolução seletiva de minerais, obtiveram teores muito baixos de mica na fração argila de Latossolos de diferentes regiões do Brasil, com valores entre 0,4 e $11,8 \text{ g kg}^{-1}$. Por outro lado, a participação dos minerais micáceos no K total da fração argila desses solos foi expressiva (variação de 170 a 751 g kg^{-1}), atribuída aos altos teores de K na mica. Segundo esses autores, a caulinita, mesmo sendo mineral secundário, também representa uma importante reserva de K na fração argila. A mais provável fonte de formas não-trocáveis de K na caulinita foi a presença de camadas de mica preservadas no interior do mineral (Lee et al., 1975; Melo et al., 2001a).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a contribuição das espécies minerais nos teores totais de K da fração argila das principais classes de solos do Triângulo Mineiro.

MATERIAL E MÉTODOS

Amostragem dos solos

A seleção dos solos para amostragem foi definida com base nas diferenças entre os materiais de origem ocorrentes no Triângulo Mineiro (Quadro 1). Inicialmente, foram separados quatro grupos geológicos: Grupo Bauru, Grupo Araxá, Grupo São Bento e Cobertura Detrito-Laterítica Terciária. O número de solos em cada grupo foi definido de acordo com a representação espacial das litologias, sendo tomadas maior número de amostras no Grupo Bauru. Dentro deste grupo, foi feita amostragem em todas as formações geológicas encontradas no Triângulo Mineiro. Mesmo pertencendo à mesma formação geológica, diferenças locais no material de origem e relevo foram consideradas na amostragem.

Para avaliar os teores de K em relação ao grau de intemperismo, na Formação Serra Geral (basalto), selecionaram-se diferentes classes de solos (Nitossolos e Latossolos). Foram incluídos também solos mais jovens (Argissolos) desenvolvidos de materiais de origem mais ricos em minerais primários fontes de nutrientes (Grupo Araxá - migmatito/micaxistos) (Quadro 1). Selecionaram-se o horizonte B, para os Latossolos, e o Horizonte C, para o Neossolo Quartzarênico. Com o objetivo de estudar diferenças nos teores de K com a profundidade do solo, foram selecionados os horizontes B e BC ou C para os Argissolos, Nitossolos e Alissolos (Quadro 1). Considerando a pouca espessura do horizonte A e a alta porosidade da maioria dos solos (horizonte Bw), verificou-se em campo abundante crescimento de raízes nos horizontes subsuperficiais, evidenciando o importante papel desses horizontes na dinâmica de K para as plantas.

Análise textural

A análise textural foi realizada pelo método da pipeta de acordo com EMBRAPA (1997).

Preparação das amostras e separação das frações do solo para extrações químicas e estudos mineralógicos

As amostras foram tratadas com hipoclorito de sódio, para remoção de matéria orgânica, e com $\text{NaOH } 0,2 \text{ mol L}^{-1}$, para dispersão das partículas (Jackson, 1979). Após esses tratamentos prévios, a fração areia foi retida em peneira de 0,05 mm e as frações argila e silte foram recolhidas em provetas de 1.000 mL e separadas por sedimentação com base na lei de Stokes (Gee & Bauder, 1986).

Determinação dos teores totais de K

Os teores totais de K na terra fina e nas frações argila, silte e areia, todas secas em estufa a 105°C , foram determinados por fotometria de chama, após

Quadro 1. Classe (EMBRAPA, 1999), material de origem (RADAMBRASIL, 1983), análise textural (EMBRAPA, 1997) e localização dos solos amostrados na região do Triângulo Mineiro

Amostra	Classe	Horizonte	Profundidade cm	Local/município	Grupo geológico	Formação geológica	Litologia	Textura		
								Areia	Silte	Argila
								g kg ⁻¹		
1	LVd ⁽¹⁾	Bw	52-85	Uberlândia	Coberturas ⁽¹¹⁾	-	Sedimentos	110	10	880
2	LVAAd ⁽²⁾	Bw	29-57	Uberaba	Coberturas ⁽¹¹⁾	-	Sedimentos	130	20	850
3	LVd ⁽¹⁾	Bw	20-60	Campina Verde	Bauru	Adamantina ⁽¹³⁾	Arenito	760	20	220
4	LVd ⁽¹⁾	Bw	31-70	Capinópolis	Bauru	Adamantina ⁽¹³⁾	Arenito	620	40	340
5	LVd ⁽¹⁾	Bw	33-65	Ituiutaba	Bauru/São Bento	Adamantina/Serra Geral ⁽¹⁴⁾	Arenito/Basalto	510	50	440
6	PVAe ⁽³⁾	Bt	53-108	Comendador Gomes	Bauru	Adamantina ⁽¹³⁾	Arenito	680	30	290
7	LVd ⁽¹⁾	Bw	13-58	Comendador Gomes	Bauru	Marília ⁽¹³⁾	Arenito	800	20	180
8	LVd ⁽¹⁾	Bw	32-72	Monte Alegre	Bauru	Marília ⁽¹³⁾	Arenito	790	10	200
9	RQo ⁽⁴⁾	C	50-70	Santa Vitória	Bauru	Marília ⁽¹³⁾	Arenito	860	10	130
10	LVd ⁽¹⁾	Bw	11-70	Comendador Gomes	Bauru	Marília ⁽¹³⁾	Arenito	800	10	190
11	LVAAd ⁽²⁾	Bw	47-70	Uberaba	Bauru	Marília ⁽¹³⁾	Arenito	660	10	330
12	LVAAd ⁽²⁾	Bw	32-66	Uberaba	Bauru	Uberaba ⁽¹⁵⁾	Arenito	660	20	320
13	ACt ⁽⁵⁾	Bt	29-67	Uberaba	Bauru	Uberaba ⁽¹⁵⁾	Arenito	550	30	420
14		C	67-115					530	140	330
15	LVdf ⁽⁶⁾	Bw	37-70	Conquista	São Bento	Serra Geral ⁽¹⁶⁾	Basalto	40	390	570
16	LVdf ⁽⁶⁾	Bw	42-70	Cachoeira Dourada	São Bento	Serra Geral ⁽¹⁶⁾	Basalto	130	250	620
17	NVef ⁽⁷⁾	Bt1	22-43	Indianópolis	São Bento	Serra Geral ⁽¹⁶⁾	Basalto	60	220	720
18		BC	65-88					70	210	720
19	NVdf ⁽⁸⁾	Bt	27-52	Ituiutaba	São Bento	Serra Geral ⁽¹⁶⁾	Basalto	270	110	620
20		C	52-69					270	110	620
21	PVAe ⁽⁹⁾	Bt	32-88	Araguari	Araxá ⁽¹²⁾	-	Migmatito/Micaxisto	190	100	710
22		BC	88-125					240	100	660
23	PVe ⁽¹⁰⁾	Bt	28-70	Araguari	Araxá ⁽¹²⁾	-	Migmatito/Micaxisto	390	10	600
24		Bw	70-115					380	50	570

⁽¹⁾ Latossolo Vermelho distrófico típico. ⁽²⁾ Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico. ⁽³⁾ Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico típico. ⁽⁴⁾ Neossolo Quartzarênico órtico típico. ⁽⁵⁾ Alissolo Crômico argilúvico típico. ⁽⁶⁾ Latossolo Vermelho distroférico típico. ⁽⁷⁾ Nitossolo Vermelho eutroférico chernossólico. ⁽⁸⁾ Nitossolo Vermelho distroférico típico. ⁽⁹⁾ Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico abrupto. ⁽¹⁰⁾ Argissolo Vermelho eutrófico latossólico. ⁽¹¹⁾ Coberturas Detrito-Lateríticas Terciárias. ⁽¹²⁾ Unidades pré-cambrianas compostas de micaxisto, gnaisses granatíferos, migmatitos e granitos. ⁽¹³⁾ Pacote sedimentar com camadas predominantemente areníticas e secundariamente lamíticas, conglomeráticas, silticas e argilíticas. ⁽¹⁴⁾ Arenito da Formação Adamantina com contribuição de derrames de composição básica. ⁽¹⁵⁾ Pacote sedimentar interestratificado de arenitos muito finos, médios e raramente grosseiros com camadas de siltitos, argilitos e arenitos conglomeráticos ou arenito conglomerático, com ocorrências cíclicas, matriz arenítica esverdeada agregando grânulos de basalto, argilito, magnetita e nódulos de calcário e um conglomerado basal com matriz polimítica. ⁽¹⁶⁾ Sucessão de derrames de composição básica, com intercalações lenticulares de arenitos (Botucatu) intertrapeado.

digestão da amostra com os ácidos fluorídrico, nítrico e sulfúrico (Lim & Jackson, 1986, adaptado por Melo et al., 2002a,b).

Análises sequenciais na fração argila

Para estimar a contribuição das espécies minerais nos teores totais de K da fração argila, utilizou-se o

método de extração sequencial e seletiva dos minerais, proposto por Melo et al. (2002a,b), com algumas modificações, na seguinte ordem: argila saturada com Na (12 g) → oxalato de amônio (OA) 0,2 mol L⁻¹ pH 3,0 (McKeague, 1978) (extração de alumínio e óxidos de Fe de baixa cristalinidade) → ditionito-citrato-bicarbonato (DCB) (Mehra &

Jackson, 1960) (extração de óxidos de Fe mais cristalinos) → NaOH 5 mol L⁻¹ fervente (Norrish & Taylor, 1961) (extração de caulinita e gibbsita) → NaHSO₄ (cristais) (Jackson et al., 1986, modificado por Melo et al., 2002a,b) (extração de mica e demais minerais do tipo 2:1) → digestão total com os ácidos fluorídrico, nítrico e sulfúrico (Lim & Jackson, 1986, modificado por Melo et al., 2002a,b) (extração de minerais resistentes, como feldspato e quartzo).

Após cada extração seqüencial, os teores de K foram determinados conforme descrito anteriormente.

Outros procedimentos comuns às extrações seqüências foram: (a) o peso das amostras foi tomado em balança de precisão com quatro casas decimais; (b) antes das pesagens, para obtenção do peso inicial (antes da extração) e do peso final (após a extração), as amostras foram secas em estufa a 105 °C por 12 h; (c) para remover o excesso de sais, após cada extração, a amostra foi lavada com solução de (NH₄)₂CO₃ 0,5 mol L⁻¹ e água deionizada; (d) durante as extrações e lavagens da amostra, a suspensão foi centrifugada a 4.000 rpm por 10 min. Após a extração com OA e DCB, os teores de Al e Fe foram determinados por espectrometria de absorção atômica.

Foram feitas as seguintes modificações à seqüência de extrações propostas por Melo et al. (2002a,b): (a) após a extração com DCB, não foi realizada a extração de aluminossilicatos de baixa cristalinidade com NaOH 0,5 mol L⁻¹ fervente (Jackson et al., 1986). Mediante a reduzida concentração de aluminossilicatos de menor cristalinidade na fração argila (Melo et al., 2002b) e a baixa cristalinidade da caulinita sob condições de clima tropical úmido (Hughes & Brown, 1979; Melo, et al., 2001a), o que favorece também a extração de caulinita e dificulta a separação destes minerais, optou-se pela exclusão de extração com NaOH 0,5 mol L⁻¹ na análise seqüencial; (b) outra modificação refere-se à extração de mica e demais minerais do tipo 2:1, utilizando cristais de NaHSO₄. O método proposto por Jackson et al. (1986) recomenda a utilização de cadinhos de sílica vítrea (quartzo fundido) com tampas em rosca aquecidos em bico de bunsen, para a reação ocorrer em sistema totalmente fechado, reduzindo a perda de SO₃, prolongando a fusão e evitando o acúmulo de Na₂SO₄ (reações 1 e 2). Tendo em vista o alto custo desses cadinhos e a morosidade da realização do tratamento em bicos de bunsen, eles foram substituídos por béqueres de teflon distribuídos em banho de areia a 270 °C, conforme modificações propostas por Melo et al. (2002a,b).



Após a extração com NaHSO₄, forma-se um mineral de baixa cristalinidade pela combinação do

S do sal com os constituintes dos minerais extraídos (Jackson et al., 1986). Melo et al. (2002a,b) optaram apenas pela extração de mica com NaHSO₄. No presente estudo, após a extração dos minerais do tipo 2:1, o material de baixa cristalinidade foi removido com 50 mL de NaOH 0,5 mol L⁻¹ fervente por 3 min (Jackson et al., 1986), antes da digestão total da amostra com os ácidos fluorídrico, nítrico e sulfúrico. Melo (1998) obteve a seguinte composição química desse material: SiO₂ = 900 g kg⁻¹; SO₃ = 82,3 g kg⁻¹; Al₂O₃ = 10,2 g kg⁻¹; Fe₂O₃ = 1,7 g kg⁻¹.

Com o propósito de acompanhar as variações mineralógicas, após cada extração seqüencial, foram montadas lâminas orientadas e submetidas à difratometria de raios-X (DRX). Os difratogramas foram obtidos em goniômetro vertical Philips, modelo PW1050/70, com velocidade de 1° 2 θ/min e com amplitude de 3 a 61° 2 θ. O difratômetro, equipado com tubo de cobre, filtro de Ni e utilizando radiação CuKα, foi operado a 20 mA e 40 kV.

Cálculos da contribuição dos minerais extraídos nas análises seqüenciais nos teores totais de K da fração argila

A contribuição dos minerais extraídos nos diferentes tratamentos seqüenciais nos teores totais de K foi calculada, considerando a quantidade de material removido e os teores de K obtidos em cada extração seqüencial. Maiores detalhes dos cálculos podem ser obtidos em Melo (1998).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise textural

As frações argila e areia foram os principais componentes dos solos estudados (Quadro 1). Somente os LVdf de Conquista e Cachoeira Dourada e o NVef de Indianópolis (amostras 15 a 18) apresentaram teores mais elevados de silte, variando de 190 a 390 g kg⁻¹, superando os teores de areia. Os teores elevados de silte encontrados nos LVdf (amostras 15 e 16) podem ser atribuídos à ineficiência do método utilizado para dispersão de solos mais intemperizados, com teores elevados de óxidos de Fe e gibbsita. Segundo Netto (1996) e Melo et al. (2000), o silte nos Latossolos originados de basalto é, normalmente, constituído por microagregados de minerais da fração argila com alta estabilidade, cimentados pelos óxidos de Fe.

O LVd e o LVAd originados das Coberturas Terciárias (amostras 1 a 2) apresentaram os maiores teores de argila, refletindo a natureza dos sedimentos (Quadro 1). Entre as formações do Grupo Bauru (amostras 3 a 14), os sedimentos da Formação Marília são mais arenosos e com menor proporção de cimento argiloso. O LVd do município de Ituiutaba (amostra 5) revela maior teor de argila

por corresponder à posição de interface entre as litologias pertencentes às Formações Adamantina (Grupo Bauru) e Serra Geral (Grupo São Bento) (Quadro 1).

Teores totais de K

Os teores totais de K foram baixos para os solos mais intemperizados originados de sedimentos da Cobertura Terciária e do arenito das Formações Adamantina e Marília (Quadro 2, amostras 1 a 5 e 7 a 11). Para esses Latossolos, em que predomina a fração areia (Quadro 1), ressalta-se a importância das frações mais finas (argila e silte) na reserva do mineral. Apesar da pobreza do material de origem (Quadro 1), as frações mais finas desses solos, quando analisadas separadamente, apresentaram teores relativamente altos de K, superando solos desenvolvidos de materiais mais ricos, como os LVdf (amostras 15 e 16) (Quadro 2). Mesmo solos jovens desenvolvidos de basalto, como o NVef (amostras 17 e 18), não apresentaram altos teores de K total, comparativamente aos solos de rochas ácidas, por causa da pobreza das rochas básicas em feldspatos potássicos. A presença do arenito Botucatu intertrapeado no basalto (RADAMBRASIL, 1983) de origem do NVdf de Ituiutaba resultou nos baixos teores de K total das amostras 19 e 20.

Os teores mais elevados de K total foram obtidos no PVAe de Araguari (amostras 21 e 22), pertencente

ao Grupo Araxá, principalmente nas frações areia e silte (Quadro 2). O gnaíse e o micaxisto desse grupo geológico apresentam altos teores de minerais primários fontes de K, como, por exemplo, feldspato e mica, ficando preservados, principalmente, nas frações mais grosseiras do solo. A relação entre reserva de K e grau de intemperismo também pode ser observada ao longo do perfil desse solo. O horizonte BC, mais jovem (amostra 22), apresentou maiores teores de K total em relação ao horizonte mais superficial (Bt) (amostra 21).

Mineralogia da fração argila e contribuição dos minerais extraídos nos tratamentos seqüenciais nos teores totais de K

Com base nos difratogramas de raios-X das amostras sem tratamento e após as extrações seqüenciais na fração argila (tratamento (a) amostra natural e tratamento (b) após DCB), verificou-se que os solos são essencialmente cauliniticos (Figura 1 amostra 6, Figura 2 amostra 17 e Figura 3 amostras 21 e 24). O ACt da Formação Uberaba (amostra 13) e os LVdf da Formação Serra Geral (amostras 15 e 16) são as únicas exceções, em que a esmectita e a gibbsita, respectivamente, predominam na fração argila (Figura 1 amostra 13 e Figura 2 amostra 16). A gibbsita também é um importante constituinte para o LVd e LVAd desenvolvidos da Cobertura Terciária (amostras 1 e 2) e para o LVAd da

Quadro 2. Teores totais de K na terra fina (TF) e nas frações argila, silte e areia dos solos

Amostra	Classe	Horizonte	TF	mg kg ⁻¹		
				Argila	Silte	Areia
1	LVd	Bw	349	549	730	93,1
2	LVAd	Bw	361	635	927	92,6
3	LVd	Bw	430	1.717	782	95,0
4	LVd	Bw	355	810	680	45,5
5	LVd	Bw	205	315	445	48,5
6	PVAe	Bt	2.490	4.220	3.302	870,6
7	LVd	Bw	223	1.165	385	42,7
8	LVd	Bw	293	780	725	6,0
9	RQo	C	154	354	250	9,9
10	LVd	Bw	268	1.260	306	62,1
11	LVAd	Bw	255	960	331	44,3
12	LVAd	Bw	2.210	4.332	3.497	1.274,6
13	ACt	Bt	10.470	4.192	22.397	14.418,4
14		C	15.095	2.540	26.750	22.266,0
15	LVdf	Bw	206	202	188	168,3
16	LVdf	Bw	268	350	455	253,8
17	NVef	Bt1	4.735	1.854	2.907	3.309,8
18		BC	2.263	2.112	2.662	2.509,5
19	NVdf	Bt	541	457	1.086	114,9
20		C	425	593	1.017	123,4
21	PVAe	Bt	12.739	9.412	27.745	22.756,7
22		BC	16.938	10.204	26.583	23.444,8
23	PVe	Bt	10.164	8.119	26.015	7.953,7
24		Bw	11.301	7.752	26.275	7.505,0

Formação Uberaba (amostra 12). Esse predomínio de caulinita, mesmo em solos mais jovens, é coerente com o clima encontrado na região do Triângulo Mineiro, em que as altas temperaturas e umidade e a boa drenagem do solo favorecem o intemperismo. Nessas condições, os minerais primários facilmente intemperizáveis, tais como mica e feldspato, transformam-se diretamente em caulinita (Anand et al., 1985; Rebertus et al., 1986).

A baixa quantidade de material menos cristalino na fração argila dos solos (extração com OA) (Quadro 3) também é atribuída a forte ação do intemperismo. Esse material foi constituído

principalmente por Al, com menor participação de minerais de Fe (Quadro 4). Já a quantidade de material e teores de Fe_2O_3 extraídos pelo DCB, associados com óxidos de Fe mais cristalinos, principalmente hematita e goethita, variaram de 10,0 a 359,4 $g\ kg^{-1}$ (Quadro 3) e de 16,1 a 316,1 $g\ kg^{-1}$ (Quadro 4), respectivamente. Essa amplitude de valores evidencia as diferenças existentes no material de origem dos solos. A liberação de Al pelo DCB foi devida, principalmente, à dissolução de goethita e hematita com substituição de Fe por Al na estrutura do mineral (Schwertmann & Kämpf, 1985; Melo et al., 2001b).

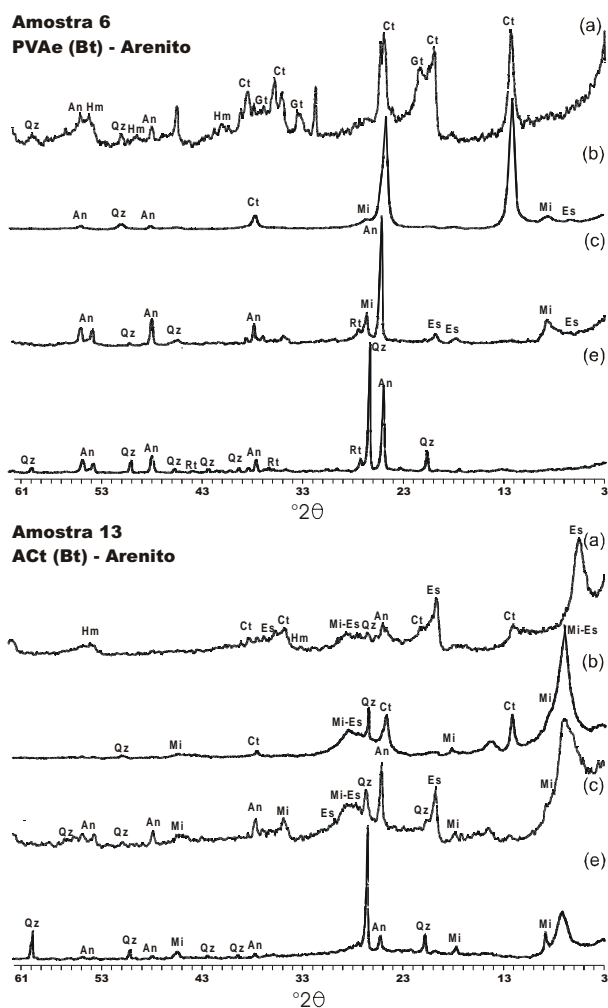


Figura 1. Difratogramas de raios-X da fração argila orientada do PVAe da Formação Adamantina e do ACt da Formação Uberaba, mostrando a mineralogia com os tratamentos seqüenciais (sem tratamento (a), após DCB (b), após NaOH 5 mol L⁻¹ (c), após NaHSO₄ e NaOH 0,5 mol L⁻¹ (e)): An - anatásio, Ct - caulinita, Es - esmectita, Gt - goethita, Hm - hematita, Mi - mica, Mi-Es - interestratificado mica-esmectita e Qz - quartzo.

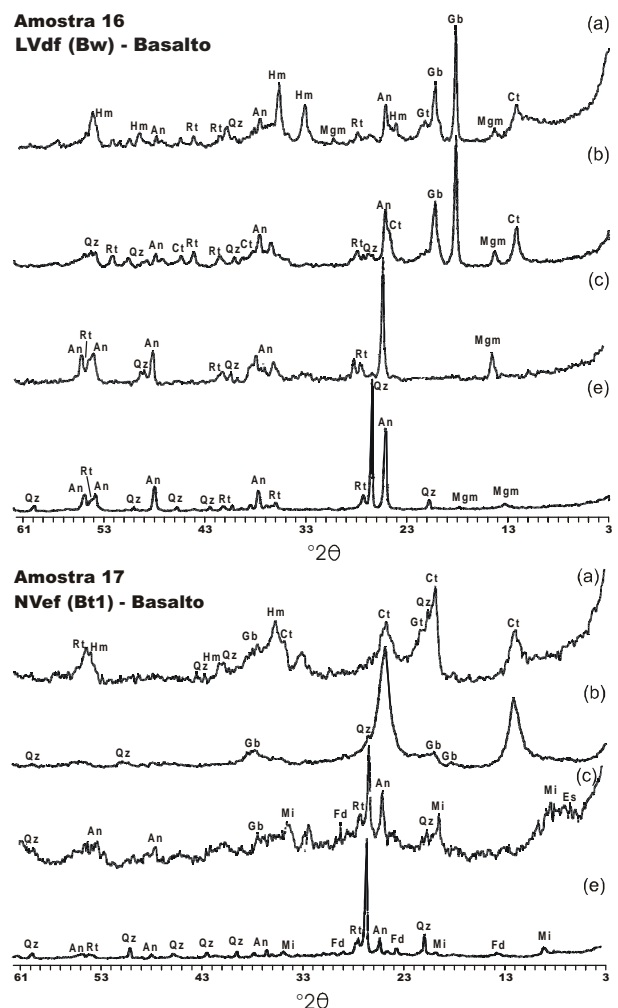


Figura 2. Difratogramas de raios-X da fração argila orientada do LVdf e do NVec da Formação Serra Geral, mostrando a mineralogia com os tratamentos seqüenciais (sem tratamento (a), após DCB (b), após NaOH 5 mol L⁻¹ (c), após NaHSO₄ e NaOH 0,5 mol L⁻¹ (e)): An - anatásio, Ct - caulinita, Es - esmectita, Fd - feldspato potássico, Gb - gibbsita, Gt - goethita, Hm - hematita, Mgm - maghemita, Mi - mica, Qz - quartzo e Rt - rutilo.

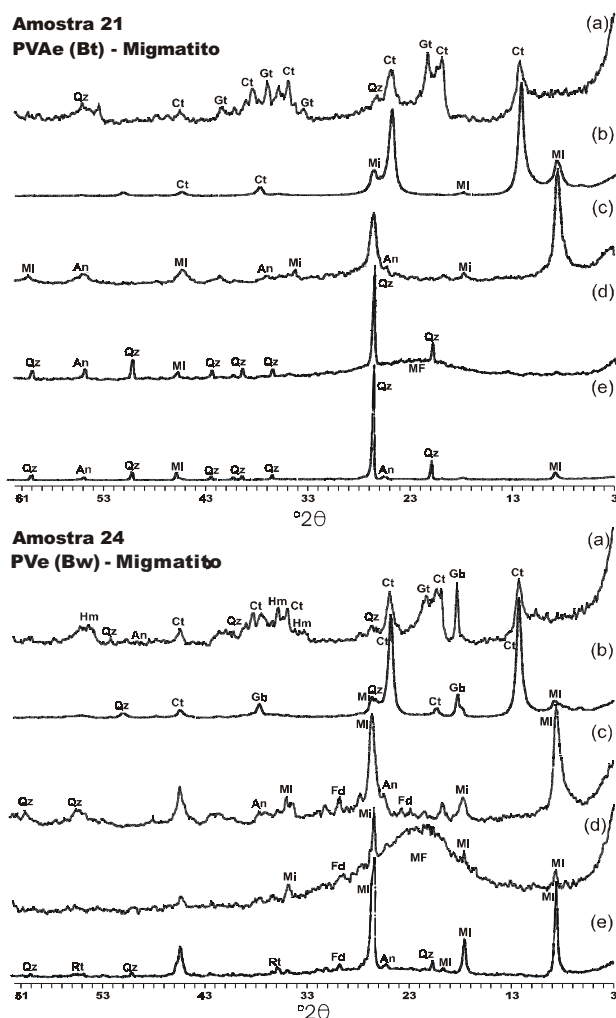


Figura 3. Difratogramas de raios-X da fração argila orientada do PVAe e do PVE do Grupo Araxá, mostrando a mineralogia com os tratamentos seqüenciais (sem tratamento (a), após DCB (b), após NaOH 5 mol L⁻¹ (c), após NaHSO₄ (d) e após NaOH 0,5 mol L⁻¹ (e)): An - anatásio, Ct - caulinita, Gb - gibbsita, Gt - goethita, Hm - hematita, Mi - mica, MF - material formado após NaHSO₄, Qz - quartzo.

Os horizontes Bt e C do ACt de Uberaba (amostras 13 e 14) apresentaram os menores teores de Fe₂O₃ extraídos pelo DCB (Quadro 4), tanto pela pobreza do material de origem (Arenito da Formação Uberaba) em minerais primários fontes de Fe quanto pelo baixo grau de intemperismo do solo. Em virtude do alto teor de areia dos solos desenvolvidos de arenito das Formações Adamantina e Marília (amostras 3 a 11), fazendo a correção dos valores obtidos na fração argila para a TFSA, os teores de Fe₂O₃ extraídos com DCB reduzem consideravelmente.

Em geral, os solos mais jovens (amostras 6, 13, 14, 17, 18, 21 e 22) apresentaram os maiores teores

de K extraídos pelo OA (Quadro 5), destacando-se o ACt originado de arenito da Formação Uberaba (amostras 13 e 14). Mesmo entre os solos mais intemperizados, o LVAd da mesma formação geológica também apresentou o maior teor de K extraído pelo OA. A liberação de K pelo OA é atribuída à extração de minerais aluminossilicatados de baixa cristalinidade (Melo et al., 2002b). Outra possibilidade é a dissolução de pequenas partículas de mica, liberando K (Jackson et al., 1986). Na maioria das amostras, não houve extração de K com o tratamento com DCB (Quadro 5). Esse comportamento era esperado, em razão da menor possibilidade de associação desse nutriente com óxidos de Fe mais cristalinos (Melo et al., 2002b).

Considerando a abundância de caulinita nas amostras, a maior extração de minerais nas análises seqüenciais da fração argila foi obtida com o tratamento com NaOH 5 mol L⁻¹, com teores variando de 528 a 837 g kg⁻¹ (Quadro 3). Com exceção dos LVdf da Formação Serra Geral (amostras 15 e 16), o material removido é constituído, principalmente, por caulinita (Figuras 1 a 3). A extração de caulinita e gibbsita pelo NaOH 5 mol L⁻¹ foi eficiente, como pode ser observado pela ausência de reflexões em 0,72 e 0,484 nm após o tratamento (tratamento c), respectivamente.

Verificou-se também a tendência de os solos mais jovens apresentarem os maiores teores de K extraído pelo NaOH 5 mol L⁻¹, obtendo-se o teor máximo de 2.037 mg kg⁻¹ no horizonte Bt do PVAe de Comendador Gomes (amostra 6) (Quadro 5). Singh & Gilkes (1992) e Melo et al. (2001a), utilizando análises químicas e técnicas de microscopia eletrônica, obtiveram teores semelhantes de K em caulinitas de diferentes classes de solos. A participação da caulinita nos teores totais de K foi alta, com valores entre 69 e 686 g kg⁻¹ (Quadro 6). A presença de K na caulinita é atribuída à ocorrência de camadas residuais de mica preservadas no interior da estrutura do mineral (Lee et al., 1975; Singh & Gilkes, 1992). Segundo Melo et al. (2001a), as menores partículas de caulinita na fração argila apresentaram menor grau de cristalinidade e temperatura de desidroxilação e maiores teores de K.

A combinação dos tratamentos com NaHSO₄ e NaOH 0,5 mol L⁻¹ foi usada para remoção de mica e outros minerais do tipo 2:1 (Jackson et al., 1986). Contudo, nas amostras onde a ocorrência de minerais 2:1, após a extração com NaOH 5 mol L⁻¹, revelou-se mais notória, a remoção desses minerais foi apenas parcial (Figura 1 amostra 13, Figura 2 amostra 17, Figura 3 amostras 21 e 24, tratamento e).

Após a extração com NaHSO₄, formou-se um precipitado de Si e S de baixa cristalinidade, mascarando a presença dos minerais micáceos que resistiram ao tratamento com NaHSO₄ nas amostras 12, 13, 14, 17, 18, 21, 22, 23 e 24 (Figura 3

Quadro 3. Contribuição dos minerais extraídos nas análises sequenciais no peso da fração argila dos solos⁽¹⁾

Amostra	Classe	Horizonte	Remoção					Mica ⁽²⁾	Feldspato-K ⁽³⁾
			OA	DCB	NaOH 5 mol L ⁻¹	NaHSO ₄	HF		
g kg ⁻¹									
1	LVd	Bw	6,0	144,4	825	3,6	20,6	0,99	0,22
2	LVAd	Bw	18,6	106,5	837	1,1	36,8	1,49	0,41
3	LVd	Bw	21,4	179,0	741	12,4	45,8	8,34	1,15
4	LVdf	Bw	32,6	273,3	627	15,3	51,3	3,60	0,83
5	LVdf	Bw	19,3	228,6	720	8,0	24,4	0,93	0,22
6	PVAe	Bt	23,3	145,5	768	9,5	53,6	18,28	9,67
7	LVd	Bw	37,9	161,0	765	7,6	28,8	6,57	0,30
8	LVd	Bw	39,4	201,4	709	12,3	37,8	6,85	0,46
9	RQo	C	23,3	181,0	734	17,2	44,5	1,76	0,21
10	LVd	Bw	44,6	160,1	746	10,9	37,9	8,73	0,99
11	LVAd	Bw	23,9	122,1	782	5,2	66,2	3,34	1,88
12	LVAd	Bw	34,6	199,7	649	12,3	104,0	38,00	9,27
13	ACt	Bt	14,0	10,0	837	3,5	134,5	19,51	12,64
14		C	23,3	14,2	744	15,7	202,7	10,42	9,17
15	LVdf	Bw	22,0	359,4	528	7,9	82,8	0,98	0,91
16	LVdf	Bw	19,3	275,0	581	29,4	94,9	1,93	0,92
17	NVef	Bt1	20,0	229,9	712	4,2	33,5	7,66	6,16
18		BC	19,3	207,3	740	3,1	30,5	7,25	5,34
19	NVdf	Bt	19,3	245,3	705	5,9	24,0	0,78	0,72
20		C	10,7	244,7	716	4,7	23,7	1,33	0,64
21	PVAe	Bt	18,0	126,6	724	13,7	117,8	84,55	19,19
22		BC	11,3	84,9	746	13,6	144,3	88,78	49,30
23	PVe	Bt	20,7	177,5	694	6,7	101,2	63,30	37,23
24		Bw	13,3	186,5	688	4,9	107,5	72,30	31,36

⁽¹⁾ Extrações sequenciais: oxalato de amônio (OA), ditionito-citrato-bicarbonato (DCB), NaOH 5 mol L⁻¹, NaHSO₄ (cristais) e ácidos fluorídrico, nítrico e sulfúrico (HF). Remoção = redução em peso da amostra pelos diferentes tratamentos [(peso inicial - peso final)/peso inicial] x 100. ⁽²⁾ Teor de mica na fração argila estimado a partir do K extraído pelo NaHSO₄ e considerando uma concentração média de 100 g kg⁻¹ de K₂O no mineral. ⁽³⁾ Teor de feldspato potássico na fração argila estimado a partir do K extraído pelo tratamento HF e considerando uma concentração média de 168 g kg⁻¹ de K₂O no mineral.

Quadro 4. Teores de elementos extraídos nos tratamentos sequenciais da fração argila (OA - oxalato de amônio e DCB - ditionito-citrato-bicarbonato) dos solos

Amostra	Classe	Horizonte	OA		DCB	
			Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
g kg ⁻¹						
1	LVd	Bw	3,2	0,5	30,3	129,4
2	LVAd	Bw	3,5	0,3	35,2	79,7
3	LVd	Bw	5,7	1,2	23,1	177,1
4	LVdf	Bw	4,9	1,0	63,1	210,2
5	LVdf	Bw	4,2	1,5	26,8	225,4
6	PVAe	Bt	4,8	1,4	25,9	117,4
7	LVd	Bw	10,2	1,2	24,3	144,8
8	LVd	Bw	4,3	0,8	19,3	187,7
9	RQo	C	5,9	0,8	28,0	151,9
10	LVd	Bw	9,6	1,3	22,1	143,2
11	LVAd	Bw	4,8	0,4	38,0	90,1
12	LVAd	Bw	5,1	0,7	68,4	117,3
13	ACt	Bt	10,5	2,4	24,6	33,1
14		C	8,4	2,3	13,1	16,1
15	LVdf	Bw	5,0	2,0	62,6	316,1
16	LVdf	Bw	5,0	1,6	59,3	252,0
17	NVef	Bt1	5,7	3,0	43,4	182,2
18		BC	7,8	2,8	35,4	180,2
19	NVdf	Bt	7,1	1,3	31,7	220,7
20		C	5,6	1,5	31,0	220,8
21	PVAe	Bt	5,4	0,5	24,8	110,2
22		BC	4,4	0,4	17,2	78,5
23	PVe	Bt	3,7	1,2	55,5	136,5
24		Bw	4,3	1,2	65,7	145,9

Quadro 5. Teores de K total e obtidos nas extrações sequenciais na fração argila dos solos⁽¹⁾

Amostra	Classe	Horizonte	K Total	OA	DCB	g kg ⁻¹			
						NaOH 5 mol L ⁻¹	NaHSO ₄	HF	MPFI ⁽²⁾
1	LVd	Bw	549	14,5	0,0	294,9	3.402	1.500	4.902
2	LVAd	Bw	635	12,7	0,0	376,4	3.274	1.545	4.819
3	LVd	Bw	1.717	40,4	0,0	668,4	11.905	3.511	15.416
4	LVd	Bw	810	33,1	0,0	312,8	4.478	2.252	6.729
5	LVd	Bw	315	14,1	3,4	277,3	2.372	1.266	3.639
6	PVAe	Bt	4.200	71,4	0,0	2.037,4	24.059	25.161	49.221
7	LVd	Bw	1.165	24,1	0,0	179,0	14.970	1.466	16.436
8	LVd	Bw	780	15,5	0,0	368,1	11.355	1.693	13.048
9	RQo	C	354	19,3	0,0	277,4	2.370	672	3.042
10	LVd	Bw	1.260	22,7	0,0	120,9	14.851	3.646	18.497
11	LVAd	Bw	960	22,7	0,0	317,9	3.882	3.947	7.830
12	LVAd	Bw	4.332	55,2	0,0	545,3	27.129	12.424	39.553
13	ACt	Bt	4.192	184,0	9,7	1.454,6	11.735	13.099	24.834
14		C	2.540	136,6	6,6	735,8	3.960	6.308	10.269
15	LVdf	Bw	202	9,6	0,0	50,0	899	1.527	2.426
16	LVdf	Bw	350	16,5	0,0	79,9	1.289	1.357	2.646
17	NVef	Bt1	1.854	121,9	10,0	1.476,7	16.882	25.628	42.510
18		BC	2.112	126,2	6,8	1.427,0	17.905	24.426	42.330
19	NVdf	Bt	457	33,1	3,4	599,8	2.162	4.210	6.373
20		C	593	13,4	3,4	602,6	3.898	3.750	7.648
21	PVAe	Bt	9.412	138,0	6,8	1.521,0	53.386	22.717	76.103
22		BC	10.204	147,3	10,2	1.189,2	46.650	47.632	94.282
23	PVe	Bt	8.119	46,3	3,4	1.614,9	48.703	51.300	100.003
24		Bw	7.752	38,0	6,5	1.006,7	53.367	40.667	94.033

⁽¹⁾ Extração sequencial: oxalato de amônio (OA), ditionito-citrato-bicarbonato de Na (DCB), NaOH 5 mol L⁻¹, NaHSO₄ (cristais) e ácidos fluorídrico, nítrico e sulfúrico (HF). Os teores de K nas extrações sequenciais referem-se à liberação do nutriente pela ação de cada tratamento na amostra concentrada pela extração anterior (resíduo). ⁽²⁾ MPFI - Minerais Primários Facilmente Intemperizáveis (somatório das extrações com os tratamentos NaHSO₄ - HF).

amostras 21 e 24, tratamentos d, e). A baixa cristalinidade do mineral formado pode ser comprovada pela grande largura a meia altura de sua reflexão por DRX. Melo et al. (2002b) também utilizaram o sistema aberto em banho de areia para a extração de mica; contudo, não realizaram o tratamento com NaOH 0,5 mol L⁻¹ para remoção do mineral de baixa cristalinidade formado.

Mesmo não extraíndo completamente os minerais 2:1, a intensidade e a largura a meia altura (LMH) das reflexões diminuíram após a extração com NaHSO₄ e NaOH 0,5 mol L⁻¹ (Figura 1 amostra 13, Figura 2 amostra 17 e Figura 3 amostra 24). Menores valores de LMH estão associados a minerais de maior grau de cristalinidade e tamanho médio dos cristais (Hugles & Brown, 1979; Singh & Gilkes, 1992). Tomando a amostra 24 como exemplo (Figura 3), a LMH da primeira reflexão da mica (1,0 nm) reduziu de 4,5 nm (tratamento c) para 1,8 nm (tratamento e), indicando a extração preferencial pelo NaHSO₄ de partículas de mica de menor tamanho e grau de cristalinidade. Por outro lado, nas amostras 3, 6, 7, 8 e 10, onde a ocorrência de minerais do tipo 2:1 foi discreta, as reflexões características desse mineral desapareceram após o tratamento (Figura 1 amostra 6, tratamento e).

A quantidade de material removido da fração argila pelo NaHSO₄ foi baixa, variando de 1,1 a 29,4 g kg⁻¹ (Quadro 3). Melo et al. (2002b), estudando diversos solos brasileiros, constataram que o material removido pelo NaHSO₄ na fração argila (60 a 730 g kg⁻¹) era composto de minerais de titânio, principalmente, anatásio. Todas as amostras do presente estudo apresentaram anatásio e rutilo nessa fração (Figuras 1, 2 e 3).

De acordo com Jackson (1979), os teores de mica podem ser estimados pela determinação do K extraído pelo NaHSO₄, considerando que esse mineral apresenta concentração média de K₂O de 100 g kg⁻¹. Mesmo subestimando a quantidade de mica na fração argila dos solos com maior teor do mineral (amostras 12, 13, 14, 17, 18, 21, 22, 23 e 24), os teores variaram de 0,78 a 88,78 g kg⁻¹ (Quadro 3). Esses dados comprovam a existência de mica mesmo em solos altamente intemperizados.

Moura Filho (1970), trabalhando com um LVdf do Triângulo Mineiro, encontrou relação inversa entre tamanho de agregados e teor de bases. Segundo o autor, as bases concentram-se no interior dos agregados e, graças ao reduzido tamanho dos poros, a lixiviação é limitada. Assim, essa concentração relativa maior de sílica e bases no

Quadro 6. Contribuição das extrações sequenciais nos teores de K total na fração argila dos solos⁽¹⁾

Amostra	Classe	Horizonte	OA	DCB	g kg ⁻¹			
					NaOH 5 mol L ⁻¹	NaHSO ₄	HF	MPFI
1	LVd	Bw	38,2	0,0	662,5	218	81,6	299
2	LVAAd	Bw	24,2	0,0	630,1	237	108,7	346
3	LVd	Bw	28,3	0,0	374,3	485	112,6	597
4	LVd	Bw	49,8	0,0	326,8	449	174,0	623
5	LVd	Bw	42,3	9,9	624,8	230	92,6	323
6	PVAe	Bt	15,4	0,0	365,7	328	291,2	619
7	LVd	Bw	31,9	0,0	189,8	722	55,9	778
8	LVd	Bw	16,7	0,0	301,4	613	68,9	682
9	RQo	C	46,3	0,0	530,4	351	71,8	423
10	LVd	Bw	23,2	0,0	98,0	738	140,7	879
11	LVAAd	Bw	27,2	0,0	325,8	333	313,9	647
12	LVAAd	Bw	11,2	0,0	84,9	641	262,7	904
13	ACt	Bt	36,8	1,9	284,0	324	352,9	677
14		C	45,6	2,1	236,5	289	427,0	716
15	LVdf	Bw	38,7	0,0	124,5	328	508,9	837
16	LVdf	Bw	45,6	0,0	155,8	443	355,9	798
17	NVef	Bt1	44,6	3,6	405,2	233	314,1	547
18		BC	48,9	2,6	427,2	233	288,4	521
19	NVdf	Bt	51,5	5,1	686,1	100	156,9	257
20		C	20,2	5,1	675,0	166	133,6	300
21	PVAe	Bt	12,4	0,6	116,8	630	240,2	870
22		BC	9,5	0,6	69,4	476	444,2	920
23	PVe	Bt	3,9	0,3	109,8	446	440,4	886
24		Bw	3,4	0,6	71,8	535	389,6	924

⁽¹⁾ Extrações sequenciais: oxalato de amônio (OA), ditionito-citrato-bicarbonato (DCB), NaOH 5 mol L⁻¹, NaHSO₄ (em cristais) e ácidos: fluorídrico, nítrico e sulfúrico (HF); MPFI - Minerais primários facilmente intemperizáveis (somatório das extrações com os tratamentos NaHSO₄ e HF).

interior de agregados em solos mais intemperizados pode ser responsável pela redução do intemperismo das partículas de mica.

Com a reduzida quantidade de mica na fração argila, só foi possível o aparecimento de discreta reflexão de mica (1,0 nm) nos difratogramas de raios-X de alguns Latossolos após a remoção dos óxidos de Fe e Al e caulinita (amostras 3, 7, 8 e 10). Mesmo nos solos mais jovens, a concentração da amostra resultou no aumento expressivo das intensidades das reflexões do mineral (Figuras 2 e 3). Segundo Fanning et al. (1989), vários fatores dificultam o aparecimento de reflexões de mica por DRX: baixa concentração do mineral; partículas muito pequenas, de diâmetro inferior a 0,02 µm, e partículas parcialmente intemperizadas, com presença de camadas expandidas no interior do mineral.

De maneira geral, o resíduo extraído pelos ácidos fluorídrico, nítrico e sulfúrico, representa apenas uma pequena proporção da fração argila, principalmente nos solos mais intemperizados (Quadro 3). O NVef de Indianópolis (amostras 17 e 18), originado de basalto da Formação Serra Geral, apresentou mica, esmectita e feldspato, detectados após a remoção dos óxidos de Fe e da caulinita (Figura 2 amostra 17). Já os LVdf de Conquista e de

Cachoeira Dourada (amostras 15 e 16), por apresentarem alto grau de intemperismo, e o NVdf de Ituiutaba (amostras 19 e 20), pela influência do Arenito Botucatu, apresentaram apenas minerais resistentes e sem potencial de reserva de K (Figura 2 amostra 16).

Mesmo assim, estes Latossolos apresentaram alta quantidade de material extraído pelos tratamentos NaHSO₄ e HF, graças, principalmente, à presença significativa de minerais de Ti, como rutilo e anatásio. A maior presença de mica no PVAe e no PVe de Araguari (amostras 21, 22, 23 e 24) resultou em maiores extrações com NaHSO₄ e com os ácidos fluorídrico, nítrico e sulfúrico (teores variando de 4,9 a 13,7 e de 101,2 a 144,3 g kg⁻¹, respectivamente) (Quadro 3).

Nos solos menos intemperizados, com maior quantidade de mica, os teores de feldspato-K na fração argila estão superestimados (Quadro 3), uma vez que parte do K extraído do resíduo na análise sequencial deveu-se à extração de minerais micáceos que resistiram ao tratamento com NaHSO₄ (Figuras 1, 2 e 3). Por isso, optou-se pelo conceito de minerais primários facilmente intemperizáveis (MPFI), o qual contempla o K liberado pelos tratamentos NaHSO₄ e HF (Quadro 5).

Os dados confirmam a relação existente entre o grau de evolução do solo, riqueza mineralógica do material de origem e teor de mica e feldspato na fração argila, tendo as amostras 6, 12, 13, 17, 18, 21, 22, 23 e 24 apresentado os maiores teores de K liberados pelos MPFI (Quadro 5). Mesmo dentro de um mesmo material de origem, os solos mais jovens apresentaram maiores teores de K associados aos MPFI, como a amostra 6 (PVAe arenito da Formação Adamantina).

A contribuição da mica e dos feldspatos-K (MPFI) no teor de K total foi bastante expressiva, destacando-se os solos originados de migmatito/micaxisto do Grupo Araxá (amostras 21, 22, 23 e 24) (Quadro 6). Nesses solos, aproximadamente 900 g kg⁻¹ do K total da fração argila estão associados aos MPFI.

CONCLUSÕES

1. A reserva de K nos solos do Triângulo Mineiro é determinada, principalmente, pelo material de origem e estágio de desenvolvimento dos solos, sendo expressiva apenas nos Argissolos originados de arenito da Formação Uberaba e de migmatito/micaxisto (Grupo Araxá) e no Nitossolo originado de basalto (Grupo São Bento). Por outro lado, os solos desenvolvidos de arenitos das Formações Adamantina e Marília, rochas de maior ocorrência na região, e os Latossolos de basalto apresentaram reserva muito baixa do nutriente.

2. A contribuição dos minerais primários facilmente intemperizáveis (mica e feldspato-K) foi importante para a reserva de K da fração argila dos solos do Triângulo Mineiro, principalmente para os mais jovens desenvolvidos de migmatito/micaxisto (Grupo Araxá), com participação de aproximadamente 900 g kg⁻¹ nos teores de K total desta fração.

3. A caulinita, mesmo sendo um mineral secundário, também contribuiu, de forma expressiva, nos teores de K total. Mesmo com baixos teores de K não-trocável na caulinita, a abundância do mineral na fração argila foi responsável por este comportamento.

4. São necessários estudos complementares com cinética de liberação e cultivos sucessivos para avaliar a capacidade dos minerais da fração argila dos solos do Triângulo Mineiro de fornecer K para as plantas a partir de formas inicialmente não-trocáveis e estruturais do nutriente. Espera-se baixo potencial de liberação da reserva de K dos solos altamente intemperizados, principalmente aqueles originados de arenito das Formações Adamantina e Marília, tendo em vista a grande estabilidade das partículas de mica (provavelmente preservadas no interior de microagregados) e da caulinita e os baixos teores totais do nutriente.

LITERATURA CITADA

- ANAND, R.R.; GILKES, R.J.; ARMITAGE, T.M. & HILLYER, J.W. Feldspar weathering in lateritic saprolite. *Clays Clay Miner.*, 33:31-43, 1985.
- DOUGLAS, L.A. Vermicutes. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. *Minerals in soil environments*. 2.ed. Madison, Soil Science Society of America, 1989. p.635-674.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Rio de Janeiro. Sistema Brasileiro de classificação de solos. Brasília, Serviço de Produção de Informação - SPI, 1999. 412p.
- FANNING, D.S.; KERAMIDAS, V.Z. & EL-DESORKY, M.A. Micas. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. *Minerals in soil environments*. 2.ed. Madison, Soil Science Society of America, 1989. p.551-634.
- GEE, G.W. & BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis. Parte 1: Physical and mineralogical methods*. Madison, Soil Science Society of America, 1986. p.383-412.
- HUGHES, J.C. & BROWN, G. A crystallinity index for soil kaolinite and its relation to parent rock, climate and soil maturity. *J. Soil Sci.*, 30:557-563, 1979.
- JACKSON, M.L. *Soil chemical analysis - advanced course*. Madison, Prentice-Hall, 1979. 895p.
- JACKSON, M.L.; LIM, C.H. & ZELAZNY, L.W. Oxides, hydroxides, and aluminosilicates. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, American Society of Agronomy, 1986. Parte 1: Physical and mineralogical methods analysis. p.101-150.
- KIRKMAN, J.H.; BASKER, A.; SURAPANENI, A. & MacGREGOR, A.N. Potassium in the soils of New Zealand - a review. *N. Z. J. Agric. Res.*, 37:207-227, 1994.
- LEE, S.Y.; JACKSON, M.L. & BROWN, J.L. Micaceous oclusions in kaolinite observed by ultramicrotomy and high resolution electron microscopy. *Clays Clay Miner.*, 23:125-129, 1975.
- LIM, C.H. & JACKSON, M.L. Dissolution for total elemental analysis. In: PAGE, A.L., ed. *Methods of soil analysis. Parte 2: Chemical and microbiological properties*. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.1-12.
- MARTIN, H.W. & SPARKS, D.L. On the behavior of nonexchangeable potassium in soils. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 16:133-162, 1985.
- McKEAGUE, J.A. *Manual on soil sampling and methods of analysis*. Ottawa, Canadian Society of Soil Science, 1978. 212p.
- MEHRA, O.P. & JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clay by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clay Minerals*, 7:317-327, 1960.

- MELO, V.F.; BARROS, N.F.; COSTA, L.M.; NOVAIS, R.F. & FONTES, M.P.F. Formas de potássio e de magnésio em solos do Rio Grande do Sul, e sua relação com o conteúdo na planta e com a produção em plantios de eucalipto. *R. Bras. Ci. Solo*, 19:165-171, 1995.
- MELO, V.F. Potássio e magnésio em minerais de solos e relação entre propriedades da caulinita com formas não-trocáveis destes nutrientes. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1998. 205p. (Tese de Doutorado)
- MELO, V.F.; NOVAIS, R.F.; FONTES, M.P.F. & SCHAEFER, C.E.G.R. Potássio e magnésio em minerais das frações areia e silte de diferentes solos. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:269-284, 2000.
- MELO, V.F.; SINGH, B.; SCHAEFER, C.E.G.R.; NOVAIS, R.F. & FONTES, M.P.F. Chemical and mineralogical properties of kaolinite-rich Brazilian soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65:1324-1333, 2001a.
- MELO, V.F.; FONTES, M.P.F.; NOVAIS, R.F.; SINGH, B. & SCHAEFER, C.E.G.R. Características dos óxidos de ferro e de alumínio de diferentes classes de solos. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:19-32, 2001b.
- MELO, V.F.; NOVAIS, R.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; FONTES, M.P.F. & SINGH, B. Mineralogia das frações areia, silte e argila de sedimentos do Grupo Barreiras no município de Aracruz, estado do Espírito Santo. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:22-35, 2002a.
- MELO, V.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; NOVAIS, R.F.; SINGH, B. & FONTES, M.P.F. Potassium and magnesium in clay minerals of some Brazilian soil as indicated by a sequential extraction procedure. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 33:2203-2225, 2002b.
- MOURA FILHO, W. Studies of a Latosol Roxo (Eutrustox) in Brazil: clay mineralogy, micromorphology effect on ion release, and phosphate reactions. Raleigh, North Carolina State University, 1970. 57p. (Tese de Doutorado)
- NETTO, A.R. Influência da mineralogia da fração argila sobre propriedades físico-químicas de solos brasileiros. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1996. 144p. (Tese de Mestrado)
- NORRISH, K. & TAYLOR, M. The isomorphous replacement of iron by aluminium in soil goethites. *J. Soil Sci.*, 12:294-306, 1961.
- PAVAN, M.A.; BLOCH, M.F.; ZEMPULSKI, H.C.; MIYAZAWA, M. & ZOCOLER, D.C. Manual de análise química de solo e controle de qualidade. Londrina, IAPAR, 1992. 39p. (Circular nº 76)
- RADAMBRASIL, PROJETO. Levantamento de recursos naturais. Ministério das Minas e Energia, Secretaria Geral, Programa de Integração Regional. Folha SE 22 Goiânia. Rio de Janeiro, RJ, 1983. v.3
- REBERTUS, R.A.; WEED, S.B. & BUOL, S.W. Transformations of biotite to kaolinite during saprolite-soil weathering. *Soil Sci Soc. Am J.*, 50:810-819, 1986.
- RICHARDS, J.E.; BATES, T.E. & SHEPPARD, S.C. Studies on the potassium-supplying capacities of Southern Ontario soils. I - Field and greenhouse experiments. *Can. J. Soil Sci.*, 68:183-197, 1988.
- SCHWERTMANN, U. & KÄMPF, N. Properties of goethite and hematite in kaolinitic soils of Southern and Central Brazil. *Soil Sci.*, 139:344-350, 1985.
- SINGH, B. & GILKES, R.J. Properties of soil kaolinites from south-western Australia. *J. Soil Sci.*, 43:645-667, 1992.
- SONG, S.K & HUANG, P.M. Dynamics of potassium release from potassium-bearing minerals as influenced by oxalic and citric acids. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:383-390, 1988.
- SPARKS, D.L. Potassium dynamics in soils. New York, Springer-Verlag, 1987. 63p. v.6
- WADA, K. & KAKUTO, Y. Nonexchangeable potassium in a 1,4 - nanometer mineral and mica in a Korean Ultisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:552-557, 1993.

