

SEÇÃO II - QUÍMICA E MINERALOGIA DO SOLO

TRANSFORMAÇÕES MINERALÓGICAS AO LONGO DE PERFIS DE ALTERAÇÃO PEDOGENÉTICA NA REGIÃO DE LAVRAS (MG)⁽¹⁾

M. P. C. LACERDA⁽²⁾, H. ANDRADE⁽³⁾ & J. J. G. QUÉMÉNEUR⁽⁴⁾

RESUMO

Na região de Lavras (MG), realizou-se a avaliação das transformações mineralógicas ao longo da alteração pedogenética em perfis de solos, discriminados pela composição geoquímica ácida, intermediária e básica do material de origem. Os solos com horizonte B textural foram selecionados para tal estudo, sendo escolhidas as seguintes classes destes solos: Perfil 1 - Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd), originado por alteração de rochas do Domínio geológico Granito de Itutinga; Perfil 2 - Argissolo Vermelho eutrófico (PVe), desenvolvido a partir de rochas do Domínio geológico Diorito do Rosário, e Perfil 3 - Chernossolo Argilúvico férrico (MTf), evoluído a partir de rochas do Domínio geológico *Greenstone-belt* de Lavras. Ao longo de cada perfil, desde a rocha fresca até o sólum, realizaram-se análises microscópicas para avaliar os processos de alteração, mediante evolução das reações de transformação mineralógica, com auxílio da difração de raios-X na identificação da mineralogia da fração argila. O estudo permitiu elaborar a ordem de destruição intempérica dos minerais primários e conseqüente formação da mineralogia do solo, estabelecendo-se reações de transformações mineralógicas e caracterização dos processos atuantes ao longo da evolução da alteração pedogenética, assim como suas relações com o material de origem. As reações de transformação mineralógica esquematizadas indicam que, nos Argissolos estudados, os minerais primários foram alterados para caulinita, gibbsita e sesquióxidos de ferro, acrescentando-se sesquióxidos de titânio e vermiculita com hidróxi entre camadas no caso do PVe. Persistiram como resíduos o quartzo e o feldspato potássico, este último apenas no PVAd. Já no Chernossolo avaliado, as alterações originaram talco, esmectita, caulinita e sesquióxidos de ferro e titânio, não havendo minerais primários residuais.

Termos de indexação: microscopia ótica, mineralogia do solo, difração de raios-X, solos com horizonte B textural.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado apresentada pela primeira autora ao Curso de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras - DCS-UFLA. Recebido para publicação em janeiro de 2000 e aprovado em junho de 2001.

⁽²⁾ Pesquisadora recém-doutora-FAPEMIG na Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais - EPAMIG/CTSM. Campus da UFLA - Caixa postal 176, CEP 37200-000 Lavras (MG). E-mail: marilusa@ufla.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: handrade@ufla.br

⁽⁴⁾ Professor do Departamento de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais - DG/IGC/UFMG. Av. Antônio Carlos, 6.627, Caixa postal 2.608, CEP 31270-901 Belo Horizonte (MG). E-mail: joeljean@igc.ufmg.br

SUMMARY: *MINERALOGIC TRANSFORMATIONS ALONG PROFILES OF PEDOGENETIC ALTERATION IN THE REGION OF LAVRAS (MG)*

This work aimed to evaluate mineralogic transformations along pedogenetic alterations of soil profiles in the region of Lavras; Minas Gerais, Brazil, differentiated by acid, intermediate and basic geochemical composition of the parent material. Three profiles were selected: Profile 1 - Hapludult developed from granitic rocks (Granite from Itutinga); Profile 2 - Rhodudalf formed from dioritic rocks (Diorite from Rosário); and Profile 3 - Argiudoll formed from basic rocks of the Greenstone-Belt of Lavras. Along each soil profile, from the consolidated bedrock to the solum, microscopic analyses were carried out, clay mineralogy characterized and weathering reactions evaluated by means of X-ray diffraction analyses in order to understand soil formation processes. The weathering destruction order of primary minerals and consequent formation of soil mineralogy, were assessed characterizing the pedogenetic processes as well as their relationships with the parent materials. The mineralogic transformation reactions indicated that in profiles 1 and 2 the primary minerals were weathered to kaolinite, gibbsite and iron oxides, with titanium oxides and hydroxy interlayered vermiculite, in the case of profile 2, with quartz and potassic feldspar persisting as residues, the latter only in profile 1. In profile 3, weathering processes originated talcum, smectite, kaolinite, iron and titanium oxides, without any primary mineral residues.

Index terms: optical microscopy, soil mineralogy, X-ray diffraction, soils with argillic horizons.

INTRODUÇÃO

A alteração pedogenética resulta de variações físico-químicas e biológicas do meio. Minerais constituintes das rochas, que se formaram sob condições magmáticas, hidrotermais, metamórficas ou sedimentares, são considerados potencialmente instáveis quando expostos às condições atmosféricas. São vulneráveis ao ataque por água, oxigênio e dióxido de carbono e as reações, que são predominantemente exotérmicas, processam-se espontaneamente. A água penetra nos poros, nos planos de clivagens e em outras microfissuras dos minerais, dissolvendo os constituintes solúveis. Com a evolução do processo, o "resíduo" torna-se progressivamente enriquecido pelos constituintes menos solúveis, formados pelos grupos -O e -OH. A posterior cristalização desses "resíduos" resulta na formação de novas fases minerais, que serão mais estáveis nas novas condições prevalentes, constituindo, assim, os minerais dos solos (Loughnan, 1969).

A hidrólise destaca-se dentre as reações de intemperização química dos minerais, promovendo a decomposição de minerais silicatados, tais como: feldspatos, piroxênios, anfibólios, biotita e outros presentes na maioria das rochas da crosta terrestre. O grau de intemperização dos minerais silicatados geralmente segue a seqüência estabelecida por Goldich (1938), dependendo das condições de alteração do meio.

A hidrólise é consequência da dissociação parcial da água em íons H^+ e OH^- , processando-se principalmente nos silicatos complexos de Ca, Mg, K, Na, Al e Fe, liberando bases e H_4SiO_4 , ácido muito fraco (Krauskopf, 1972). Conforme a intensidade, a hidrólise pode ser considerada em três níveis designados de modelos de processos de formação de argilominerais: (1) Dessilicatização limitada - Bissialitização: a quantidade de sílica no sistema permite a formação de argilominerais 2:1; (2) Dessilicatização moderada - Monossialitização: condições que propiciam a formação de argilominerais 1:1 (caulinita); e (3) Dessilicatização completa - Alitização: apenas o Al permanece no sistema, com a formação de gibbsite.

Os minerais constituintes das rochas e suas reações de transformação podem ser bem avaliados por intermédio da microscopia ótica. Nos solos, no entanto, os constituintes minerais de fração granulométrica menor que silte apresentam identificação dificultada, até mesmo ao microscópio petrográfico, em função do seu tamanho. Em auxílio à caracterização mineralógica, deve-se, então, recorrer a métodos de análise mineral mais sensíveis, como a difração de raios-X.

Objetivando estudar a alteração mineral durante a pedogênese, realizou-se a caracterização mineralógica, mediante microscopia ótica e difração de raios-X, em perfis de classes distintas de solos com horizonte B textural, individualizados a partir da discriminação geoquímica ácida, intermediária e

básica dos materiais de origem, caracterizando-se as transformações mineralógicas e os processos pedogenéticos atuantes ao longo da evolução da alteração de cada perfil estudado.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram selecionados perfis de classes de solos com horizonte B textural mais significativas e representativas da região de Lavras (MG), desenvolvidos a partir de materiais geológicos litoquimicamente distintos: Perfil 1 - Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd), desenvolvido a partir de rochas granitóides de composição granítica (rocha ígnea de composição ácida, teor de $\text{SiO}_2 > 66\%$) do Domínio geológico intitulado de Granito de Itutinga (Quéméneur, 1995; Lacerda, 1999); Perfil 2 - Argissolo Vermelho eutrófico (PVe), formado a partir de intemperização de diorito milonitizado (rocha ígnea de composição intermediária, com 55 a 66% de SiO_2) do Domínio geológico denominado Diorito do Rosário (Quéméneur, 1995; Lacerda, 1999), e Perfil 3 - Chernossolo Argilúvico férrico (MTf), tendo como material de origem um piroxenito granulitizado (rocha ígnea básica com teor de SiO_2 entre 45 a 55%) do Domínio geológico *Greenstone-belt* de Lavras (Quéméneur, 1995; Lacerda, 1999).

Esses solos desenvolveram-se na região em relevo ondulado a forte ondulado, originando distintas classes de solo com horizonte B textural, de acordo com o tipo de material originário, discriminado petrológica e geoquimicamente.

A amostragem foi realizada nas rochas e seus diferentes estádios de alteração e os solos sobre elas desenvolvidos, individualizados em seus horizontes, constituindo o material deste trabalho.

Os solos com horizonte B textural foram escolhidos de acordo com o seu grau de evolução, que permite, na região em epígrafe, o desenvolvimento "*in situ*" de perfis com exposição da rocha fresca de origem até o solum, além de preservarem características químicas e mineralógicas das rochas originais.

Até o momento, a correlação regional de solos com horizonte B textural com rochas básicas e ultrabásicas (teor de $\text{SiO}_2 < 45\%$) era o Nitossolo Vermelho distroférico ou eutroférico. No entanto, durante as investigações de perfis dessa classe de solo, foi constatada a ocorrência inédita de Chernossolo Argilúvico férrico, que, por este motivo, foi selecionado para o estudo.

A localização dos perfis estudados encontra-se ilustrada na figura 1. Suas coordenadas geográficas são: Perfil 1 - Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico: $44^\circ 35' 28''$ W e $21^\circ 17' 50''$ S; Perfil 2 - Argissolo Vermelho eutrófico: $44^\circ 53' 00''$ W e $21^\circ 16' 38''$ S, e Perfil 3 - Chernossolo Argilúvico férrico: $45^\circ 02' 56''$ W e $21^\circ 11' 00''$ S.

A partir de expedições de campo, observando a correlação entre material de origem e classes de solo formadas, obedecendo ao tipo de relevo estabelecido para a formação de solos com horizonte B textural na região, foi realizada a seleção dos perfis de alteração e sua amostragem, segundo critérios adotados em Lemos & Santos (1984). A área foi percorrida intensivamente, a fim de se encontrarem perfis com exposição das rochas frescas ou inalteradas de

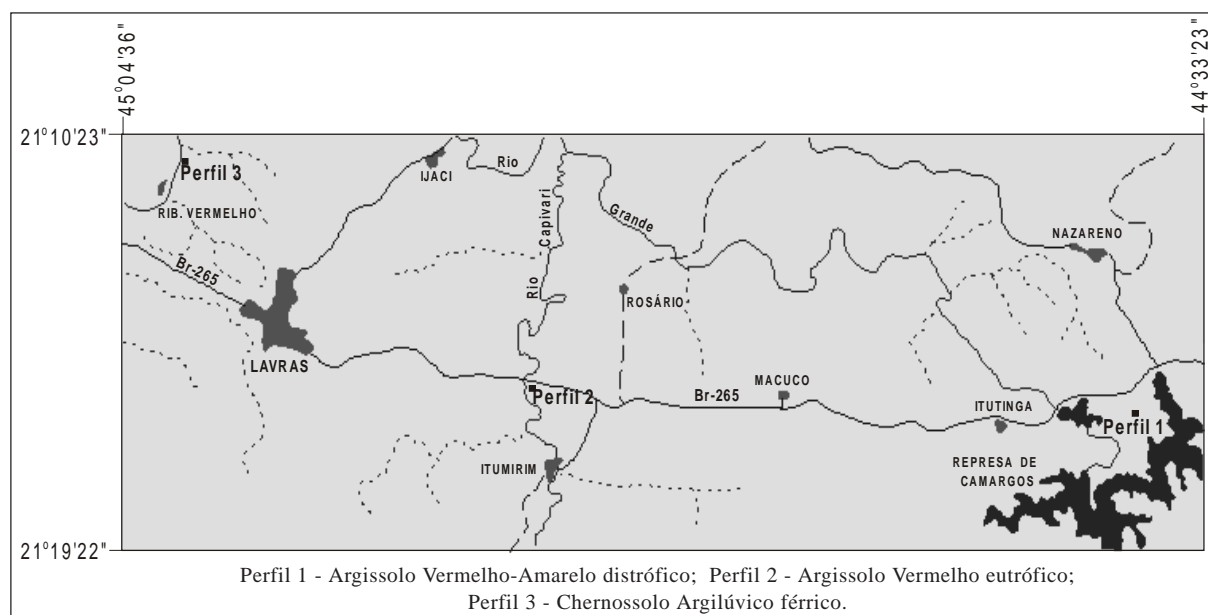


Figura 1. Localização dos perfis estudados.

origem, horizonte C representativo das diversas fases de alteração, além do horizonte B_t diagnóstico das classes distintas de solo com horizonte B textural estudadas.

Para as determinações mineralógicas, foram coletadas cerca de 0,5 kg de material ao longo dos horizontes de cada perfil. Para as análises microscópicas, procurou-se coletar amostras representativas desde a rocha fresca até o sólum, com base em observações dos estádios de alteração, tais como: características texturais preservadas das rochas originais, composição mineralógica original, coloração, friabilidade e características morfológicas do sólum. As amostras indeformadas de solo foram acondicionadas em recipientes de plástico de 10 x 7 cm, em substituição às caixas de Kubiena. As amostras de rocha foram, também, criteriosamente selecionadas e coletadas, incluindo exemplares frescos e alterados.

As amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas e passadas em tamiz de 2 mm de malha, sendo, então, designadas de Terra Fina Seca ao Ar (TFSA). As amostras indeformadas foram armazenadas para secagem ao ar.

Ao longo dos perfis de alteração, a distribuição de amostras, desde a rocha fresca de origem até o sólum, para análises mineralógicas e microscópicas, encontra-se sumariada no quadro 1.

Análises mineralógicas

Para a realização das análises mineralógicas, primeiramente foi feita a individualização das frações areia - silte - argila a partir da TFSA, após dispersão química com NaOH 0,1 mol L⁻¹ e dispersão mecânica a partir de agitação lenta em garrafas de Stohman por quatro horas no agitador Wiegner (Day, 1965). O fracionamento das amostras foi realizado por peneiragem úmida em tamiz de 0,053 mm de malha, separando-se a fração areia. As frações silte e argila foram individualizadas por decantação e centrifugação, obedecendo à lei de Stokes.

Difração de raios-X

Para a análise de difração de raios-X da fração argila, foram confeccionadas lâminas orientadas com os seguintes materiais:

- Argila sem tratamento prévio
- Argila desferrificada - Remoção dos óxidos de Fe pelo método DCB - ditionito-citrato-bicarbonato de sódio, segundo Mehra & Jackson (1960)
- Argila desferrificada e saturada com K⁺ e Mg²⁺ - A saturação de K⁺ e Mg⁺ foi feita por solução de KCl 1 mol L⁻¹ e MgCl₂ 1 mol L⁻¹, respectivamente, segundo método descrito em Whittig & Allardice (1986). As lâminas com argila saturada com K⁺ foram submetidas à difratometria de raios-X à temperatura ambiente (25°C - condição natural) e aquecidas a 550°C. Quando necessário, foi adicionado glicerol à argila saturada com Mg²⁺.

Inicialmente, caracterizou-se a mineralogia da fração argila ao longo dos perfis 1, 2 e 3, por meio da análise de difração de raios-X das lâminas da fração argila sem tratamento prévio. Posteriormente, foram analisadas lâminas orientadas de argila desferrificada, correspondentes a todos os horizontes de cada perfil. Partindo da análise desses difratogramas, foram selecionadas amostras de cada perfil, para realização de tratamentos em auxílio à identificação mineralógica, donde as amostras selecionadas foram: Perfil 1: amostra 1BC; Perfil 2: amostras 2A e 2C₂, e Perfil 3: amostras 3B e 3C₃. Estas amostras foram, então, posteriormente analisadas na seguinte ordem: argila desferrificada saturada com K⁺ em temperatura natural (25°C); argila desferrificada saturada com K⁺ aquecida a 550°C e argila desferrificada saturada com Mg²⁺ e glicolada.

A difração de raios-X da fração argila sem tratamento prévio foi analisada no Centro de Pesquisas Manoel Teixeira da Costa - Instituto de

Quadro 1. Distribuição de amostras ao longo dos perfis de alteração

Perfil 1 - PVAd			Perfil 2 - PVe			Perfil 3 - MTf		
Amostra	Material/horizonte	Profundidade	Amostra	Material/horizonte	Profundidade	Amostra	Material/horizonte	Profundidade
		cm			cm			cm
1A	Solo/A	0-55	2A	Solo/A	0-20	3A	Solo/A	0-18
1B	Solo/B _t	55-95	2B	Solo/B _t	20-80	3B	Solo/B _t	18-55
1BC	Solo/BC	95-130	2BC	Solo/BC	80-130	3BC	Solo/BC	55-85
1C ₁	Alterito/C ₁	130-210	2C ₁	Alterito/C ₁	130-260	3C ₁	Alterito/C ₁	85-120
1C ₂	Alterito/C ₂	210+	2C ₂	Alterito/C ₂	260-430	3C ₂	Alterito/C ₂	120-230
			2C ₃	Alterito/C ₃	260-430	3C ₃	Alterito/C ₃	230+
1R ₁	Rocha alterada		2R ₁	Rocha alterada	430+	3R ₁	Rocha alterada	
1R	Rocha fresca (granitóide)		2R	Rocha fresca (diorito milonitizado)		3R	Rocha fresca (piroxenito granulitizado)	

Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais - CPMTC/IGC/UFGM. A análise das amostras da fração argila desferriçada foi efetuada no Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, utilizando-se intervalo de irradiação de 2θ de 5° a 50° , com tubo de Fe.

As amostras selecionadas da fração argila desferriçada com os diversos tratamentos foram analisadas no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, utilizando intervalo de irradiação de 2θ de 5° a 30° , com repetição da análise das amostras glicoladas no intervalo de 2θ de 1° a 10° e, no caso das amostras aquecidas a 550°C , o intervalo de 2θ utilizado foi de 2° a 32° , com tubo de Cu e filtro de Ni.

A interpretação dos difratogramas de raios-X foi realizada segundo Brown (1961), Grim (1968) e JCPDS (1974).

Análises microscópicas

A partir das amostras correspondentes às rochas frescas e ligeiramente alteradas e das amostras indeformadas de solo, foram confeccionadas lâminas delgadas, após impregnação com araldite. A análise microscópica foi realizada em microscópio petrográfico no DCS/UFLA. Por meio da microscopia ótica, determinou-se a assembléia mineralógica essencial, secundária e acessória dos fácies rocha fresca e rocha alterada, assim como os constituintes

minerais em frações granulométricas maiores que silte nas amostras indeformadas dos solos (composição mineralógica do esqueleto e constituintes do plasma identificáveis ao microscópio petrográfico), além da identificação de sesquióxidos de ferro e titânio no esqueleto e plasma.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Mineralogia da fração argila

A mineralogia da fração argila desferriçada ao longo dos perfis 1, 2 e 3 foi caracterizada a partir das diversas análises de difração de raios-X realizadas. Os difratogramas correspondentes às lâminas orientadas de argila desferriçada de todos os horizontes de cada perfil estão apresentados nas figuras 2, 3 e 4. Os difratogramas das análises das amostras selecionadas de cada perfil (perfil 1: amostra 1BC; perfil 2: amostras 2A e 2C₂ e perfil 3: amostras 3B e 3C₃), com os diversos tratamentos em auxílio à identificação mineralógica, ou seja: argila desferriçada saturada com K⁺ em temperatura natural - 25°C (K 25°C); argila desferriçada saturada com K⁺ aquecida a 550°C (K 550°C); argila desferriçada saturada com Mg²⁺ e glicolada (Mg⁺ glicerol), encontram-se representados nas figuras 5, 6, 7, 8 e 9.

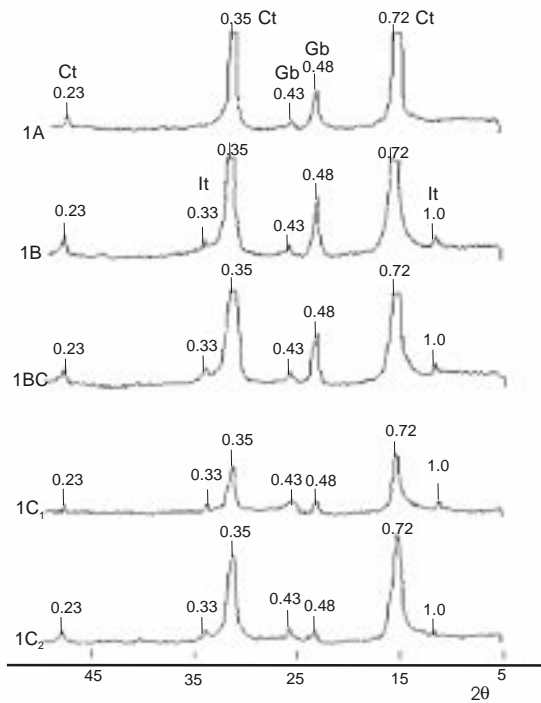


Figura 2. Difratogramas de raios-X da fração argila desferriçada para o perfil 1 - PVA (espaçamento d em nm) (Ct = caulinita, Gb = gibbsita e It = illita).

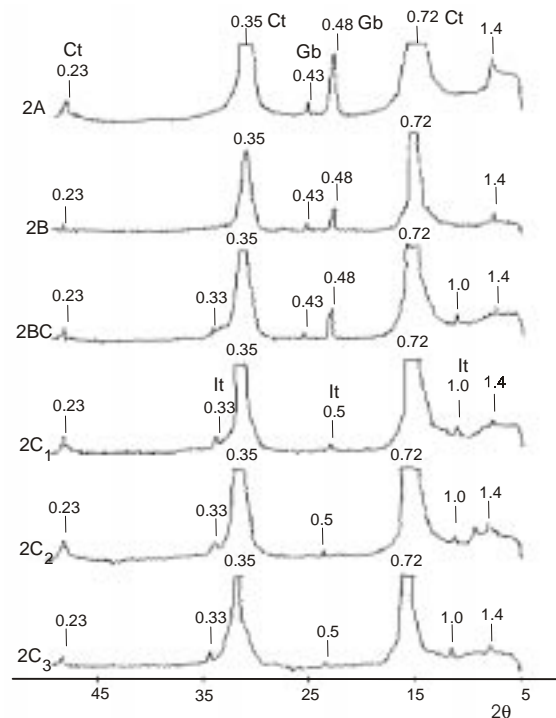


Figura 3. Difratogramas de raios-X da fração argila desferriçada para o perfil 2 - PVe (espaçamento d em nm) (Ct = caulinita, Gb = gibbsita e It = illita).

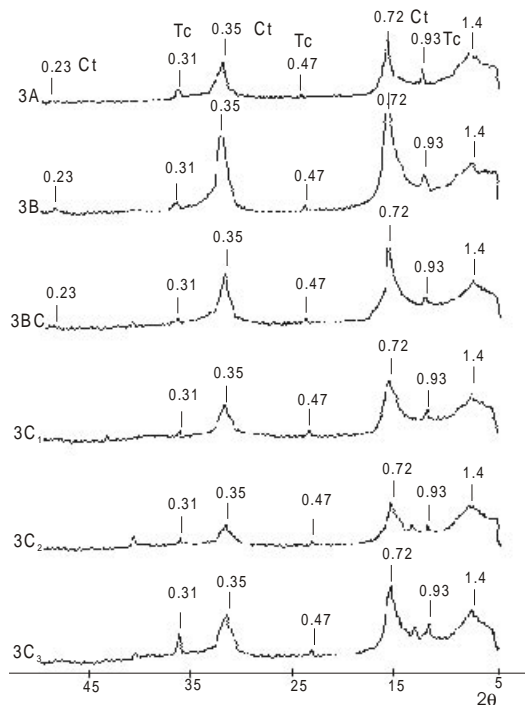


Figura 4. Difratogramas de raios-X da fração argila desferrificada para o perfil 3 - MTF (espaçamento d em nm) (Ct = caulinita, Tc = talco).

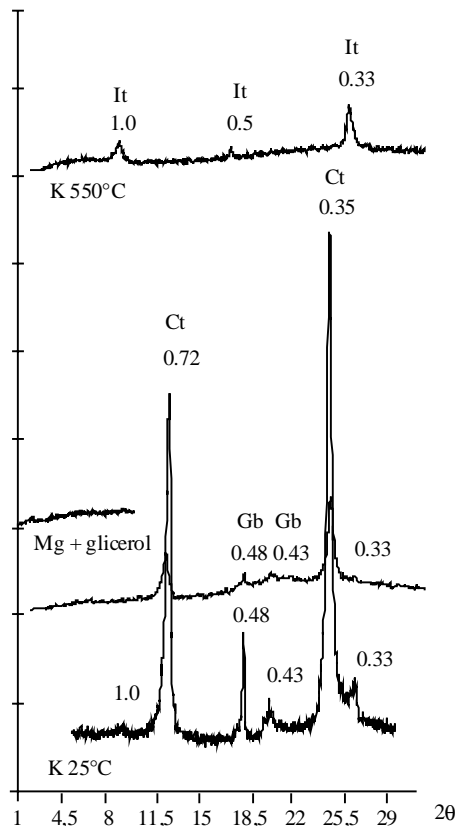


Figura 5. Difratogramas de raios-X da amostra 1BC (Perfil 1 - PVAd) com os diversos tratamentos. Espaçamento d em nm (It = illita, Ct = caulinita, Gb = gibbsita).

O quadro 2 apresenta a caracterização da mineralogia da fração argila desferrificada ao longo dos horizontes dos perfis estudados, ou seja: perfil 1 - Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd); perfil 2 - Argissolo Vermelho eutrófico (PVe), e perfil 3 - Chernossolo Argilúvico férrico (MTf).

A caulinita foi caracterizada pelos picos nas regiões de 0.72, 0.35 e 0.23 nm, que desapareceram nas amostras aquecidas a 550°C. No perfil 1 (PVAd), a caulinita encontra-se associada à gibbsita ao longo de todo o perfil e illita nos horizontes C, BC e B_t. Acompanhando a caulinita, no perfil 2 (PVe), verificou-se a ocorrência de vermiculita com hidróxi nas entrecamadas ao longo de todo o perfil, illita nos horizontes C e BC e gibbsita nos horizontes BC, B_t e A. Já no perfil 3 (MTf), a associação da caulinita foi com talco e esmectita.

A illita 1 M foi identificada nos perfis 1 (PVAd) e 2 (PVe) pelos picos nas regiões de 1.0, 0.5 e 0.33 nm, que não se alteraram nos diversos tratamentos. A gibbsita apresentou picos de 0.48 e 0.43 nm, que desapareceram nas amostras aquecidas a 550°C, tendo sido o primeiro geralmente mascarado pelo pico correspondente da illita.

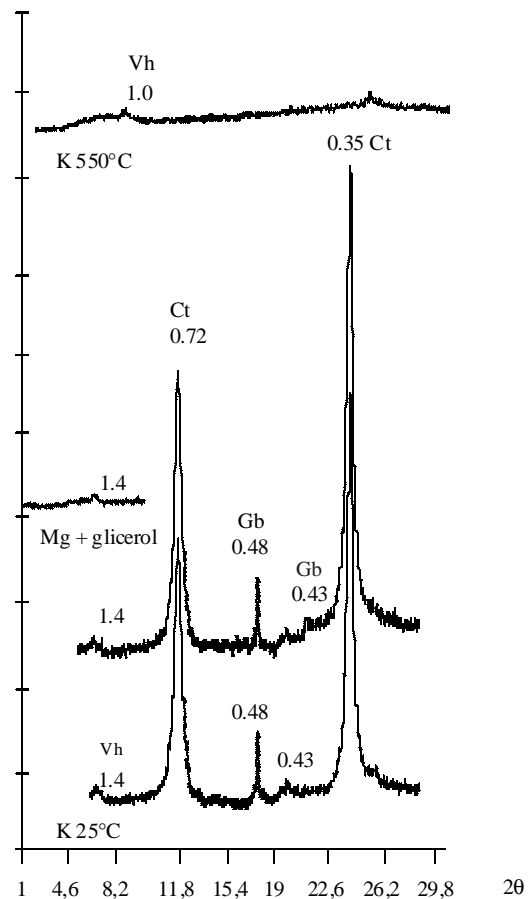


Figura 6. Difratogramas de raios-X da amostra 2A (Perfil 2 - PVe) com os diversos tratamentos. Espaçamento d em nm (Vh = vermiculita com hidróxi entrecamadas, Ct = caulinita, Gb = gibbsita).

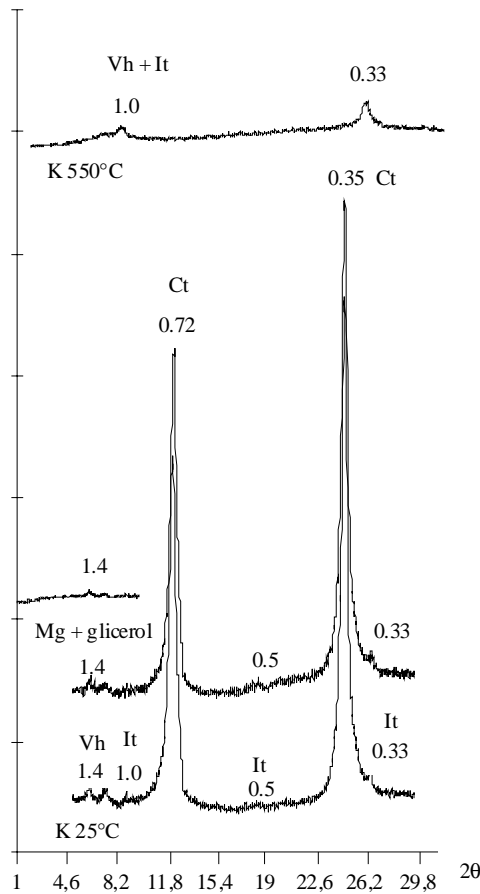


Figura 7. Difratogramas de raios-X da amostra 2C₂ (Perfil 2 - PVe) com os diversos tratamentos. Espaçamento d em nm (Vh = vermiculita com hidróxi entrecamadas, Ct = caulinita, It = illita).

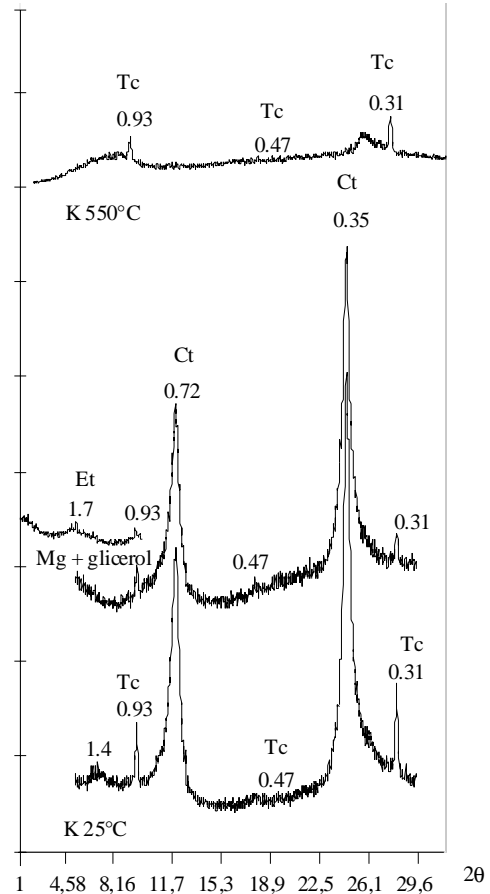


Figura 8. Difratogramas de raios-X da amostra 3B (Perfil 3 - MTF) com os diversos tratamentos. Espaçamento d em nm (Ct = caulinita, Tc = talco, Et = esmectita).

Quadro 2. Mineralogia da fração argila desferrificada para os perfis 1, 2 e 3

Perfil 1 - PVAd		Perfil 2 - PVe		Perfil 3 - MTF	
Amostra	Mineralogia da fração argila desferrificada ⁽¹⁾	Amostra	Mineralogia da fração argila desferrificada	Amostra	Mineralogia da fração argila desferrificada
1A	Ct - Gb	2A	Ct - Gb - Vh	3A	Ct - Tc - Et
1B	Ct - Gb - It	2B	Ct - Gb - Vh	3B	Ct - Tc - Et
1BC	Ct - Gb - It	2BC	Ct - It - Vh - Gb	3BC	Ct - Tc - Et
1C ₁	Ct - Gb - It	2C ₁	Ct - It - Vh	3C ₁	Ct - Tc - Et
1C ₂	Ct - Gb - It	2C ₂	Ct - It - Vh	3C ₂	Ct - Tc - Et
		2C ₃	Ct - It - Vh	3C ₃	Ct - Tc - Et

⁽¹⁾ Ct = caulinita, Gb = gibbsita, Vh = vermiculita com hidróxi nas entrecamadas, It = illita, Tc = talco e Et = esmectita.

A illita e outras micas ocorrem geralmente nos horizontes mais profundos, porque a maioria pode ser herdada do material de origem (Fannings & Keramidas, 1977). Com o progresso do intemperismo,

elas se alteram geralmente na seguinte seqüência: mica ⇒ illita ⇒ illita expandida ⇒ vermiculita ⇒ esmectita ⇒ caulinita ⇒ gibbsita (Moniz, 1972; Krauskopf, 1972), podendo passar diretamente à

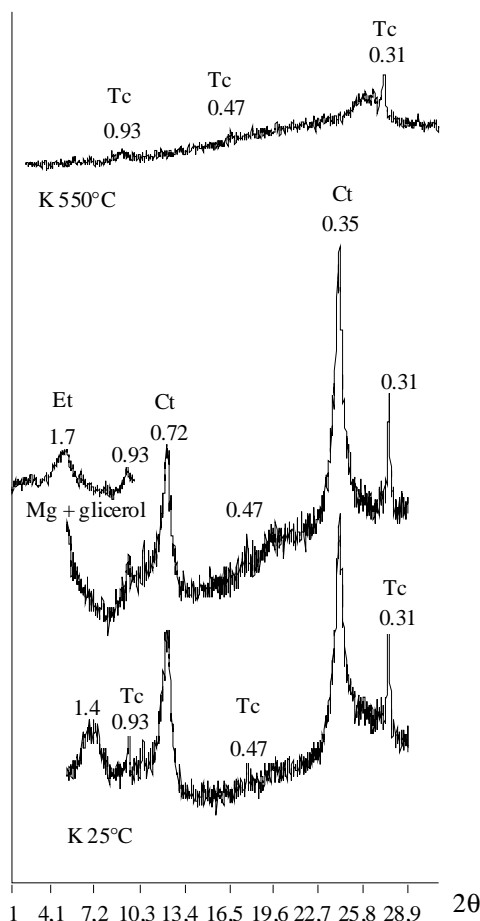


Figura 9. Difratomogramas de raios-X da amostra 3C₃ (Perfil 3 - MTf) com os diversos tratamentos. Espaçamento d em nm (Ct = caulinita, Tc = talco, Et = esmectita).

caulinita ou até mesmo à gibbsita, dependendo das condições de hidrólise.

A vermiculita com hidróxi nas entrecamadas foi identificada no perfil 2 (PVe) pelos picos na região de 1.4 nm, os quais foram deslocados para a região de 1.0 nm, quando as amostras foram aquecidas, formando uma banda de difração. Ocorreram em todo o perfil 2, podendo resultar da degradação da clorita ou da deposição de hidróxidos nas entrecamadas das argilas expansivas (Barnhisel, 1977). Esse argilomineral com hidróxidos interlamelares (cloritizados) foi mais resistente, persistindo nos solos mesmo em condições de intemperismo intenso, e o efeito "anti-gibbsítico" retardou o processo, não permitindo que os solos atingissem estádios mais avançados de intemperismo (Jackson, 1965).

A esmectita foi identificada no perfil 3 (MTf) pelos picos na região de 1.4 nm, que se expandiram a 1.7 nm, formando banda de difração nas amostras saturadas com Mg + glicerol. Em geral, as esmectitas são produtos de transformação de micas, seguindo

uma seqüência que compreende mica hidratada ou hidromica, illita e vermiculita, vermiculitas e cloritas máficas, sendo sua formação favorecida em ambientes de solo com drenagem restrita ou não, desde que haja suprimento de soluções ricas em Si, Al, Mg, Fe e lixiviação mínima - bissialitização. Com o aumento da taxa de lixiviação e dessilicização, as esmectitas originam caulinita e óxidos de ferro, passando por um estágio intermediário com caulinita-esmectita interestratificada (Pedro, 1979; Herbillon, 1980).

O talco foi caracterizado no perfil 3 (MTf) pelos picos 0.93, 0.31 e 0.47 nm, que não sofreram alteração com os tratamentos efetuados. O talco é produto de alteração em altas temperaturas de rochas básica-ultrabásicas, sendo geralmente herdado do material originário (Oliveira, 1980).

A ocorrência dos sesquióxidos de ferro e titânio foi constatada por meio da microscopia ótica e confirmada por meio da análise de difração de raios-X da fração argila sem tratamento prévio, que determinou, entre os sesquióxidos de ferro, a predominância de hematita e goethita.

Transformações mineralógicas

O perfil 1 - Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico evolui a partir da alteração de rocha de composição granítica, relativa ao Domínio geológico Granito de Itutinga, segundo Quéméneur (1995) e Lacerda (1999). As amostras 1R, que representam o fácies rocha fresca, microscopicamente mostram mineralogia essencial constituída por 30% de feldspato potássico (microclina, ortoclásio e feldspato perítico), 35% de plagioclásio e 25% de quartzo, com 5% de biotita ± anfibólio relictual da série hornblenda-edenita. A mineralogia secundária perfaz 5%, incluindo biotita, epidoto da série zoisita-pistacita e zoisita-clinozoisita, mica-branca/sericita, carbonato, titanita + óxidos de titânio, clorita e óxidos/hidróxidos de ferro. Na mineralogia acessória, observam-se zircão e allanita.

O perfil 2 - Argissolo Vermelho eutrófico desenvolve-se a partir de rochas do Domínio geológico Diorito do Rosário, segundo Quéméneur (1995) e Lacerda (1999). O fácies rocha fresca, representado pela amostra 2R, apresenta microscopicamente mineralogia essencial constituída por plagioclásio (40%); anfibólio da série hornblenda-edenita (20%); quartzo (8%) e traços de feldspato potássico. A mineralogia secundária, originada por reações mineralógicas retrógradas, possivelmente de origem hidrotermal/retrometamórfica, perfaz 31% da composição mineralógica total, composta por epidoto da série zoisita-pistacita (15%), biotita (5%), titanita (5%), sericita (5%) e clorita (1%). A mineralogia acessória apresenta cristais de zircão, apatita e minerais opacos (óxidos de ferro e óxidos de titânio).

O perfil 3 – Chernossolo Argilúvico férrico desenvolve-se a partir de rochas do Domínio geológico *Greenstone-belt* de Lavras, segundo Quéméneur (1995) e Lacerda (1999). A amostra 3R representa o fácies rocha fresca desse perfil, apresentando microscopicamente mineralogia essencial constituída por clinopiroxênio da série diopsídio-augita (30%), anfibólio da série hornblenda-edenita (30%), plagioclásio (35%) e traços de quartzo. A mineralogia secundária, originada por reações mineralógicas retrógradas (retrometamórficas) representa 5%, sendo formada principalmente por anfibólios da série tremolita-actinolita/uralita e traços de sericita, óxidos/hidróxidos de ferro e titânio. Cristais isolados de apatita e opacos (óxidos de ferro e titânio) representam a mineralogia acessória.

Durante a evolução da alteração pedogenética, as transformações mineralógicas verificadas a partir da análise microscópica, com auxílio à difração de raios-X, para a caracterização da mineralogia da fração argila, foram esquematizadas por meio de reações, descritas a seguir para os três perfis estudados.

Perfil 1 – Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd)

Nas reações esquematizadas para o perfil 1, **(1)** indica a fase de alteração mineralógica retrógrada de origem retrometamórfica ou hidrotermal, ainda no fácies rocha fresca; **(2)** indica a fase de alteração do fácies rocha fresca para o fácies alterito ou horizontes C, perpetuando-se até o fácies sólum – horizonte B_t; **(3)** representa a fase de alteração mineralógica do horizonte B_t ao horizonte A.

Feldspato potássico **(1)** ⇒ Sericita **(2)** ⇒ Illita ±⁽⁵⁾ Caulinita ± Gibbsita **(3)** ⇒ Caulinita ± Gibbsita

Plagioclásio **(1)** ⇒ Sericita ± Epidoto (zoisita-clinozoisita)⁽⁶⁾ – Carbonato **(2)** ⇒ Illita ± Caulinita ± Gibbsita **(3)** ⇒ Caulinita ± Gibbsita

[Anfibólio: Hornblenda-edenita]⁽⁷⁾ ± Biotita **(1)** ⇒ Biotita ± Epidoto (zoisita-pistacita) ± Mica branca (moscovita/sericita) ± Clorita - Titanita/Óxidos de titânio - Óxidos/Hidróxidos de ferro – Carbonato **(2)** ⇒ Illita ± Caulinita ± Gibbsita – Sesquióxidos de ferro (hematita/goethita) **(3)** ⇒ Caulinita ± Gibbsita – Sesquióxidos de ferro (hematita/goethita)

⁽⁵⁾ Nas reações e associações mineralógicas, os símbolos ± indicam quantidades variáveis; + indica quantidades subiguais; e - indica quantidades subordinadas dos minerais envolvidos.

⁽⁶⁾ Minerais entre parênteses especificando membros de uma série mineralógica indicam caracterização provável.

⁽⁷⁾ Minerais entre colchetes indicam ocorrência em cristais relictuais ao processo de alteração mineralógica.

Perfil 2 – Argissolo Vermelho distrófico (PVe)

Nas reações esquematizadas para este perfil, **(1)** indica a fase de alteração mineralógica, tal como descrita para o perfil 1; **(2)** indica a fase de alteração do fácies rocha fresca para o fácies alterito ou horizontes C; **(3)** a fase de alteração mineralógica do alterito para o fácies de transição ou horizonte BC, que se perpetua até o sólum.

Anfibólio: Hornblenda-edenita **(1)** ⇒ Biotita ± Epidoto (zoisita-pistacita) ± Clorita ± Titanita ± Óxidos de ferro e titânio **(2)** ⇒ Sericita/Illita ± Caulinita ± Vermiculita com hidróxi nas entrecamadas ± Sesquióxidos de ferro (hematita e goethita) e titânio **(3)** ⇒ Caulinita ± Gibbsita ± Vermiculita com hidróxi nas entrecamadas ± Sesquióxidos de ferro (hematita e goethita) e titânio

Plagioclásio **(1)** ⇒ Sericita ± Epidoto (zoisita-clinozoisita) **(2)** ⇒ Sericita/Illita ± Caulinita ± Vermiculita com hidróxi nas entrecamadas **(3)** ⇒ Caulinita ± Gibbsita

Perfil 3 – Chernossolo Argilúvico férrico

Neste perfil, nas reações esquematizadas de alteração mineralógica, **(1)** indica a mesma fase de alteração, tal como descrito para os perfis 1 e 2; **(2)** indica a fase de alteração do fácies rocha fresca para o fácies alterito ou horizontes C, perpetuando-se até o fácies sólum – horizonte A.

Clinopiroxênio: Diopsídio-augita **(1)** ⇒ Anfibólio: Hornblenda-edenita ± Óxidos/Hidróxidos de ferro e titânio - Tremolita-actinolita/Uralita **(2)** ⇒ Talco ± Esmectita ± Caulinita ± Sesquióxidos de ferro (hematita e goethita) e titânio

Plagioclásio **(1)** ⇒ Sericita (processo incipiente) **(2)** ⇒ Esmectita ± Caulinita

Opacos (óxidos de ferro e titânio) **(2)** ⇒ Sesquióxidos de ferro (hematita e goethita) e titânio

A partir destas reações esquematizadas de alteração mineralógica, verifica-se concordância com a ordem de destruição dos minerais silicatados definida na seqüência de grau de resistência ao intemperismo definida por Goldich (1938), para os três perfis analisados, onde as ordens de destruição dos minerais silicatados foram assim estabelecidas: Perfil 1 (PVAd): Anfibólio (Hornblenda-edenita) - Carbonato - Plagioclásio - Titanita - Epidoto/Clorita/Biotita - Moscovita - Sericita - Feldspato potássico; Perfil 2 (PVe): Anfibólio (Hornblenda-edenita) - Plagioclásio - Titanita - Clorita/Epidoto/Biotita - Sericita; e Perfil 3 (MTf): Clinopiroxênio: Diopsídio-augita - Anfibólio: Hornblenda-edenita - Anfibólio: Tremolita-actinolita/Uralita - Sericita - Plagioclásio. Estes resultados encontram-se coerentes com trabalhos afins realizados por diversos autores, citando-se, dentre outros, Cerri (1979), Oliveira (1980) e Menegotto & Gaspareto (1987).

No perfil 1 (PVAd), a evolução da mineralogia mostra atuação de hidrólise seletiva em relação ao grau de intemperização dos minerais, ou seja, mais pronunciada para o plagiocásio e biotita + cristais relictuais de anfibólio e menos para o feldspato potássico; no entanto, quando atuante, atinge a alitização já no alterito, marcada pela presença de gibbsita. A liberação de ferro é restrita, assim como o processo de ferruginização, sendo compatível com a pequena quantidade deste elemento na composição mineralógica da rocha original (Lacerda, 1999; Lacerda et al., 2000).

Para o perfil 2 (PVe), a evolução das transformações mineralógicas mostra hidrólise crescente dos minerais silicatados primários que se inicia com a bissialitização e monossilitização no alterito, evoluindo para a alitização no sólum, com liberação de Fe, dentre outros cátions, promovendo o processo de ferruginização ascendente. Esta evolução é decorrente da composição mineralógica e química da rocha originária, restando do processo de alteração somente o quartzo, mineral resistente ao intemperismo, cuja tendência é concentração na fração mais grosseira do solo, constituindo o esqueleto. Os demais minerais silicatados primários foram substituídos por minerais secundários de origem intempérica, basicamente argilominerais silicatados e sesquióxidos de alumínio e ferro (Lacerda, 1999; Lacerda et al., 2000).

Para o perfil 3 (MTf), os processos de substituição mineralógica mostram atuação de hidrólise dos minerais silicatados primários, com bissialitização e monossilitização, porém não atingindo a alitização. A hidrólise é rápida, com destruição de todos os minerais silicatados primários, porém de intensidade moderada, dado o excessivo suprimento de soluções ricas em Si^{4+} , Al^{3+} , Mg^{2+} e Fe^{2+} , proveniente dos cristais de clinopiroxênio e anfibólio, tal como discutido por Pedro (1979) e Herbillon (1980). A liberação do ferro por hidrólise e oxidação favorece o processo de ferruginização, crescente ao longo do perfil, favorecida pela composição mineralógica da rocha original, enriquecida neste elemento (Lacerda, 1999; Lacerda et al., 2000).

CONCLUSÕES

1. A análise microscópica e a difração de raios-X permitiram avaliar as composições mineralógicas das rochas de origem e a caracterização da mineralogia da fração argila ao longo dos perfis de alteração estudados, estabelecendo-se uma ordem de destruição intempérica dos minerais primários e consequente formação dos argilominerais.

2. Estabeleceram-se as relações entre o material de origem (composição mineralógica e química) e a evolução da alteração nos perfis estudados e esquematizaram-se as reações de transformações

mineralógicas, verificando-se os processos de alteração atuantes ao longo da evolução pedogenética, tais como hidrólise e ferruginização de minerais silicatados, desde a rocha fresca até o sólum.

3. As reações de transformação mineralógica esquematizadas indicam que nos Argissolos estudados, os minerais primários foram alterados para caulinita, gibbsita e sesquióxidos de ferro, acrescentando-se sesquióxidos de titânio e vermiculita com hidróxi entrecamadas no caso do PVe. Persistiram como resíduos o quartzo e feldspato potássico, este último apenas no PVAd. Já no Chernossolo avaliado, as alterações originaram talco, esmectita, caulinita e sesquióxidos de ferro e titânio, não havendo minerais primários residuais.

LITERATURA CITADA

- BARNHISEL, R.I. Chlorites and hydroxy interlayered vermiculite ad smectite. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. Minerals in soil environments. Madison, Soil Science Society of America, 1977. p.331-356.
- BROWN, G. The X-ray identification and crystal structure of clays minerals. London, London Mineralogical Society, 1961. 544p.
- CERRI, C.C. Alteração e pedogênese em áreas graníticas situadas sob diferentes condições bioclimáticas encontradas no Brasil. São Paulo, Universidade de São Paulo, 1979. 241p. (Tese de Doutorado)
- DAY, P.R. Particle fractionation and particle size analysis. In: BLACK, C.A., ed. Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Madison, American Society of Agronomy, 1965. p.545-566.
- FANNINGS, D.S. & KERAMIDAS, V.Z. Micas. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. Minerals in soil environments. Madison, Soil Science Society of Agronomy, 1977. p.195-258.
- GOLDICH, S.A. A study in rock-weathering. J. Geol., 46:17-23, 1938.
- GRIM, R.F. Clay mineralogy. 2.ed. New York, McGraw Hill, 1968. 596p.
- HERBILLON, A.J. Mineralogy of Oxisols and oxic materials. In: THENG, B.K.G., ed. Soil with variable charge. New Zealand Society Soil Science, 1980. p.109-126.
- JACKSON, M.L. Clay transformation in soil genesis during the Quaternary. Soil Sci., 99:15-22, 1965.
- JOINT COMMITTEE ON POWDER DIFFRACTION STANDARDS - JCPDS. Selected powder diffraction data for minerals. Pennsylvania, 1974. 833p.
- KRAUSKOPF, K.B. Introdução à geoquímica. São Paulo, Polígono, 1972. 2v.
- LACERDA, M.P.C. Correlação geo-pedológica em solos B texturais na região de Lavras, MG. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 1999. 257p. (Tese de Doutorado)

- LACERDA, M.P.C.; ANDRADE, H. & QUEMÉNEUR, J.J.G. Micropedologia da alteração em perfis de solos com B textural na região de Lavras, Minas Gerais. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:829-841, 2000.
- LEMO, R.C. & SANTOS, R.D. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 2ed. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1984. 45p.
- LOUGHNAN, F.C. Chemical weathering of the silicate minerals. New York, Elsevier, 1969. 154p.
- MEHRA, O.P. & JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clay Clay Miner.*, 7:317-327, 1960.
- MENEGOTTO, E. & GASPARETO, N.V.L. Intemperização de rochas vulcânicas básicas e ácidas na região de Santa Maria (RS). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 1., Porto Alegre, 1987. Anais. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Geoquímica, 1987. v.2. p.69-87.
- MONIZ, A.C. Elementos de pedologia. São Paulo, Polígono, 1972. 459p.
- OLIVEIRA, S.M.B. Alteração intempérica das rochas ultrabásicas de Santa Fé (GO) e gênese do depósito niquelífero. São Paulo, Universidade de São Paulo, 1980. 216p. (Tese de Doutorado)
- PEDRO, G. Caracterization générale des processus de l'alteration hydrolytique. *Sci. Soil*, 2:93-105, 1979.
- QUÉMÉNEUR, J.J.G. Os magmatismos de idade arqueana e transamazônica na região Campos das Vertentes (MG) (Sul do Cráton do São Francisco), com base em geoquímica e geocronologia. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 1995. 79p. (inédito)
- WHITTIG, L.D. & ALLARDICE, W.R. X-ray diffraction techniques. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.331-362.

