



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbccs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo  
Brasil

LACERDA, M. P. C.; ANDRADE, H.; QUÉMÉNEUR, J. J. G.  
PEDOGEOQUÍMICA EM PERFIS DE ALTERAÇÃO NA REGIÃO DE LAVRAS (MG). I - ELEMENTOS  
MAIORES - ÓXIDOS CONSTITUINTES

Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 26, núm. 1, 2002, pp. 75-85  
Sociedade Brasileira de Ciência do Solo  
Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180217643009>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

# PEDOGEOQUÍMICA EM PERFIS DE ALTERAÇÃO NA REGIÃO DE LAVRAS (MG). I - ELEMENTOS MAIORES - ÓXIDOS CONSTITUINTES<sup>(1)</sup>

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

## RESUMO

Na região de Lavras (MG), realizou-se a investigação do comportamento geoquímico ao longo dos processos de alteração e evolução pedológica em perfis de solos com horizonte B textural, discriminados pelo material de origem, individualizados em composição geoquímica ácida, intermediária e básica. Ao longo de cada perfil, realizaram-se análises geoquímicas de elementos maiores - óxidos constituintes, avaliando perdas e ganhos mediante o cálculo do balanço químico de massa. As interpretações dos dados geoquímicos nos três perfis estudados revelaram perda moderada de SiO<sub>2</sub>, lixiviação de bases e enriquecimento relativo discreto do Al, Fe e Ti, além de possibilitar o estabelecimento da ordem de perda desses constituintes.

**Termos de indexação:** solos com horizonte B textural, Argissolos, espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), espectroscopia de emissão atômica com plasma de acoplamento induutivo (ICP), balanço químico de massa, pedogênese.

**SUMMARY:** *PEDOGEOCHEMICAL IN ALTERATION PROFILES IN THE REGION OF LAVRAS, MINAS GERAIS. I - MAJOR ELEMENTS - MAIN OXIDES*

*The geochemical behavior in soil alteration profiles in Lavras (MG), Brazil, was evaluated during the process of soil formation leading to the formation of argillic horizons,*

<sup>(1)</sup> 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 dezembro de 2000 e aprovado em agosto de 2001.

<sup>(2)</sup> Professora da Faculdade de Agronomia e Veterinária da Universidade de Brasília – FAV/UnB. Campus Darcy Ribeiro - ICC Sul. Caixa Postal 04508, CEP 70910-970 Brasília (DF). E-mail: marilusa@unb.br

<sup>(3)</sup> 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

<sup>(4)</sup> 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 2608, CEP 31270-901 Belo Horizonte (MG).

*in parent material ranging from acid, intermediate to mafic geochemical composition. Along each profile, from the consolidated bedrock to the solum, geochemical analyses of major elements-main oxides were performed, calculating the gains and losses through a mass chemical balance. The results showed a moderate loss of SiO<sub>2</sub>, bases leaching, and a slight relative enrichment of Al, Fe and Ti. The leaching order of these elements from the alterites was also established.*

*Index terms:* argillitic horizon, ultisols, X-ray fluorescence spectrometry (XRF), Atomic emission spectroscopy with inductive coupled plasm (ICP), Chemical balance, pedogenesis.

## INTRODUÇÃO

A geoquímica de superfície e sua ramificação, denominada Pedogeocímica, reveste-se de grande importância no estudo da pedogênese, permitindo o entendimento dos processos de alteração que ocorrem ao longo da evolução pedológica, pois avaliam o comportamento dos elementos químicos, a partir da distribuição e migração destes elementos, e as reações químicas envolvidas ao longo do processo evolutivo, desde a rocha fresca até o sólum.

No ambiente natural de superfície crustal, as condições físico-químicas reinantes permitem a ação do intemperismo e, na maioria das vezes, o desenvolvimento de atividades de organismos vivos. Neste ambiente, as rochas primárias, formadas a temperaturas e pressões bem superiores, vão estar em permanente desequilíbrio, que se acentua quando entram em contato com as águas meteóricas, dando início ao processo de meteorização ou intemperismo, que vai permitir a pedogênese.

A meteorização de minerais primários libera cátions constituintes da estrutura dos minerais; entretanto, nem todos os cátions são solubilizados com a mesma intensidade. Alguns tendem a ser prontamente lixiviados pelas águas de percolação, enquanto outros são resistentes e tornam-se progressivamente concentrados no resíduo (Loughnan, 1969).

Várias tentativas têm sido feitas para determinar empiricamente a ordem de perda de constituintes ao longo do processo de alteração de rochas e da pedogênese. O trabalho pioneiro de Polynov (1937) comparou a composição média de matéria mineral dissolvida em rios e concentrados em bacias em áreas de rochas maciças, com a composição média de rochas ígneas, e obteve a seguinte ordem de perda de constituintes: Ca<sup>2+</sup> > Na<sup>+</sup> > Mg<sup>2+</sup> > K<sup>+</sup> > SiO<sub>2</sub> > Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Esta seqüência está de acordo com as seqüências clássicas de ordem de intemperização de minerais primários, obtidas por Goldich (1938), a partir de estudos da alteração de granito-gnaisse em Minnesota, e por Tyler (1958), citado por Loughnan (1969), a partir de alteração de material basáltico do Sul da Austrália.

Considerando os diversos fatores químicos envolvidos na meteorização de minerais primários, a extensão da alteração química e a natureza do produto residual formado irão depender do grau de lixiviação sofrido pela rocha. É notória a mobilidade dos elementos durante os processos intempéricos, especialmente no intemperismo químico. Para determinar a distribuição e migração desses elementos ao longo da meteorização química, pode-se recorrer ao balanço químico de massa, que é definido pela relação ou diferença entre o ganho e perda de elementos durante a alteração do material original até o material residual de intemperismo, resultante da mobilidade dos elementos quando submetidos ao intemperismo químico. Os fatores que influem na mobilidade dos elementos são agrupados em quatro categorias: (a) ordem atômica-iônica, tais como: raio iônico, grau de oxidação e potencial iônico; (b) ordem cristalográfica, inerente ao grau de cristalinidade do mineral; (c) ordem litológica, referente à granulometria, porosidade, permeabilidade e composição química global da rocha, e (d) ordem ambiental, relativa à temperatura, índice de pluviosidade, atividade orgânica, fisiografia local e características físico-químicas (pH, Eh) das soluções meteóricas de percolação (Carvalho, 1995).

Objetivando entender a natureza da geoquímica da alteração de rochas e a sua relação com a gênese de solos da região de Lavras (MG), uma vez que não existem trabalhos que contemplam tal tema nesta região, realizaram-se estudos pedogeocímicos em perfis de alteração em solos com horizonte B textural de ocorrência regional, desenvolvidos a partir de materiais de origem litocimicamente distintos: rochas ígneas de composição ácida, intermediária e básica. Nesta região, esses solos desenvolvem-se sob relevo onulado a forte onulado, originando distintas classes de solos com horizonte B textural em função do substrato, discriminado petrológica e geoquimicamente.

Realizou-se a caracterização geoquímica de todos os horizontes que compõem os perfis de alteração, desde a rocha fresca até o sólum, e avaliou-se a variação de sua composição química ao longo da seqüência de alteração. Analisaram-se, também, o comportamento da mobilidade, a distribuição dos elementos químicos e a quantificação de suas perdas e ganhos.

## MATERIAL E MÉTODOS

Os perfis selecionados para o estudo do comportamento geoquímico ao longo da alteração pedogenética foram aqueles correspondentes às classes de solo com horizonte B textural de ocorrência na região estudada, ou seja: Perfil 1 - Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd), formado a partir de rochas granítoides de composição granítica (rocha ígnea de composição ácida, teor de  $\text{SiO}_2 > 66\%$ ) do Domínio geológico intitulado Granito de Itutinga (Quéméneur, 1995; Lacerda, 1999); Perfil 2 - Argissolo Vermelho eutrófico (PVe), desenvolvido sobre diorito milonitzado (rocha ígnea de composição intermediária, com 55 a 66% de  $\text{SiO}_2$ ) do Domínio geológico Diorito do Rosário (Quéméneur, 1995; Lacerda, 1999), e Perfil 3 - Chernossolo Argilúvico férreo (MTf), evoluído sobre piroxenito granulitizado (rocha ígnea básica, com teor de  $\text{SiO}_2$  entre 55 a 45%) do Domínio geológico denominado *Greenstone-belt* de Lavras (Quéméneur, 1995; Lacerda, 1999).

O material utilizado constituiu-se da amostragem feita ao longo dos perfis de alteração, desde as rochas frescas do substrato e seus diferentes estádios de alteração e os solos sobre elas desenvolvidos, individualizados em seus horizontes. Os perfis de alteração foram criteriosamente selecionados, partindo da discriminação geoquímica e petrológica dos domínios geológicos de origem.

As coordenadas geográficas dos perfis são: Perfil 1 - Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico:  $44^{\circ}35'28''\text{W}$  e  $21^{\circ}17'50''\text{S}$ ; Perfil 2 - Argissolo Vermelho eutrófico:  $44^{\circ}53'00''\text{W}$  e  $21^{\circ}16'38''\text{S}$ , e Perfil 3 - Chernossolo Argilúvico férreo:  $45^{\circ}02'56''\text{W}$  e  $21^{\circ}11'00''\text{S}$ .

Foram realizadas excursões de campo para selecionar os perfis de alteração, observando-se os diferentes substratos geológicos e as respectivas classes de solo formadas, bem como os padrões de relevo associados ao desenvolvimento de solos com horizonte B textural na região, ou seja, relevo ondulado a forte ondulado (Andrade et al., 1998).

A amostragem para as análises geoquímicas foi feita ao longo dos horizontes de cada perfil, coletando-se amostras representativas desde a rocha fresca até o sólum, baseando-se em observações dos estádios de alteração, tais como: características texturais preservadas das rochas originais, composição mineralógica original, coloração, friabilidade e características morfológicas do sólum.

Foram coletadas amostras indeformadas em todos os horizontes que compõem os perfis de alteração, além de amostras de rochas alteradas e rochas frescas ou inalteradas, para a avaliação de suas densidades globais.

### Análises geoquímicas

As amostras de solo para as análises geoquímicas foram secas ao ar e, posteriormente, pulverizadas

manualmente em graal de ágata até atingir granulometria menor que 0,105 mm, com controle granulométrico por tamisagem a seco (tamis de 150 #), sendo, então, individualizadas aliquotas de cerca de 30 g. As amostras de rocha fresca e rocha alterada foram britadas e pulverizadas em moinho de W no Centro de Pesquisas Manoel Teixeira da Costa/Instituto de Geociências/Universidade Federal de Minas Gerais - CPMTC/IGC/UFMG, sendo, também, individualizadas aliquotas de cerca de 30 g.

As análises geoquímicas foram efetuadas no CPMTC/IGC/UFMG, utilizando métodos combinados de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX) e Espectroscopia de Emissão Atômica com Plasma de Acoplamento Indutivo (ICP). Os elementos maiores analisados, expressos em óxidos constituintes, foram:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MnO}$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$ , além da perda ao fogo.

### Teores absolutos - Balanço químico de massa

Nas análises químicas convencionais, no caso dos elementos maiores-óxidos constituintes, a comparação dos resultados analíticos de duas amostras pode levar a estimativas ambíguas, pois tais resultados não são padronizados para unidades de massa equivalente, isto é, as diferenças de distribuição composicional dos componentes químicos impostos pela alteração intempérica não são levadas em consideração. É pouco provável que a alteração intempérica de 100 g de uma rocha irá produzir 100 g de produto alterado, pois os componentes de diferentes pesos moleculares podem ser trocados da rocha fonte para o produto. Variações na densidade e sua relação com as mudanças de volume irão, deste modo, constituir parâmetros fundamentais na obtenção da padronização da rocha fonte e seus produtos, em uma unidade de massa equivalente.

Foram, então, calculadas as quantidades absolutas de cada componente químico de toda a seqüência de alteração nos perfis 1, 2 e 3, pela multiplicação dos teores dos elementos obtidos na análise química com os valores de densidade das respectivas amostras.

Desta forma, os valores da densidade da amostra foram incorporados ao cálculo de perdas e ganhos dos elementos da rocha original para os produtos alterados, com vistas em fixar a variação de volume.

Para a avaliação quantitativa da mobilidade dos elementos químicos durante a evolução do processo pedogenético ao longo dos perfis de alteração estudados, partindo da rocha fresca de origem, foram efetuados cálculos de balanço químico de massa. Utilizou-se o cálculo isovolumétrico proposto por Millot & Bonifas (1955) e Bonifas (1959), mediante a expressão:  $t\% = 100 [ (d_a \cdot x_a / d_0 \cdot x_0) - 1 ]$ ; em que  $t\%$  = taxa de mobilidade;  $d_a$  = densidade para o produto de alteração;  $d_0$  = densidade para o material original;  $x_a$  = teor do elemento no produto de alteração; e  $x_0$  =

teor de elemento no material original. Este cálculo de balanço químico de massa permite determinar perdas e ganhos em termos absolutos dos elementos constituintes do material, em que t% define a percentagem de perda, quando negativo, e ganho, quando positivo, dos componentes químicos nos vários estádios de alteração em relação ao seu material original.

O cálculo isovolumétrico proposto por Millot & Bonifas (1955) e Bonifas (1959) é utilizado quando se têm evidências de que a variação de volume é desprezível, tal como a conservação da estrutura do material durante a alteração, sendo possível calcular a quantidade, em peso, de cada elemento por unidade de volume, e compará-la com a quantidade no mesmo volume de rocha fresca.

O método foi utilizado com base nos estudos micropedológicos e mineralógicos realizados na mesma seqüência de amostras destes perfis de alteração, cujos método e resultados encontram-se detalhados em Lacerda (1999) e Lacerda et al. (2000), que permitiram aos autores observar razoável conservação de estrutura litológica nos estádios iniciais de alteração, ou seja, no alterito (horizontes pedológicos C). Na evolução da alteração, representada pelos horizontes de transição (horizonte BC) e sólum (horizonte B<sub>t</sub> e A), foi possível observar feições indicativas de preservação de volume, tais como: *box*

*works* e aumento gradativo na proporção de vazios em relação ao plasma + esqueleto no fundo matricial.

### Análises físicas

A determinação da densidade global das amostras foi efetuada pelo método do torrão parafinado (EMBRAPA, 1979a), com três repetições por amostra.

### Características físicas e mineralógicas dos perfis de alteração

As características físicas, assim como a mineralogia da seqüência de alteração destes perfis, foram avaliadas por Lacerda (1999) e Lacerda et al. (2000). O quadro 1 sumaria as principais características físicas destes perfis.

A mineralogia dos fácies rocha-fresca dos perfis estudados apresenta a seguinte composição:

- Perfil 1 (PVAd) – granítide – mineralogia essencial: feldspato potássico (30%), plagioclásio (35%), quartzo (25%), biotita e anfibólio relictual da série hornblenda-edenita (5%); mineralogia secundária (5%): biotita, epidota da série zoisita-pistacita e zoisita-clinozoisita, moscovita, sericita, carbonato, titanita, clorita e óxidos de ferro, e mineralogia acessória: zircão e allanita.
- Perfil 2 (PVe) – diorito milonitizado - mineralogia essencial: plagioclásio (40%), anfibólio da série

**Quadro 1. Características físicas dos perfis 1, 2 e 3**

| Amostra  | Horizonte      | Profundidade | Areia | Sílte | Argila | Sílte/argila | Classificação textural |                        | D<br>kg dm <sup>-3</sup> |  |  |  |  |  |  |  |
|--|----------------|--------------|-------|-------|--------|--------------|------------------------|------------------------|--------------------------|--|--|--|--|--|--|--|
|  |                |              |       |       |        |              | SBCS <sup>(1)</sup>    | EMBRAPA <sup>(2)</sup> |                          |  |  |  |  |  |  |  |
| cm   |                |              |       |       |        |              |                        |                        |                          |  |  |  |  |  |  |  |
| ----- g kg <sup>-1</sup> -----                         |                |              |       |       |        |              |                        |                        |                          |  |  |  |  |  |  |  |
| Perfil 1 - Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico(PVAd) |                |              |       |       |        |              |                        |                        |                          |  |  |  |  |  |  |  |
| A  | A              | 0-55         | 500   | 320   | 180    | 1,78         | fr                     | médio                  | 1,38                     |  |  |  |  |  |  |  |
| B  | B <sub>t</sub> | 55-95        | 560   | 230   | 210    | 1,09         | fr-arg-aren            | médio                  | 1,35                     |  |  |  |  |  |  |  |
| BC   | BC             | 95-130       | 520   | 360   | 120    | 3,00         | fr-aren                | médio                  | 1,27                     |  |  |  |  |  |  |  |
| C <sub>1</sub>   | C <sub>1</sub> | 130-210      | 660   | 280   | 60     | 4,67         | fr-aren                | médio                  | 1,31                     |  |  |  |  |  |  |  |
| C <sub>2</sub>   | C <sub>2</sub> | 210-310      | 620   | 330   | 50     | 6,60         | fr-aren                | médio                  | 1,25                     |  |  |  |  |  |  |  |
| Perfil 2 - Argissolo Vermelho eutrófico (PVe)          |                |              |       |       |        |              |                        |                        |                          |  |  |  |  |  |  |  |
| A  | A              | 0-20         | 300   | 400   | 300    | 1,34         | fr-arg                 | médio                  | 1,28                     |  |  |  |  |  |  |  |
| B  | B <sub>t</sub> | 20-80        | 200   | 440   | 360    | 1,22         | fr-arg a fr-arg-silt   | médio a argiloso       | 1,47                     |  |  |  |  |  |  |  |
| BC   | BC             | 80-130       | 240   | 590   | 170    | 3,47         | fr-silt                | médio                  | 0,97                     |  |  |  |  |  |  |  |
| C <sub>1</sub>   | C <sub>1</sub> | 130-260      | 260   | 650   | 90     | 7,22         | fr-silt                | médio                  | 1,07                     |  |  |  |  |  |  |  |
| C <sub>2</sub>   | C <sub>2</sub> | 260-430      | 260   | 670   | 70     | 9,57         | fr-silt                | médio                  | 1,06                     |  |  |  |  |  |  |  |
| C <sub>3</sub>   | C <sub>3</sub> | 430-450      | 320   | 600   | 80     | 7,50         | fr-silt                | médio                  | 1,18                     |  |  |  |  |  |  |  |
| Perfil 3 - Chernossolo Argilúvico férrico (MTf)        |                |              |       |       |        |              |                        |                        |                          |  |  |  |  |  |  |  |
| A  | A              | 0-18         | 480   | 360   | 160    | 2,25         | fr                     | médio                  | 1,25                     |  |  |  |  |  |  |  |
| B  | B <sub>t</sub> | 18-55        | 140   | 340   | 520    | 0,65         | arg                    | argiloso               | 1,45                     |  |  |  |  |  |  |  |
| BC   | BC             | 55-85        | 200   | 390   | 410    | 0,95         | arg                    | argiloso               | 1,09                     |  |  |  |  |  |  |  |
| C <sub>1</sub>   | C <sub>1</sub> | 85-120       | 560   | 320   | 120    | 2,67         | fr-aren                | médio                  | 1,09                     |  |  |  |  |  |  |  |
| C <sub>2</sub>   | C <sub>2</sub> | 120-230      | 700   | 260   | 40     | 6,50         | fr-aren                | médio                  | 1,51                     |  |  |  |  |  |  |  |
| C <sub>3</sub>   | C <sub>3</sub> | 230+         | 740   | 220   | 40     | 5,50         | areaia-fr              | arenoso                | 2,16                     |  |  |  |  |  |  |  |

D = densidade global do solo, arg = argiloso, fr = franco, silt = siltoso, aren = arenoso. <sup>(1)</sup> Classes texturais do material constitutivo de horizontes e perfis de solos, segundo Lemos & Santos (1984), adotadas pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – SBCS. <sup>(2)</sup> Classificação textural simplificada, segundo EMBRAPA (1979b).

hornblenda-edenita (20%), quartzo (9%) e feldspato potássico (traços); mineralogia secundária: epidoto da série zoisita-pistacita (15%), biotita (5%), titanita (5%), sericita (5%) e clorita (1%), e mineralogia acessória: zircão, apatita e óxidos de ferro e titânio.

- Perfil 3 (MTf) – piroxenito granulitizado – mineralogia essencial: clinopiroxénio da série diopsídio-augita (30%), anfibólito da série hornblenda-edenita (30%), plagioclásio (35%) e quartzo (traços); mineralogia secundária (5%): anfibólito da série tremolita-actinolita/uralita, sericita, óxidos de ferro e de titânio, e mineralogia acessória: apatita.

A associação de argilominerais silicatados mostra a seguinte constituição:

- Perfil 1 (PVAd): illita (nos horizontes C, BC e B<sub>t</sub>) e caulinita + gibbsita (ambos nos horizontes C, BC, B<sub>t</sub> e A).
- Perfil 2 (PVe): illita (nos horizontes C e BC), vermiculita com hidróxi nas entrecamadas + caulinita (ambos nos horizontes C, BC, B<sub>t</sub> e A) e gibbsita (desenvolvida a partir do horizonte BC).
- Perfil 3 (MTf): caulinita + talco + esmectita (horizontes C<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>1</sub>, BC, B<sub>t</sub> e A).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise química para os elementos maiores-óxidos constituintes (resultados normalizados para 100 dag kg<sup>-1</sup>) por meio de FRX e ICP para os perfis 1, 2 e 3 encontram-se listados no quadro 2. As amostras referem-se aos horizontes pedogenéticos A, B (considerados como fácies sólum), BC (considerado como fácies de transição) e C (considerado como fácies alterito). R<sub>1</sub> corresponde ao fácies rocha alterada e R ao fácies rocha fresca de origem.

As quantidades absolutas de cada componente químico de toda a seqüência de alteração nos perfis 1, 2 e 3 encontram-se no quadro 3. Foram elaborados diagramas de teor absoluto dos elementos maiores-óxidos constituintes versus densidade global para os perfis 1, 2 e 3 (Figuras 1, 2 e 3), visto que a densidade da amostra é um parâmetro que reflete o grau de alteração de maneira sensível. Nestes diagramas, a densidade global representa os diversos fácies de alteração avaliados ao longo dos perfis estudados, de acordo com a correspondência entre as densidades globais e suas respectivas amostras apresentadas no quadro 3.

**Quadro 2. Dados analíticos (FRX e ICP) dos elementos maiores-óxidos constituintes - Perfis 1, 2 e 3**

| Amostra  | Profundidade | SiO <sub>2</sub>     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO   | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> | MnO   | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | PF    | Total |
|--|--------------|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------------------|------------------|------------------|-------|-------------------------------|-------|-------|
| cm   |              | dag kg <sup>-1</sup> |                                |                                |       |       |                   |                  |                  |       |                               |       |       |
| Perfil 1 - Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico(PVAd) |              |                      |                                |                                |       |       |                   |                  |                  |       |                               |       |       |
| A  | 0-55         | 69,65                | 15,90                          | 1,38                           | 0,02  | 0,04  | 0,19              | 2,75             | 0,16             | 0,01  | 0,08                          | 9,82  | 100,0 |
| B  | 55-95        | 66,71                | 19,51                          | 1,69                           | 0,02  | 0,08  | 0,24              | 2,75             | 0,19             | 0,01  | 0,06                          | 8,73  | 100,0 |
| BC   | 95-130       | 69,04                | 18,33                          | 1,62                           | 0,02  | 0,08  | 0,20              | 2,73             | 0,18             | 0,01  | 0,06                          | 7,72  | 100,0 |
| C <sub>1</sub>   | 130-210      | 72,57                | 17,28                          | 0,39                           | 0,01  | 0,02  | 0,19              | 3,64             | 0,08             | 0,01  | 0,05                          | 5,75  | 100,0 |
| C <sub>2</sub>   | 210-310      | 67,60                | 18,06                          | 1,55                           | 0,02  | 0,08  | 0,23              | 3,38             | 0,18             | 0,01  | 0,04                          | 8,84  | 100,0 |
| R <sub>1</sub>   | 310+         | 71,06                | 15,57                          | 1,50                           | 0,28  | 0,27  | 2,57              | 6,04             | 0,11             | <0,01 | 0,03                          | 2,57  | 100,0 |
| R  |              | 72,10                | 14,38                          | 1,57                           | 0,92  | 0,24  | 4,25              | 5,63             | 0,12             | <0,01 | 0,03                          | 0,76  | 100,0 |
| Perfil 2 - Argissolo Vermelho eutrófico (PVe)          |              |                      |                                |                                |       |       |                   |                  |                  |       |                               |       |       |
| A  | 0-20         | 54,80                | 18,50                          | 8,79                           | 0,78  | 0,53  | 0,20              | 0,44             | 0,81             | 0,11  | 0,04                          | 14,98 | 100,0 |
| B  | 20-80        | 52,74                | 21,60                          | 10,75                          | 0,26  | 0,27  | 0,10              | 0,52             | 0,83             | 0,06  | 0,01                          | 12,86 | 100,0 |
| BC   | 80-130       | 55,28                | 20,90                          | 9,43                           | 0,59  | 0,86  | 0,12              | 1,04             | 0,81             | 0,09  | 0,02                          | 10,85 | 100,0 |
| C <sub>1</sub>   | 130-260      | 56,71                | 20,31                          | 8,76                           | 0,68  | 1,48  | 0,12              | 1,03             | 0,72             | 0,11  | 0,03                          | 10,05 | 100,0 |
| C <sub>2</sub>   | 260-430      | 56,61                | 19,34                          | 8,82                           | 0,78  | 2,42  | 0,19              | 1,04             | 0,75             | 0,12  | 0,02                          | 9,91  | 100,0 |
| C <sub>3</sub>   | 430-450      | 63,08                | 18,34                          | 6,43                           | 0,38  | 1,54  | 0,15              | 1,08             | 0,55             | 0,07  | 0,03                          | 8,34  | 100,0 |
| R <sub>1</sub>   | 450+         | 54,77                | 16,54                          | 7,63                           | 6,70  | 3,70  | 5,17              | 0,65             | 0,90             | 0,07  | 0,23                          | 3,64  | 100,0 |
| R  |              | 55,64                | 17,10                          | 7,54                           | 6,68  | 3,80  | 5,22              | 1,20             | 0,94             | 0,08  | 0,23                          | 1,58  | 100,0 |
| Perfil 3 - Chernossolo Argilúvico férrico (MTf)        |              |                      |                                |                                |       |       |                   |                  |                  |       |                               |       |       |
| A  | 0-18         | 43,95                | 11,94                          | 18,86                          | 4,49  | 5,24  | 0,20              | 0,26             | 1,01             | 0,29  | 0,01                          | 13,75 | 100,0 |
| B  | 18-55        | 38,27                | 18,84                          | 22,54                          | 0,72  | 0,86  | 0,03              | 0,21             | 1,12             | 0,16  | 0,01                          | 17,23 | 100,0 |
| BC   | 55-85        | 37,71                | 18,60                          | 23,10                          | 0,72  | 0,80  | 0,01              | 0,14             | 1,14             | 0,16  | 0,01                          | 17,60 | 100,0 |
| C <sub>1</sub>   | 85-120       | 42,21                | 15,64                          | 20,56                          | 2,64  | 2,84  | 0,01              | 0,18             | 1,08             | 0,19  | 0,01                          | 14,64 | 100,0 |
| C <sub>2</sub>   | 120-230      | 47,46                | 13,27                          | 16,99                          | 4,66  | 6,31  | 0,27              | 0,21             | 0,86             | 0,17  | 0,01                          | 9,78  | 100,0 |
| C <sub>3</sub>   | 230+         | 52,61                | 11,51                          | 14,84                          | 6,56  | 8,20  | 1,03              | 0,31             | 0,73             | 0,17  | 0,01                          | 4,03  | 100,0 |
| R  |              | 52,12                | 9,08                           | 11,58                          | 10,90 | 11,80 | 2,89              | 0,09             | 0,73             | 0,17  | 0,05                          | 0,60  | 100,0 |

Onde: A = horizonte A (fácies sólum), B = horizonte Bt (fácies sólum), BC = horizonte BC (fácies de transição), C = horizontes C (fácies alterito), R<sub>1</sub> = fácies rocha alterada, R = fácies rocha fresca de origem, PF = perda ao fogo.

**Quadro 3. Teores absolutos dos elementos maiores-óxidos constituintes - Perfis 1, 2 e 3**

| Horizonte   | D    | <b>SiO<sub>2</sub></b> | <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | <b>CaO</b> | <b>MgO</b> | <b>Na<sub>2</sub>O</b> | <b>K<sub>2</sub>O</b> | <b>TiO<sub>2</sub></b> | <b>MnO</b> | <b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b> |
|---|------|------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------|------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------|-----------------------------------|
| kg dm <sup>-3</sup>                                     |      | dag dm <sup>-3</sup>   |                                    |                                    |            |            |                        |                       |                        |            |                                   |
| Perfil 1 - Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd) |      |                        |                                    |                                    |            |            |                        |                       |                        |            |                                   |
| A   | 1,38 | 96,11                  | 21,94                              | 1,90                               | 0,03       | 0,06       | 0,26                   | 3,79                  | 0,22                   | 0,01       | 0,11                              |
| B   | 1,35 | 90,06                  | 26,34                              | 2,28                               | 0,03       | 0,11       | 0,33                   | 3,71                  | 0,26                   | 0,01       | 0,08                              |
| BC  | 1,27 | 87,68                  | 23,28                              | 2,06                               | 0,03       | 0,10       | 0,26                   | 3,47                  | 0,23                   | 0,01       | 0,08                              |
| C <sub>1</sub>  | 1,31 | 95,07                  | 22,64                              | 0,52                               | 0,01       | 0,03       | 0,25                   | 4,77                  | 0,11                   | 0,01       | 0,07                              |
| C <sub>2</sub>  | 1,25 | 84,50                  | 22,58                              | 1,94                               | 0,03       | 0,10       | 0,29                   | 4,23                  | 0,23                   | 0,01       | 0,05                              |
| R <sub>1</sub>  | 2,28 | 162,01                 | 35,50                              | 3,43                               | 0,64       | 0,62       | 5,86                   | 13,77                 | 0,25                   | -          | 0,07                              |
| R   | 2,59 | 186,73                 | 37,25                              | 4,07                               | 2,39       | 0,62       | 11,00                  | 14,58                 | 0,31                   | -          | 0,08                              |
| Perfil 2 - Argissolo Vermelho eutrófico (PVe)           |      |                        |                                    |                                    |            |            |                        |                       |                        |            |                                   |
| A   | 1,28 | 70,15                  | 23,68                              | 11,25                              | 1,00       | 0,68       | 0,26                   | 0,57                  | 1,04                   | 0,14       | 0,05                              |
| B   | 1,47 | 77,52                  | 31,75                              | 15,80                              | 0,38       | 0,40       | 0,15                   | 0,77                  | 1,23                   | 0,09       | 0,01                              |
| BC  | 0,97 | 53,62                  | 20,28                              | 9,14                               | 0,58       | 0,84       | 0,12                   | 1,00                  | 0,79                   | 0,09       | 0,02                              |
| C <sub>1</sub>  | 1,07 | 60,68                  | 21,73                              | 9,37                               | 0,73       | 1,58       | 0,13                   | 1,10                  | 0,77                   | 0,12       | 0,03                              |
| C <sub>2</sub>  | 1,06 | 60,01                  | 20,50                              | 9,35                               | 0,82       | 2,56       | 0,20                   | 1,10                  | 0,79                   | 0,13       | 0,02                              |
| C <sub>3</sub>  | 1,18 | 74,43                  | 21,64                              | 7,59                               | 0,45       | 1,82       | 0,18                   | 1,27                  | 0,65                   | 0,08       | 0,04                              |
| R <sub>1</sub>  | 2,60 | 142,40                 | 43,01                              | 19,83                              | 17,42      | 9,63       | 13,44                  | 1,68                  | 2,33                   | 0,18       | 0,60                              |
| R   | 2,82 | 156,89                 | 48,22                              | 21,27                              | 18,85      | 10,72      | 14,71                  | 3,38                  | 2,64                   | 0,23       | 0,65                              |
| Perfil 3 - Chernossolo Argilúvico férreo (MTf)          |      |                        |                                    |                                    |            |            |                        |                       |                        |            |                                   |
| A   | 1,25 | 54,94                  | 14,93                              | 23,58                              | 5,61       | 6,55       | 0,25                   | 0,33                  | 1,27                   | 0,36       | 0,01                              |
| B   | 1,45 | 55,50                  | 27,31                              | 32,69                              | 1,05       | 1,25       | 0,04                   | 0,31                  | 1,63                   | 0,23       | 0,01                              |
| BC  | 1,09 | 41,10                  | 20,28                              | 25,18                              | 0,78       | 0,87       | 0,01                   | 0,15                  | 1,24                   | 0,17       | 0,01                              |
| C <sub>1</sub>  | 1,09 | 46,01                  | 17,05                              | 22,41                              | 2,87       | 3,09       | 0,01                   | 0,20                  | 1,18                   | 0,21       | 0,01                              |
| C <sub>2</sub>  | 1,51 | 71,66                  | 20,04                              | 25,66                              | 7,03       | 9,53       | 0,41                   | 0,32                  | 1,31                   | 0,26       | 0,02                              |
| C <sub>3</sub>  | 2,16 | 113,63                 | 24,86                              | 32,06                              | 14,18      | 17,71      | 2,22                   | 0,68                  | 1,57                   | 0,37       | 0,02                              |
| R   | 2,99 | 155,83                 | 27,14                              | 34,61                              | 32,59      | 35,27      | 8,65                   | 0,27                  | 2,17                   | 0,51       | 0,15                              |

Onde: A = horizonte A (fácie sólum), B = horizonte Bt (fácie sólum), BC = horizonte BC (fácie de transição), C = horizontes C (fácie alterito), R<sub>1</sub> = fácie rocha alterada, R = fácie rocha fresca de origem. D = densidade global.

Os cálculos isovolumétricos de balanço químico de massa (Millot & Bonifas, 1955; Bonifas, 1959), apresentados no quadro 4, permitiram determinar as perdas e ganhos em termos absolutos dos elementos maiores-óxidos constituintes ao longo dos perfis 1, 2 e 3 (Figuras 1, 2 e 3) e do balanço químico de massa (Quadro 4), levam aos seguintes comentários:

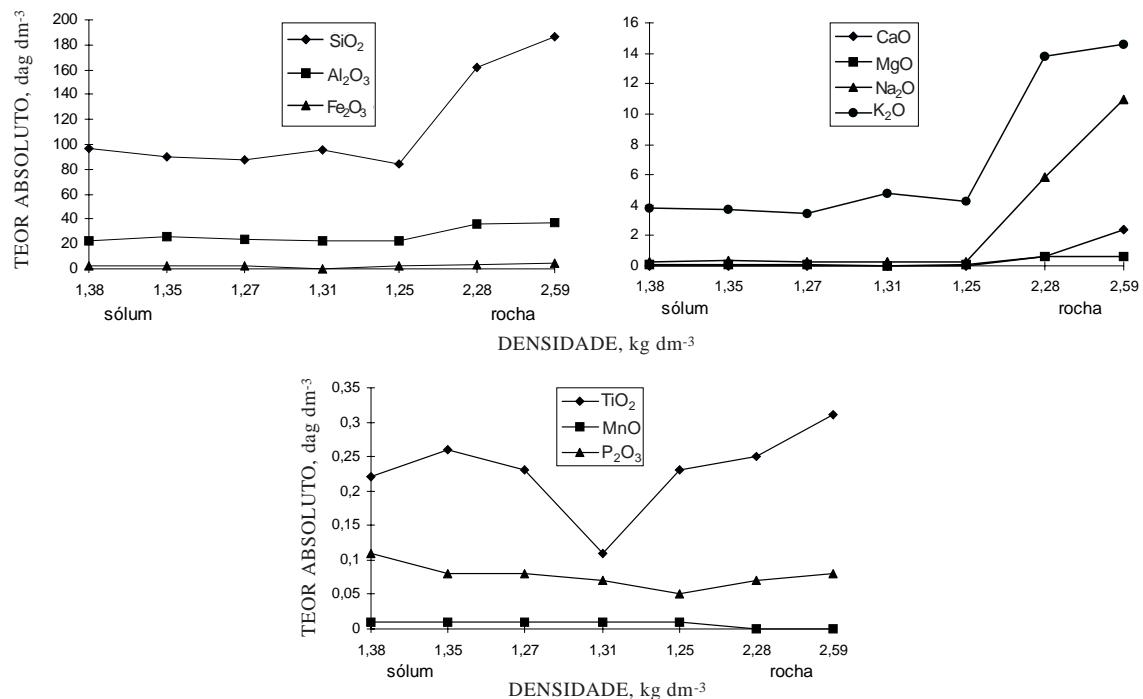
**SiO<sub>2</sub>** - A perda nos teores absolutos de SiO<sub>2</sub> ocorreu nos perfis 1, 2 e 3, cujos valores ao longo da seqüência de alteração encontram-se no quadro 3, sendo mais acentuada nos estádios iniciais da alteração, nos fácies de alteração rocha fresca ao alterito (de 186,75 dag dm<sup>-3</sup> na rocha fresca para 84,50 dag dm<sup>-3</sup> no horizonte C<sub>2</sub> do perfil 1 (PVAd); de 156,89 dag dm<sup>-3</sup> na rocha fresca para 74,43 dag dm<sup>-3</sup> no horizonte C<sub>3</sub> do perfil 2 (PVe), e de 155,88 dag dm<sup>-3</sup> para 71,66 dag dm<sup>-3</sup> no horizonte C<sub>2</sub> no perfil 3

(MTf), permanecendo com decréscimo discreto até o horizonte de transição BC, seguido de discretíssimo acréscimo em direção ao sólum (Figuras 1, 2 e 3).

O balanço químico (Quadro 4) mostrou ser essa perda moderada a partir do alterito. Entre os fácies de alteração rocha fresca e rocha alterada, a perda foi pequena, e a partir desta foi muito discretamente progressiva do alterito ao sólum, mostrando valores ligeiramente mais baixos no horizonte B<sub>t</sub>. As perdas médias verificadas foram de cerca de 50-60%, atingindo 73% no horizonte BC do perfil 3 (MTf).

**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e TiO<sub>2</sub>** - Nos três perfis estudados, observou-se acréscimo discreto nos teores absolutos desses elementos nos horizontes B<sub>t</sub>, seguido de subsequente decréscimo no horizonte A, após uma perda inicial, pouco significativa, da rocha fresca ao alterito, permanecendo, a partir do último, valores absolutos pouco variáveis até o horizonte BC; podendo-se constatar este comportamento no quadro 3 e nas figuras 1, 2 e 3.

A partir do balanço químico (Quadro 4), pôde-se quantificar tal comportamento. O Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> experimentou perda moderada ao longo da seqüência de alteração

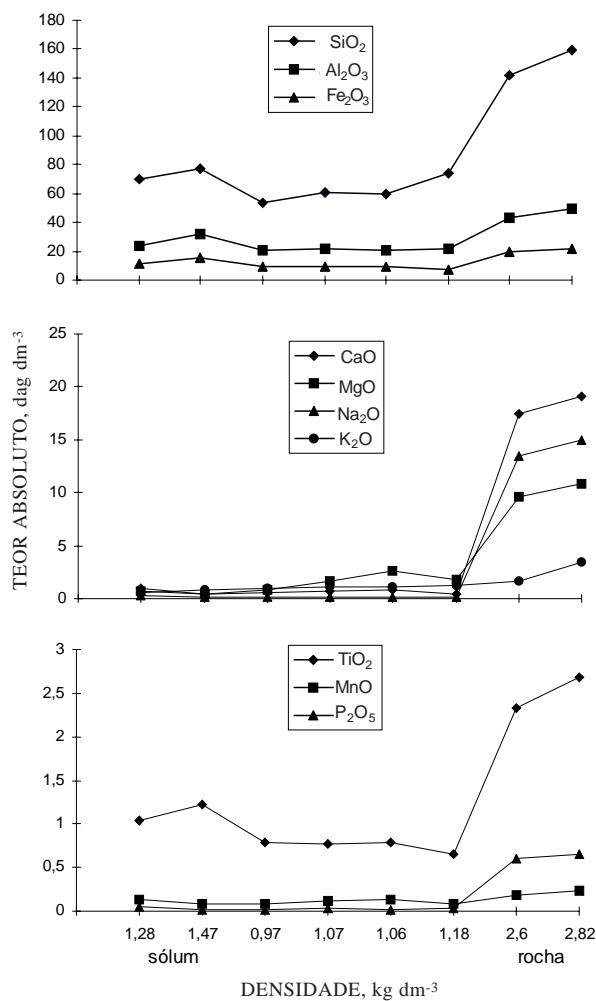


**Figura 1.** Diagramas de distribuição dos elementos maiores em teores absolutos versus densidade para o perfil 1 - PVAd.

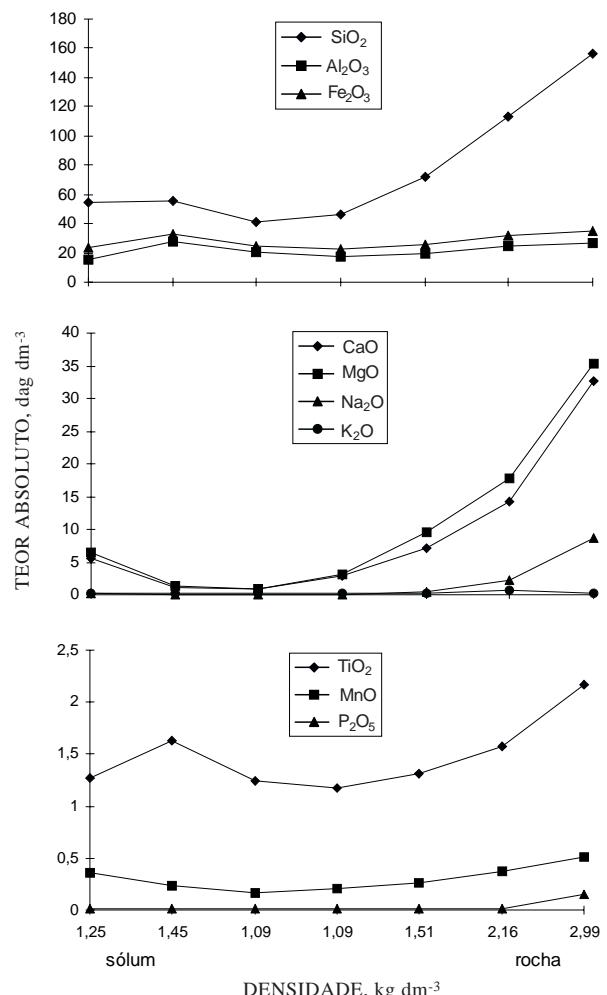
**Quadro 4.** Balanço químico (isovolumétrico) dos elementos maiores-óxidos constituintes - Perfis 1, 2 e 3

| Horizonte   | D                   | Balanço químico (isovolumétrico) dos elementos maiores-óxidos constituintes - Perfis 1, 2 e 3 |                                |                                |        |        |                   |                  |                  |        |                               |
|---|---------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|--------|--------|-------------------|------------------|------------------|--------|-------------------------------|
|   |                     | SiO <sub>2</sub>  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO    | MgO    | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> | MnO    | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> |
|   | kg dm <sup>-3</sup> | %   |                                |                                |        |        |                   |                  |                  |        |                               |
| Perfil 1 - Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd) |                     |   |                                |                                |        |        |                   |                  |                  |        |                               |
| A   | 1,38                | -48,53  | -41,10                         | -53,32                         | -98,74 | -90,32 | -97,64            | -74,01           | -29,03           | -      | 37,50                         |
| B   | 1,35                | -51,77  | -29,29                         | -43,98                         | -98,74 | -82,26 | -97,00            | -74,55           | -16,13           | -      | 0,00                          |
| BC  | 1,27                | -53,04  | -37,50                         | -49,39                         | -98,74 | -83,87 | -97,64            | -76,20           | -25,81           | -      | 0,00                          |
| C <sub>1</sub>  | 1,31                | -49,09  | -39,22                         | -87,22                         | -99,58 | -95,16 | -97,73            | -67,28           | -64,52           | -      | -12,50                        |
| C <sub>2</sub>  | 1,25                | -54,75  | -39,38                         | -52,33                         | -98,74 | -83,87 | -97,36            | -70,99           | -25,81           | -      | -37,50                        |
| R <sub>1</sub>  | 2,28                | -13,24  | -4,70                          | -15,72                         | -73,22 | 0,00   | -46,73            | -5,56            | -19,35           | -      | -12,50                        |
| R   | 2,59                | 0,00  | 0,00                           | 0,00                           | 0,00   | 0,00   | 0,00              | 0,00             | 0,00             | -      | 0,00                          |
| Perfil 2 - Argissolo Vermelho eutrófico (PVe)           |                     |   |                                |                                |        |        |                   |                  |                  |        |                               |
| A   | 1,28                | -55,29  | -50,89                         | -47,11                         | -94,69 | -93,66 | -98,23            | -83,14           | -60,61           | -39,13 | -92,42                        |
| B   | 1,47                | -50,59  | -34,16                         | -25,72                         | -97,98 | -96,27 | -98,98            | -77,22           | -53,41           | -60,87 | -98,48                        |
| BC  | 0,97                | -65,82  | -57,94                         | -57,03                         | -96,92 | -92,16 | -99,18            | -70,41           | -70,08           | -60,87 | -96,97                        |
| C <sub>1</sub>  | 1,07                | -61,32  | -54,94                         | -55,95                         | -96,13 | -85,26 | -99,12            | -67,46           | -70,83           | -47,83 | -95,45                        |
| C <sub>2</sub>  | 1,06                | -61,75  | -57,49                         | -56,04                         | -95,65 | -76,12 | -98,64            | -67,46           | -70,08           | -43,48 | -96,97                        |
| C <sub>3</sub>  | 1,18                | -52,56  | -55,12                         | -64,32                         | -97,61 | -83,02 | -98,78            | -62,43           | -75,38           | -65,22 | -93,94                        |
| R <sub>1</sub>  | 2,60                | -9,24   | -10,80                         | -6,77                          | -7,59  | -10,17 | -8,63             | -50,30           | -11,74           | -21,74 | -9,09                         |
| R   | 2,82                | 0,00  | 0,00                           | 0,00                           | 0,00   | 0,00   | 0,00              | 0,00             | 0,00             | 0,00   | 0,00                          |
| Perfil 3 - Chernossolo Argilúvico férreo (MTf)          |                     |   |                                |                                |        |        |                   |                  |                  |        |                               |
| A   | 1,25                | -64,74  | -44,99                         | -31,87                         | -82,79 | -81,43 | -97,11            | 22,22            | -41,47           | -29,41 | -93,33                        |
| B   | 1,45                | -64,38  | 0,63                           | -5,55                          | -96,78 | -96,46 | -99,54            | 14,81            | -24,88           | -54,90 | -93,33                        |
| BC  | 1,09                | -73,63  | -25,28                         | -27,25                         | -97,61 | -97,53 | -99,88            | -44,44           | -42,86           | -66,67 | -93,33                        |
| C <sub>1</sub>  | 1,09                | -70,47  | -37,18                         | -35,25                         | -91,19 | -91,24 | -99,88            | -25,93           | -45,62           | -58,82 | -93,33                        |
| C <sub>2</sub>  | 1,51                | -54,01  | -26,16                         | -25,86                         | -78,43 | -72,98 | -95,26            | 18,52            | -39,63           | -49,02 | -86,67                        |
| C <sub>3</sub>  | 2,16                | -27,08  | -8,40                          | -7,37                          | -56,49 | -49,79 | -74,34            | 151,85           | -27,65           | -27,45 | -86,67                        |
| R   | 2,99                | 0,00  | 0,00                           | 0,00                           | 0,00   | 0,00   | 0,00              | 0,00             | 0,00             | 0,00   | 0,00                          |

Onde: A = horizonte A (fácies sólum), B = horizonte Bt (fácies sólum), BC = horizonte BC (fácies de transição), C = horizontes C (fácies alterito), R<sub>1</sub> = fácies rocha alterada, R = fácies rocha fresca de origem. D = densidade global.



**Figura 2. Diagramas de distribuição dos elementos maiores em teores absolutos versus densidade para o perfil 2 - PVe.**



**Figura 3. Diagramas de distribuição dos elementos maiores em teores absolutos versus densidade para o perfil 3 - PTf.**

nos perfis estudados, com exceção de ganho de 0,63% no horizonte  $B_t$  do perfil 3 (MTf), apresentando perdas médias (desconsiderando o fácie rocha alterada) de cerca de 37, 50 e 33%, respectivamente, nos perfis 1, 2 e 3. O  $Fe_2O_3$  apresentou perda moderada a moderada a baixa, com valores médios de 57, 51 e 25%, respectivamente, nos perfis em epígrafe. Para o  $TiO_2$  as perdas médias foram de cerca de 32, 66 e 39% nos perfis 1, 2 e 3, respectivamente. Nos três perfis em pauta, os menores valores de perda de  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  e  $TiO_2$  foram encontrados nos horizontes  $B_t$  de cada um dos perfis analisados, resultando num enriquecimento relativo desses constituintes químicos, ressaltando-se que, no perfil 3 (MTf), verificou-se enriquecimento real (0,63%) de  $Al_2O_3$ .

**CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O** - Os teores absolutos destes constituintes químicos (Quadro 3) mostraram

perda geralmente acentuada ao longo da evolução da alteração intempérica, principalmente nas suas primeiras fases, da rocha fresca ao alterito, excetuando-se quando o teor inicial foi baixo. Do alterito até o sólum permaneceram praticamente constantes a baixíssimos valores. Somente no perfil 3 (MTf), observou-se um subsequente acréscimo de CaO e MgO a partir do horizonte  $B_t$  em direção ao horizonte A (Figuras 1, 2 e 3).

O balanço químico (Quadro 4) quantificou as perdas para o CaO, MgO e Na<sub>2</sub>O em acentuadas a praticamente totais a partir do alterito (horizontes  $C_3$  no perfil 2 - PVe e horizontes  $C_2$  nos perfis 1 (PVAd) e 3 (MTf)), que praticamente se manteve com poucas variações, em direção ao sólum, apresentando valores de perda menores de magnitude variável dos fácies rocha fresca a rocha alterada. Nos perfis 1, 2 e 3, respectivamente, esses

componentes químicos atingiram valores de perda de 99,58, 97,98 e 97,61% (CaO); 95,16, 96,27 e 97,53% (MgO), e 97,73, 99,18 e 99,88% (Na<sub>2</sub>O). O K<sub>2</sub>O nos perfis 1 (PVAd) e 2 (PVe) apresentou comportamento semelhante, com perdas menos acentuadas, com valores médios de cerca de 70%. Já no perfil 3 - MTf, o comportamento do K<sub>2</sub>O mostrou ganhos e perdas, considerando o baixo teor de K<sub>2</sub>O na rocha original, comprometendo a análise do seu comportamento geoquímico.

**MnO** - De acordo com os dados de teores absolutos apresentados no quadro 3, este constituinte químico apresentou valores baixos em todos os perfis de alteração (Figuras 1, 2 e 3), apresentando, ao balanço químico, perda moderada de cerca de 50% para os perfis 2 (PVe) e 3 (MTf) (Quadro 4). No perfil 1 (PVAd), não foi possível o cálculo de balanço de massa, pois a rocha fresca de origem apresentou teor de MnO muito baixo, abaixo do limite inferior de detecção do método analítico adotado.

**P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>** - Apresentou comportamento semelhante ao descrito para CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O nos perfis 2 (PVe) e 3 (MTf), sendo a perda menos significativa em relação aos seus baixos teores originais, conforme se pode observar nos dados de teores absolutos do quadro 3. No perfil 1 (PVAd), pode-se notar ligeiro acréscimo deste constituinte químico a partir do horizonte C<sub>2</sub> em direção ao solum, após perda a partir da rocha fresca (Quadro 3 e Figuras 1, 2 e 3).

Os dados do balanço químico (Quadro 4) mostraram perda acentuada e progressiva a partir do alterito, com valores médios de perda de 96 e 92%, para os perfis 2 (PVe) e 3 (MTf), respectivamente. Já o perfil 1 (PVAd) mostrou perda média de cerca de 20% da rocha fresca ao horizonte C<sub>1</sub>, invariável nos horizontes BC e B<sub>t</sub>, seguido de ganho de 37,50% no horizonte A.

Os resultados analíticos obtidos para os perfis 1, 2 e 3 possibilitaram a análise da variação da composição química sofrida por eles ao longo da seqüência de alteração, desde a rocha fresca até o solum. Os cálculos volumétricos e o balanço químico de massa permitiram avaliar o comportamento da mobilidade e distribuição dos elementos químicos ao longo da evolução pedogenética, bem como quantificar suas perdas e ganhos.

As magnitudes dos teores dos elementos maiores-óxidos constituintes ao longo dos perfis de alteração mostraram-se compatíveis à composição química dos seus materiais originais, ou seja, rocha de composição granítica para o perfil 1 – Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; rocha de composição diorítica para o perfil 2 – Argissolo Vermelho eutrófico; e rocha básica para o perfil 3 – Chernossolo Argilúvico férrico (Quadro 2). A variação química sofrida ao longo das seqüências de alteração pedogenética, da rocha fresca em direção ao solum, é proporcional aos teores

originais, o que se reflete em atributos dos solos formados, assim como a individualização em classes de solos com horizonte B textural distintas.

No entanto, verificou-se comportamento geoquímico semelhante para os três perfis em questão, marcado, em linhas genéricas, pela perda da maioria dos constituintes químicos nas primeiras fases da alteração, do fácies rocha fresca ao alterito, evidenciando que a alteração processa-se rapidamente a partir do início da atuação intempérica.

O estudo pedogeoquímico mostrou que, ao longo da evolução da alteração, houve perdas moderadas de SiO<sub>2</sub>, da ordem de 50-60%; perdas acentuadas a praticamente totais, atingindo mais de 95% de CaO, MgO e Na<sub>2</sub>O e menos acentuadas para o K<sub>2</sub>O; perdas moderadas de MnO, de cerca de 50%; perdas acentuadas de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (média de 94%), com exceção do perfil 1 (PVAd); perdas moderadas de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, moderadas a baixas de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e TiO<sub>2</sub>, mostrando enriquecimento relativo destes três últimos nos horizontes B<sub>t</sub> dos três perfis analisados.

Este comportamento geoquímico observado reflete, provavelmente o processo pedogenético e o grau de evolução dos solos com horizonte B textural, concordando com as características dos solos dispostos em seqüências cronológicas e litológicas, discutidas por Resende et al. (1995). É caracterizado por perda moderada de sílica, enriquecimento relativo moderado de Al e Fe e lixiviação de bases. Tal como descrito por Loughnan (1969), este comportamento mostra a lixiviação diferenciada de cátions no processo de meteorização de minerais primários, em que a extensão da alteração química e a natureza do produto residual formado dependem do grau de lixiviação sofrido pela rocha, conforme relatado por Carvalho (1995).

A dessilicatização moderada, juntamente com a perda moderada de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, pode ser verificada nas associações de argilominerais silicatados presentes nestes perfis de alteração, avaliados por Lacerda (1999) e Lacerda et al. (2000), que constataram a ocorrência de argilomineral 2:1 (illita, vermiculita com hidróxi nas entrecamadas, talco e esmectita), particularmente nos estádios iniciais da alteração - horizontes C, em associação com argilomineral 1:1 (caulinita) e formação de gibbsita, geralmente nos horizontes subsuperficiais e superficiais (B<sub>t</sub> e A).

De acordo com Lacerda (1999) e Lacerda et al. (2000), no perfil 1 (PVAd), a associação de argilominerais silicatados é representada por illita (nos horizontes C, BC e B<sub>t</sub>) e caulinita + gibbsita (ambos nos horizontes C, BC, B<sub>t</sub> e A); o perfil 2 (PVe) apresenta illita (nos horizontes C e BC), vermiculita com hidróxi nas entrecamadas + caulinita (ambos nos horizontes C, BC, B<sub>t</sub> e A) e gibbsita (desenvolvendo-se a partir do horizonte BC), e o perfil 3 (MTf) mostra a associação caulinita + talco + esmectita em toda a seqüência de horizontes individualizados. Estas

associações de argilominerais silicatados e sua distribuição ao longo dos perfis estudados mostram processos evolutivos de bissialitização, monossilatização e até alitização para os perfis 1 (PVAd) e 2 (PVe), não atingindo a alitização no perfil 3 (MTf).

A lixiviação praticamente completa de CaO, MgO e Na<sub>2</sub>O nos perfis analisados encontra-se diretamente relacionada com o baixo grau de resistência ao intemperismo dos minerais silicatados primários que os contêm e sua ordem de destruição intempérica ao longo da alteração, concordando com a seqüência de intemperização de minerais primários estabelecida por Goldich (1938).

De acordo com os estudos mineralógicos realizados por Lacerda (1999) e Lacerda et al. (2000), nos perfis 1 (PVAd) e 2 (PVe), os minerais primários destruídos nos estádios iniciais da alteração intempérica são exatamente os silicatos ferromagnesianos e cálcio-sódicos, tais como os anfibólios (hornblenda-edenita) e os plagioclásios cálcio-sódicos, e, no perfil 3 (MTf), acrescenta-se a estes o clinopiroxênio (diopsídio-augita). Nos perfis 1 (PVAd) e 2 (PVe), o K<sub>2</sub>O, em concordância com a ordem de perda de constituintes estabelecida por Polynov (1937), mostra lixiviação menos acentuada, primeiro pela estrutura do feldspato potássico, mineral de maior resistência ao intemperismo químico, e segundo, pela sua fixação na estrutura de argilominerais silicatados neo-formados, especialmente a illita (Besoain, 1985). No perfil 3 (MTf), o comportamento geoquímico do K<sub>2</sub>O é comprometido, em razão de seu baixo teor no material original.

O enriquecimento relativo de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e TiO<sub>2</sub> no horizonte B<sub>t</sub> é justificado pela concentração de sesquióxidos de Fe, Al e Ti nesse horizonte (Lacerda, 1999; Lacerda et al., 2000). Tais elementos são liberados, também, pela meteorização de minerais primários que os contêm na estrutura, tais como: silicatos ferromagnesianos (piroxénios e anfibólios), de acordo com a seqüência de intemperização destes estabelecida por Goldich (1938), além dos óxidos primários de Fe e Ti. Esses constituintes, segundo Loughnan (1969), tornam-se progressivamente concentrados no *resíduo*, de acordo com sua menor mobilidade nas condições avaliadas e com os fatores que influenciam a mobilidade dos elementos, discutidas por Carvalho (1995), podendo o Ti<sup>4+</sup> mostrar mobilidade se liberado como Ti(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup> e, se for liberado na forma TiO<sub>2</sub>, imobiliza-se; o Fe<sup>3+</sup> imobiliza-se em condições oxidantes; o Al<sup>3+</sup> imobiliza-se nas variações de pH de 4,5 a 9,5. Percebeu-se que os teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nestes solos mostraram-se compatíveis, então, com os teores deste no material original, sendo o perfil 3 (MTf) o mais enriquecido nesse constituinte químico (11,58 dag kg<sup>-1</sup>), o perfil 1 (PVAd) o mais empobrecido (1,57 dag kg<sup>-1</sup>) e o perfil 2 (PVe) apresenta teor intermediário (7,54 dag kg<sup>-1</sup>) (Quadro 2).

Por meio da análise de perdas dos principais elementos maiores-óxidos constituintes ao longo dos três perfis avaliados, foi possível estabelecer a ordem de perda desses constituintes ao longo de toda a seqüência de alteração:

- Perfil 1 - PVAd: Ca > Na > Mg > K > Si > Fe > Al
- Perfil 2 - PVe: Na > Ca > Mg > K > Si > Al > Fe
- Perfil 3 - MTf: Na > Ca > Mg > Si > K > Al > Fe

No perfil 3 (MTf), a posição ocupada pelo K é discutível, dado o seu baixo teor na rocha original, que compromete sua avaliação geoquímica. Com exceção deste, observa-se a mesma tendência de perda de constituintes e mobilidade dos cátions comuns nos solos, concordando, em linhas gerais, com a seqüência de perda de constituintes em solos, estabelecida por Polynov (1937), Goldich (1938) e Tyler (1958), citado por Loughnan (1969), e a mobilidade de cátions comuns em solos segundo Loughnan (1969).

Assim sendo, o primeiro grupo de constituintes lixiviados, com variações nas posições de perda para os três perfis, refere-se ao Ca, Mg e Na que são rapidamente mobilizados e lixiviados. Segue-se o K, que também é rapidamente mobilizado e lixiviado, mas a taxa de lixiviação pode ser retardada pela fixação na estrutura de illitas. O Si é mais lentamente lixiviado, seguido pelo Al e Fe, visto que o Al<sup>3+</sup> imobiliza-se nas variações de pH de 4,5 a 9,5 e o Fe<sup>3+</sup> imobiliza-se em condições oxidantes, segundo Loughnan (1969).

## CONCLUSÕES

1. Pela interpretação dos dados geoquímicos obtidos para os perfis estudados (PVAd, PVe e MTf), verificou-se, ao longo das seqüências de alteração pedogenética, variação química proporcional aos teores dos substratos litoquimicamente distintos.

2. Os cálculos volumétricos e o balanço químico de massa permitiram constatar a mobilidade dos elementos químicos ao longo da evolução da alteração, com estabelecimento de perdas e ganhos. Verificou-se comportamento geoquímico semelhante para os três perfis estudados, como reflexo do processo pedogenético e grau de evolução dos solos com horizonte B textural, caracterizado por perdas moderadas de Si (cerca de 50-60%); perdas acentuadas a praticamente totais de Ca, Mg e Na e menos acentuadas de K; perdas moderadas de Mn (cerca de 50%); perdas acentuadas de P (cerca de 90-95%) com exceção do perfil 1 (PVAd); perdas moderadas de Al, moderadas a baixas de Fe e Ti, com enriquecimento relativo destes três últimos nos horizontes B<sub>t</sub>.

3. Estabeleceu-se a seguinte ordem de perda dos constituintes maiores: Perfil 1 - PVAd: Ca > Na > Mg > K > Si > Fe > Al; Perfil 2 - PVe: Na > Ca > Mg > K > Si > Al > Fe; e Perfil 3 - MTF: Na > Ca > Mg > Si > K > Al > Fe

### LITERATURA CITADA

- ANDRADE, H.; ALVES, H.M.R.; VIEIRA, T.G.C.; RESENDE, R.J.T.P.; ESTEVES, D.R; BRASIL, J.P.K. & ROSA, E.R. Diagnóstico ambiental do município de Lavras com base em dados georreferenciados do meio físico: IV – Principais grupamentos de solos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., Poços de Caldas, 1998. Anais. Poços de Caldas, Universidade Federal de Lavras/ Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998. v.4. p.442-443.
- BESOAIN, E. Mineralogía de arcillas de suelos. San José, Costa Rica, Instituto Interamericano de Cooperacion para la Agricultura, 1985. 1205p.
- BONIFAS, M. Contribution à l'étude géochimique de l'alteration latéritique. Mem. Serv. Carte Géol. d'Alsace et Lorraine, 17, 1959. 159p.
- CARVALHO, I.G. Fundamentos da geoquímica dos processos exógenos. Salvador, Bureau, 1995. 213p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de método de análise de solo. Rio de Janeiro, 1979a. não paginado.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de solos. In: REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS, 10., Rio de Janeiro, 1979. Súmula. Rio de Janeiro, 1979b. 83p. (SNLCS. Série Miscelânia, 1)
- GOLDICH, S.A. A study in rock-weathering. *J. Geol.*, 46:17-23, 1938.
- 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.
- LEMOS, R.C. & SANTOS, R.D. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 2.ed. Campinas. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1984. 45p.
- LOUGHNAN, F.C. Chemical weathering of the silicate minerals. New York, Elsevier, 1969. 154p.
- MILLOT, G. & BONIFAS, M. Transformations isovolumétriques dans les phénomènes de laterisation et de bauxitisation. *Bull. Serv. Carte Géol. d'Alsace et Lorraine*, 8:3-20, 1955.
- POLYNOV, B.B. The cycle of weathering. London, Thomas Murby, 1937. 220p.
- QUEMÉNEUR, J.J.G. Os magmatismos de idade Arqueana e Transamazônica na Região Campo das Vertentes, MG (Sul do Cráton São Francisco), com base em geoquímica e geocronologia. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 1995. 79p.
- RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B. & CORRÊA, G.F. Pedologia: base para distinção de ambientes. Viçosa, NEPUT, 1995. 302p.

