COMPORTAMENTO DO Si, Al E Fe DURANTE O INTEMPERISMO LATERÍTICO DE ROCHAS GRANÍTICAS NA AMAZÔNIA

NINA ROSA LEAL DAMOUS* e ANTÔNIO TARANTO GOULART**

ABSTRACT This comparative study deals with the distribution of Si, Al and Fe in soil profiles from two different localities in the State of Pará (Tracuateua and Carajás Ridge) and aims at establishing possible distinctions in the lateritic weathering evolution of granitic rocks in the Amazon Region.

Selected samples were analysed after separation into grain fractions (sand, silt and clay) and secondary oxides. Chemical determinations were made by atomic absorption spectrometry and gravimetric methods, whereas mineral constituents were identified by both optical techniques and X-ray diffraction.

As compared to the parental material, the Tracuateua profile shows an expressive silica enrichment and a general alumina impoverishment towards the surface. Moreover alumina and iron contents closely follow the distribution patterns of the clay and oxide fractions respectively. In turn, the Carajás profile reveals an opposite trend with alumina and iron contents increasing towards the surface and following, despite small deviations, the distribution patterns of the clay and oxide fraction respectively. Silica concentrations decrease continuously upwards.

Among several factors, rain precipitation seems to play the major role in the latosol formation. Where the pluviometric rate is higher (Tracuateua), silica is enriched at the expense of the leaching of alumina; where it is lower (Carajás), opposite results are observed together with the fixation of iron oxides in the soil.

INTRODUÇÃO Nas regiões tropicais, os processos intemperísticos, em alguns lugares, conduzem à formação de um tipo de solo chamado laterita, cujas características principais são a presença de pequenas quantidades de minerais argilosos e maiores teores de óxido férrico e óxido de alumínio.

Existem várias hipóteses para explicar por que as lateritas são formadas. Hoje, aceita-se mais o fato de serem produtos residuais, resultantes de um intenso intemperismo de rochas que contêm ferro e alumínio, pela solubilização e remoção de certos constituintes, principalmente sódio, potássio, magnésio e sílica; é reconhecido também o papel dos ácidos orgânicos e do clima tropical.

Essa teoria genética não explica, porém, os detalhes dos mecanismos do intemperismo laterítico, principalmente na Amazônia, sobre a qual os estudos nesse sentido são raríssimos.

O presente trabalho é um estudo comparativo do comportamento dos elementos Si, Al e Fe em solos desenvolvidos sobre rochas graníticas, tomando-se duas diferentes áreas na Amazônia, com o objetivo de verificar possíveis diferenças na evolução do intemperismo laterítico e tentar estabelecer suas causas.

Áreas de estudo As áreas de nosso estudo estão localizadas na Região Bragantina e Granito Central da Serra dos Carajás, nordeste e sul do Pará, respectivamente (Fig. 1).

Na Região Bragantina, predomina um clima tropical úmido, com regime de chuvas distribuído em dois períodos: um chuvoso, que contribui com cerca de 95% para o total das precipitações, e um de estiagem, ambos totalizando em média 2 600 mm anuais (Fig. 2); a temperatura máxima média é cerca de 30,9 °C, segundo medidas realizadas no período de 1975 a 1980 pela Empresa Brasileira de Pesquisa

Agropecuária-Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Úmido (Embrapa-CPATU) na Estação de Tracuateua (latitude 1°04'S e longitude 46°46'W).

O relevo na área é predominantemente plano, apresentando, esporadicamente, ondulações que atingem um máximo de 48 m de altitude e o solo nelas desenvolvido está representado por latossolos amarelos (Falesi *et al.*, 1967). A vegetação predominante na área é do tipo capoeira, mato baixo que se desenvolve após a derrubada e a queima (Ferreira, 1979).

Figura 1 — Localização das áreas

* Universidade Federal do Pará, Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológicas, caixa postal 1611, CEP 66000, Belém, Pará, Brasil

** Universidade Federal do Pará, Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológicas, e Fundação Universidade Federal de Mato Grosso (FUMT)

Figura 2 — Precipitação pluviométrica anual, em milímetro, no período de 1975 a 1980

No Granito Central da Serra dos Carajás, o clima é do tipo tropical quente e seco atenuado, com regime de chuvas também distribuído em duas estações distintas: uma chuvosa, na qual ocorrem 90% das precipitações e uma de estiagem, ambas totalizando, em média, 2 000 mm anuais (Fig. 2); a temperatura máxima média fica na ordem de 31,3 °C, segundo medidas realizadas no período de 1975 a 1980 pelo Ministério da Agricultura-Instituto Nacional de Meteorologia na Estação de Marabá (latitude 5°21'S e longitude 49°9'W.) Morfologicamente, a área apresenta um relevo ondulado com boa drenagem; sua vegetação é uma cobertura de floresta equatorial quase contínua, típica de terras firmes da Amazônia (Beisiegel *et al.*, 1973).

Metodologia de campo e características dos perfis Por estudos anteriores, sabe-se que, litologicamente, a área da Região Bragantina é representada essencialmente por rochas graníticas e filíticas, com as primeiras constituindo o embasamento cristalino da região. Os granitos são constituídos de quartzo, microclina, plagioclásio sódico, muscovita e biotita, tendo como minerais acessórios berilo, turmalina e granadas (Francisco *et al.*, 1971); sua datação pelo método Rb/Sr foi avaliada, em 1960, ± 76 m.a.

O Granito Central da Serra dos Carajás é um batólito que mede cerca de 22 x 12 km, datado pelo método K/Ar, em 1928, ± 90 m.a. Mineralogicamente, é constituído de ortoclásio peritítico (feldspato dominante), quartzo, oligoclásio e biotita. O principal mineral máfico é a hornblenda. O ortoclásio traz comumente em seu interior pequenos restos de cristais de plagioclásio, de composição albita-oligoclásio (Beisiegel *et al.*, 1973). Do ponto de vista textural, o corpo granítico se apresenta de forma dominante equigranular grosseiro, derivando localmente para fácies ora granular fina, ora porfírica (Silva *et al.*, 1974).

Para a amostragem dos perfis do solos desenvolvidos sobre as rochas graníticas, foram abertos três poços na área da Região Bragantina e dois na do Granito Central, aqui identificados por RB1, RB2, RB3, GC1 e GC2, com profundidades de 1,20, 5,35, 4,60, 6,00 e 4,50 m, respectivamente, onde um total de 43 amostras foi recolhido pela técnica de coleta contínua de canal. A Fig. 3 mostra a localização dos pontos de coleta assim como a descrição das características macroscópicas dos perfis.

Metodologia dos trabalhos analíticos As amostras foram secas ao ar em recipientes rasos e abertos durante 15 dias. A seguir sofreram uma desagregação mecânica dos aglomerados para posteriormente passar por peneira de 2 mm em um separador vibratório durante 20 minutos. Dessa forma, foram obtidas duas frações, das quais a de menor granulometria foi aproveitada e quarteada.

As amostras de laboratório foram submetidas a tratamento com água oxigenada a 30% para destruição da matéria orgânica, eliminando-se desse modo maiores inter-

Figura 3 — Características macroscópicas dos perfis RB1, RB2, RB3, GC1 e GC2

ferências nas análises granulométricas subsequentes, embora se deva salientar que diminutos pedaços de madeira ou raízes foram apenas parcialmente destruídos.

Após a destruição da matéria orgânica, a separação da fração óxido (óxidos secundários que se encontram capeando os grãos dos minerais) das frações detriticas (areia, silte e argila) foi feita por extrações com mistura 1:1 em volume de ácido oxálico e oxalato de amônio em presença de radiação ultravioleta, até a obtenção de solução totalmente descolorida. Esta mistura foi usada por se tratar de reagentes que apenas removem os óxidos secundários, atacando muito fracamente a estrutura dos argilo-minerais. Como a solubilidade dos cátions divalentes, especialmente do íon cálcio, é extremamente baixa em solução de ácido oxálico, foram feitas duas extrações com HCl 0,2M para remover esses componentes insolúveis (Wakatsuki *et al.*, 1977). Os extratos foram então analisados por espectrofotometria de absorção atômica para 10 elementos, entre os quais alumínio e ferro.

Depois de retirada a fração óxido, o material residual foi passado por peneira plástica de malha de 0,063 mm e lavado várias vezes com água destilada. A finalidade desse tratamento foi isolar a fração areia, posteriormente seca em estufa a 110 °C, resfriada em dessecador e pesada.

A suspensão proveniente da lavagem da fração areia foi concentrada em filtro de vela acoplado à trompa de vácuo, a fim de se obterem melhores condições para separar a argila do silte.

O silte foi separado da argila pelo método da centrifuga, segundo Müller (1967), usando-se como antifloculante uma solução a 1% em volume de hidróxido de amônio. O resíduo foi removido quantitativamente com água destilada para uma cápsula de porcelana, onde foi seco em estufa, resfriado em dessecador e pesado; o material sobrenadante foi coletado também em cápsula de porcelana, seco a 50 °C para não destruir a estrutura dos argilo-minerais, resfriado em dessecador e pesado.

Depois de separadas, as diferentes frações foram analisadas quimicamente por absorção atômica para alumínio e ferro, entre outros elementos. O silício foi determinado por gravimetria. A composição mineralógica dessas frações foi estimada semiquantitativamente para silte e argila por difratometria de raios X; no caso da areia, a estimativa foi feita com lupa binocular.

Essa sistemática foi seguida visando ao estudo da distribuição assim como a composição química-mineralógica das frações de solo, uma vez que, de modo geral, as partículas maiores são constituídas de minerais primários enquanto as menores compreendem os minerais secundários (Moniz,

1972). Assim, no desenvolvimento deste trabalho, as partículas constituintes do solo foram agrupadas, conforme a granulometria proposta por Blockwerk (*in* Müller, 1967), nas frações areia, silte e argila, além dos óxidos secundários, por nós denominados "fração óxido".

Os resultados das análises são apresentados nas Figs. 4, 5 e 6.

MINERALOGIA DAS FRAÇÕES NOS PERFIS ESTUDADOS

Fração areia Nos perfis da Região Bragantina (Fig. 5), a assembléia mineralógica mostra que a fração areia é constituída essencialmente por quartzo, feldspatos, muscovita e minerais pesados (ilmenita, rutilo, zircão e turmalina). Os perfis do Granito Central mostram essa mesma composição mineralógica, notando-se, porém, a ausência de muscovita e a presença de magnetita entre os pesados. A Fig. 5 mostra ainda um caráter dominante de quartzo sobre os outros minerais, tanto nos poços da Região Bragantina como nos do Granito Central.

Os elevados teores de quartzo nos perfis estudados estão relacionados a sua grande resistência aos processos intemperísticos. A decomposição da muscovita e dos feldspatos deve-se principalmente à moderada estabilidade desses minerais frente ao intemperismo; suas proporções relativas nos perfis, quando comparadas com aquelas nas rochas graníticas, evidenciam que a muscovita é mais estável em relação aos feldspatos. A notada ausência de biotita, mas cuja presença foi constatada nos granitos subjacentes, deve-se a uma baixa estabilidade causada pela presença, em sua estrutura, de ferro ferroso, que se oxida facilmente a ferro férrico, e de magnésio, que expõem a camada de octaedros a um maior ataque por parte das soluções ácidas que percolam a rocha durante os processos de alteração (Moniz, 1972).

Fração silte A Fig. 5 mostra que os perfis da Região Bragantina contêm quartzo em quantidade dominante enquanto a muscovita de abundante tende a desaparecer nas proximidades da superfície. Os feldspatos, por sua vez, nos três poços, aparecem como raros.

No Granito Central, o perfil GC1 mostra ausência de feldspatos enquanto no perfil GC2 esses minerais encontram-se em quantidades abundantes. A illita aparece em teores menores que 3%.

O comportamento do quartzo, muscovita e feldspatos nos poços da Região Bragantina e GC1 é explicado com os mesmos argumentos abordados para a fração areia.

Visto que na fração areia o conteúdo de feldspatos nos

Figura 4 — Distribuição das frações areia, silte, argila e óxido nos perfis RB1, RB2, RB3, GC1 e GC2

Figura 5 — Variação da composição mineralógica das frações areia, silte e argila nos perfis RB1, RB2, RB3, GC1 e GC2

Figura 6 — Distribuição do SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 nos perfis RB1, RB2, RB3, GC1 e GC2

poços GC1 e GC2 é apenas de 3% a 10%, as quantidades abundantes desses minerais nesta fração sugerem a existência de um mecanismo intempérico diferente para o perfil GC2, o qual preservaria os feldspatos em grãos de 0,063 a 0,002 mm, tamanho esse que corresponderia a um estágio intermediário precedendo sua completa destruição (Damous, 1981).

A observada ausência de minerais pesados na fração silte deve-se à ocorrência destes em teores abaixo do limite de detecção do método analítico utilizado (difratometria de raios X), uma vez que minerais com menos de 3% do total da amostra não aparecem nos difratogramas. A retenção de caulinita nesta fração deve-se à ocorrência deste argilo-mineral com dimensões superiores ao limite de separação entre silte e argila (2μ) adotado neste trabalho, visto que a caulinita pode apresentar partículas de até 4μ (Grim, 1968).

Fração argila A fração argila é representada por minerais do grupo da caulinita (caulinita e/ou haloisita), como mostra a Fig 5. O domínio desses argilo-minerais em todos os perfis estudados é condizente com as condições de clima das áreas estudadas.

No nível inferior do poço RB3 ocorre um veio de montmorilonita. Como a formação de montmorilonita exige a presença de alumínio, silício, ferro e magnésio em quantidades suficientes em condições de pH alcalino (Degens, 1968), a ocorrência desse veio estaria relacionada com a intemperização de biotita e plagioclásio, tais como os encontrados nos granitos aflorantes nas proximidades deste poço, os quais forneceriam os elementos necessários à formação desse grupo de argilo-minerais. Os valores de pH medidos no referido nível teriam favorecido o desenvolvimento do processo.

Os maiores teores de illita no poço RB1, em relação aos

demais, estão relacionados com o menor desenvolvimento deste perfil. Segundo Jackson (*in* Grim, 1968), a abundância de illita, entre outros minerais da fração argila, sugere uma menor intemperização da rocha original.

Convém salientar que, em áreas de alteração profunda, deve haver a formação de amorfos (materiais de baixa cristalinidade) que não puderam ser detectados à difração de raios X.

Fração óxido A fração óxido foi extraída e mantida em solução, fato este que impediu a determinação de sua composição mineralógica. Uma possível evaporação mostrou-se inviável, visto ocorrer a decomposição dos oxalatos por mecanismos desconhecidos (Wakatsuki *et al.*, 1977).

GEOQUÍMICA DO Si, Al E Fe A distribuição dos elementos Si, Al e Fe nas frações areia, silte, argila e óxido, assim como no solo total, é mostrada na Fig. 6*.

Região Bragantina Os teores de silício na fração areia são notavelmente maiores que nas rochas originais correspondentes (Goulart, 1980). Seu comportamento ao longo dos perfis atribui-se à decomposição dos minerais primários mais sensíveis ao intemperismo, com uma consequência variação nas concentrações relativas de quartzo.

Na fração silte, o conteúdo de silício mostra um enriquecimento relativo no sentido da superfície, estando este fato relacionado com a presença nos perfis de menores quantidades de caulinita e muscovita relativamente pobres em sílica.

Na fração argila, o silício não apresenta variações acentuadas, notando-se, contudo, uma nítida diminuição em direção à superfície, especialmente nos perfis RB2 e RB3. Esta diminuição deve-se ao domínio de caulinita pouco suscetível de sofrer substituições isomórficas enquanto as variações observadas são creditadas às ocorrências de minerais, como illita, montmorilonita e quartzo na fração ora tratada.

O alumínio contido na fração areia, presente em concentrações pequenas em relação ao material original (Goulart, 1980), permanece praticamente constante nos perfis RB1 e RB3 enquanto sofre sensíveis decréscimos no perfil RB2. Neste, os decréscimos estão relacionados principalmente com a diminuição dos teores de muscovita, presente nesta fração, em direção à superfície. O abaixamento observável no conteúdo de feldspatos no perfil RB1 não influencia substancialmente o comportamento do alumínio, face aos moderados teores de alumina nesses minerais em relação à muscovita (Goulart, 1980).

Nos poços RB1 e RB2, os teores de alumínio na fração silte, inicialmente maiores que os do material original (Goulart, 1980), decrescem no sentido da superfície. Tal comportamento é atribuído ao decréscimo dos conteúdos de muscovita e caulinita nos perfis. No perfil RB3, mais pobre em caulinita e muscovita, os teores de alumínio decrescem menos sensivelmente.

A fração argila está de modo dominante constituída de caulinita que sofre substituições isomórficas apenas em pequena escala (Grim, 1968; McBride, 1978). Assim sendo, as variações do alumínio que podem ser observadas nesta

fração (Fig. 6) devem-se à presença de outros minerais, como o quartzo, illita e esmectitas, estas últimas responsáveis pelos menores teores do elemento em questão encontrados na maior profundidade do poço RB3, uma vez que o valor da relação Si/Al nas esmectitas é maior que o da caulinita.

Na fração óxido, a distribuição do alumínio nos perfis é bastante irregular devido a seu condicionamento a fatores, tais como natureza de degradação dos minerais primários portadores de alumínio, condições de formação dos óxidos secundários e mecanismo de transporte do elemento (Goulart, 1980).

Na fração areia, o ferro, tal como o alumínio, apresenta-se em quantidades menores que os do material original (Goulart, 1980) e decresce no sentido da superfície, como mostra a Fig. 6. Este comportamento pode ser explicado pelo fato de este elemento, que ocorre principalmente como Fe^{2+} fazendo parte das estruturas dos silicatos, durante o intemperismo ser oxidado a Fe^{3+} e adsorvido em frações de menor granulometria (Goulart, 1980) ou ser hidrolisado, passando a formar óxidos férricos (Garrels e Mackenzie, 1971).

No silte, o ferro se encontra em quantidades maiores que as da fração areia, estando principalmente adsorvido na caulinita. Isto está de acordo com a variação da composição mineralógica desta fração.

A argila contém elevados teores de ferro que se mantêm praticamente constantes no poço RB2 e com amplas oscilações nos RB1 e RB3. As variações nestes dois últimos são correlacionáveis com as variações dos teores de alumínio, como mostra a Fig. 6, sugerindo possíveis substituições entre esses dois elementos. De modo geral, os argilo-minerais permitem substituições limitadas de ferro e magnésio em posições tetraédricas e octaédricas (Degens, 1968).

Os constituintes da fração óxido, de forma generalizada, são finíssimas partículas resultantes da decomposição dos minerais primários, as quais se depositam capeando a superfície ou reentrâncias dos materiais de maior granulometria. Desse modo, a distribuição do ferro, tal como a do alumínio nesta mesma fração, é bastante irregular porque depende da natureza dos minerais primários portadores de ferro, condições de formação de óxidos secundários e mecanismo de transporte do elemento.

REGIÃO DO GRANITO CENTRAL A Fig. 6 mostra que a composição química da fração areia é constituída fundamentalmente de sílica, com valores superiores a 95%, devido principalmente ao domínio de quartzo em sua composição mineralógica. As ligeiras variações desse componente ao longo dos perfis estão relacionadas com a presença de pequenas quantidades de feldspatos detectadas na fração.

No silte, os teores de silício crescem para o limite superior do horizonte A, crescimento que se explica pelo aumento da concentração relativa do quartzo provocado pela maior lixiviação que sofre o referido horizonte durante o intemperismo. No horizonte B, a distribuição desse elemento está determinada principalmente pelas diferentes proporções de quartzo e caulinita verificadas na composição mineralógica dos perfis.

Na argila, o silício distribui-se de forma bastante irregular, fato que pode ser atribuído, tal como na fração silte, às diferentes proporções de quartzo e caulinita com alguma contribuição da illita.

A presença do alumínio na areia, em teores máximos de 1,8% em Al_2O_3 , indica que na composição mineralógica desta fração os feldspatos só poderiam ocorrer em quantidades subordinadas. Esse fato está de acordo com os resultados obtidos na análise mineralógica.

* Os valores mencionados para o solo foram obtidos a partir da equação:

$\Sigma \% \text{ do elemento na fração} \times \% \text{ da fração na amostra} / 100.$

A porcentagem do elemento na fração foi calculada considerando-se uma população de 10 elementos.

A mineralogia da fração silte mostra a caulinita como dominante no poço GC1 e em quantidade subordinada no poço GC2. Entretanto no topo de ambos os perfis há um decréscimo nos teores desse argilo-mineral, que traz como consequência o aumento relativo dos teores do quartzo anteriormente mencionado. Uma vez que no perfil GC1 o alumínio está contido na caulinita e o silício, no quartzo, a distribuição desses elementos ocorre em *trends* opostos, acompanhando a variação da mineralogia. No poço GC2, o alumínio está contido nos feldspatos e caulinita enquanto o silício, embora presente nesses minerais, se concentra principalmente no quartzo. Desse modo, a variação de composição mineralógica do perfil leva tanto o alumínio como o silício a se comportarem de modo semelhante ao do poço GC1, porém em *trends* menos acentuados.

A Fig. 6 mostra que na argila os teores de alumínio crescem quando decrescem os de silício. Uma vez que, nessa fração, a caulinita é dominante e o quartzo, raro, atribuem-se as variações relativas do alumínio e silício à presença de quartzo em quantidades variáveis ao longo dos perfis.

Na fração areia, o ferro está contido nos minerais pesados (ilmenita e magnetita) e sofre um pequeno aumento em seus teores. Esse comportamento pode ser atribuído à pouca sensibilidade dos minerais pesados frente ao intemperismo, o que provoca um aumento de suas concentrações relativas com a diminuição da profundidade. Esta mesma explicação é válida para a distribuição do ferro no perfil 1 da fração silte, ressaltando-se, no entanto, que a presença de ilmenita e magnetita não foi determinada pela análise mineralógica, uma vez que se encontravam abaixo do limite de detecção (3%) do instrumento utilizado. Como na fração areia (grãos de 2 a 0,063 mm) esses minerais foram identificados por lupa binocular, infere-se que podem também ocorrer em grãos correspondentes a silte, cujo tamanho varia de 0,063 a 0,002 mm. No perfil 2, a distribuição do ferro mostra-se um tanto irregular, com menores valores no intervalo de zero a 1 m, fato que conduz à atribuição de seu conteúdo principalmente a um material residual ocluído na caulinita.

Os consideráveis valores de ferro na argila estão ligados a dois fatores que de certa forma regulam a maior ou menor retenção dos elementos nesta fração: o primeiro refere-se à ocorrência de caulinita no estado coloidal, que facilita a adsorção e a oclusão de materiais residuais; o segundo tem a ver com a disponibilidade dos elementos controlando a maior ou menor produção de minerais secundários durante os processos de alteração. Assim sendo, os teores de ferro e sua distribuição ao longo dos perfis podem ser explicados por uma oclusão nos argilo-minerais, forma essa que impossibilitou sua remoção pela mistura extratora quando foi feita a separação da fração óxido.

Na fração óxido, a Fig. 6 mostra que os teores de alumínio e ferro são bastante elevados, juntos chegando a alcançar até 98,8% do total dos óxidos. Consequentemente, esses elementos são os principais constituintes desta fração, estando mais concentrados na parte superior do horizonte B, que corresponde a uma zona de acumulação de produtos secundários. A distribuição do alumínio e do ferro nesta fração está, portanto, relacionada com a formação dos argilo-minerais e hidróxidos estáveis.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS O comportamento dos elementos Si, Al e Fe no solo total (Fig. 6) mostra que:

- Nos perfis da Região Bragantina, as quantidades de silício sofrem grande enriquecimento em relação ao material original; os teores de alumínio, em geral, apresentam empobrecimento e os conteúdos de ferro seguem aproximadamente os padrões de distribuição das frações argila e óxido.

- No Granito Central, os teores de silício decrescem continuamente em direção à superfície, apresentando valores na maior profundidade próximos aos 71% da rocha original (Almeida, 1980) enquanto no topo do perfil alcançam só de 41% e 56% nos poços 1 e 2, respectivamente. Os teores de alumínio e ferro sofrem um ligeiro enriquecimento quando comparados com os valores de 11,95% e 3,94% correspondentes ao granito original (Almeida, 1980); suas distribuições seguem, com pequenas variações, o mesmo comportamento das frações argila e óxido, respectivamente.

As observações feitas quanto ao comportamento dos perfis da Região Bragantina mostram um antagonismo quanto ao que normalmente se verifica na decomposição química de rochas silicatadas submetidas a clima úmido, quando então ocorrem perdas de silício durante a transformação de feldspato (de 52% a 67% de SiO₂) até caulinita (47% de SiO₂) e consequentes ganhos relativos de alumínio (Gilkes *et al.*, 1973).

Ainda na Região Bragantina, as quantidades de alumínio e silício nos perfis estão relacionadas com extrema predominância da fração areia, essencialmente quartzosa, sobre a fração argila. Este aspecto específico difere do que comumente se espera da decomposição de granitos, que seriam produtos com quantidades aproximadamente equivalentes das referidas frações.

Na Região Bragantina, os períodos chuvosos proporcionam elevados índices de precipitação pluviométrica, submetendo os solos a uma intensa lixiviação. Assim, os íons resultantes da decomposição dos minerais são transportados pelas soluções percolantes, o que é favorecido pela elevada porosidade e permeabilidade verificadas nos perfis estudados. Nessas condições, o baixo teor de argila e o consequente enriquecimento relativo de areia seriam decorrentes das perdas de caulinita por dissolução e transporte dos íons resultantes, na forma que abordaremos a seguir.

Trabalhos experimentais de Busenberg (1978) mostraram que a caulinita pode-se formar a partir da decomposição dos feldspatos, originando em um primeiro estágio gibbsita microcristalina que se dissolve dando uma solução em equilíbrio com a argila, de acordo com a Eq. (1):

Prosseguindo a dissolução dos feldspatos, o excesso de H₄SiO₄ desloca o equilíbrio da Eq. (1) para a esquerda, formando mais caulinita. Uma vez interrompida a dissolução dos feldspatos ou tornando-se esta pequena, não há mais formação de caulinita e o alumínio se precipita na forma de gibbsita, segundo a Eq. (2):

Assim sendo, a alta pluviosidade ocorrente na Região Bragantina, responsável pela elevada diluição das soluções, além do efetivo transporte de íons em condições ácidas, provocaria o deslocamento da Eq. (1) para a direita, favorecendo a dissolução da caulinita. Sob condições extremas de diluição e transporte, os teores de alumínio nas soluções seriam insuficientes para precipitar gibbsita. Da atuação desses processos sobre os solos resultariam os baixos teores de alumínio-silicatos primários, caulinita e óxidos de alumínio nos perfis.

No Granito Central, os principais aspectos são a conservação do quartzo e a ocorrência de minerais argilosos misturados com óxido de alumínio e de ferro. As grandes quantidades de caulinita assim como os teores de Al₂O₃ livre nos perfis são atribuídos à decomposição dos feldspatos devido

às condições de clima com períodos chuvosos e secos definidos. Com base na Eq. (1), a dissolução dos feldspatos conduziria à formação de caulinita nos períodos de estiagem e hidróxidos nos períodos chuvosos. Durante os períodos secos, evidentemente, a dissolução dos feldspatos é menor, porém as soluções são mais concentradas. Nos períodos chuvosos, embora a dissolução dos feldspatos seja maior, a produção de Al^{3+} e H_4SiO_4 tem menor efeito devido à diluição pelo aumento do volume das águas. Nessas condições, $Al(OH)_3$ é precipitado.

Uma comparação entre as Figs. 4 e 6 mostra que há correlação entre os conteúdos de ferro e o grau de lixiviação de todos os perfis estudados. Os solos altamente lixiviados (baixos teores de argila), tal como em RB1, apresentam conteúdos de ferro abaixo dos correspondentes valores encontrados no material original, ao contrário do que ocorre nos perfis GC1 e GC2 menos lixiviados.

CONCLUSÕES O intemperismo do granito da Região Bragantina, que se encontra submetido a condições de relevo plano e elevado índice de precipitação pluviométrica, conduz

à formação de um latossolo amarelo cujas características principais são um enriquecimento nos teores de silício assim como um empobrecimento nos conteúdos de alumínio.

O intemperismo do Granito Central, que se encontra sob condições de relevo ondulado, boa drenagem e médio índice de precipitação pluviométrica, conduz à formação de um latossolo cujas características principais são um empobrecimento em silício e um enriquecimento em óxidos de alumínio e de ferro.

Os períodos chuvosos da Região Bragantina favorecem os mecanismos de dissolução dos minerais e o transporte efetivo dos íons resultantes, dando aos solos um caráter de baixos teores em alumino-silicatos primários, caulinita e óxidos de alumínio.

Durante os períodos chuvosos, os mecanismos intemperísticos no Granito Central favorecem a formação de hidróxidos de ferro e alumínio enquanto os períodos de estiagem conduzem à formação de caulinita.

Agradecimentos Os autores agradecem aos doutores Rolando Zuleta Roncal, Nilson Pinto de Oliveira e Raimundo Netuno Nobre Villas, pesquisadores do NCGG/UFPa, pelas críticas e sugestões que apresentaram.

BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA, R.C. — 1980 — Contribuição à Petrologia do Granito Central da Serra dos Carajás. Tese de Mestrado em Geoquímica. Belém. NCGG-Universidade Federal do Pará.
- BEISIEGEL, V.R., BERNARDELLI, A.L., DRUMMOND, N.F., RUFF, A.W. e TREMAINE, J.W. — 1973 — Geologia e Recursos Minerais da Serra dos Carajás. *Rev. Bras. de Geoc.* 3(4):215-241.
- BOLETIM AGROMETEOROLÓGICO ANOS 1975 a 1980 — Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Úmido (Embrapa-CPATU), Belém, Pará.
- BUSENBERG, E. — 1978 — The products of the interaction of feldspars with aqueous solutions at 25°C. *Geoch. Cosmoch. Acta* 42(11):1679-1686.
- DAMOUS, N.R.L. — 1981 — Distribuição dos elementos Si, Al, Fe, Ca, Mg, Mn, Ti, Cu, K e Na em solos desenvolvidos na região do Granito Central da Serra dos Carajás — Sul do Estado do Pará. Tese de Mestrado em Geoquímica. Belém. NCGG-Universidade Federal do Pará. 55 p.
- DEGENS, E.T. — 1968 — *Geochemie der Sedimente*. Stuttgart. Ferdinand Enke Verlag. 282 p.
- FALESI, I.C., VIEIRA, L.S., SANTOS, W.H.P. dos e OLIVEIRA FILHO, J.P.S. — 1967 — Levantamento de reconhecimento dos solos da Região Bragantina, Estado do Pará. Belém. Separata da Pesquisa Agropecuária Brasileira. 2. IPEAN (Boletim Técnico 47).
- FERREIRA, J.B. — 1979 — Métodos Geofísicos Aplicados ao Mapeamento Geológico numa Área da Região Bragantina. Tese de Mestrado em Geofísica. Belém. NCGG-Universidade Federal do Pará. 88 p.
- FRANCISCO, B.H.R., LOEWENSTEIN, P., SILVA, O.F. da e SILVA, G.H. — 1971 — Contribuição à geologia da folha de São Luís (SA-23) no Estado do Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi* n° 17. Belém.
- GARRELS, R.M. and MACKENZIE, F.T. — 1971 — Evolution of sedimentary rocks. New York, W.W. Norton 397 p.
- GILKES, R.J., SCHOLZ, G. and DIMMOCK, G.M. — 1973 — Lateritic deep weathering of granite. *Journal of Soil Science* 24:523-535.
- GOULART, A.T. — 1980 — Intemperismo Químico de Rochas Graníticas na Zona Bragantina, Nordeste do Pará. Tese de Mestrado em Geoquímica. Belém. NCGG-Universidade Federal do Pará. 47 p.
- GRIM, R.E. — 1968 — *Clay Mineralogy*. New York. McGraw-Hill Book. 596 p.
- McBRIDE, M.B. — 1978 — Copper (2^o). Interactions with kaolinite factors controlling adsorption. *Clay and Clay Minerals* 26:101-106.
- MONIZ, A.C. — 1972 — *Elementos de pedologia*. São Paulo. Editora Polígono, 459 p.
- MÜLLER, G. — 1967 — *Sedimentary Petrology*. Part. I; Methods in Sedimentary Petrology. New York, London; Hafner Publishing. 283 p.
- OBSERVAÇÕES METEOROLÓGICAS — Anos 1975 a 1980 — Ministério da Agricultura, Instituto Nacional de Meteorologia, 2^o DISME, Belém, Estação de Marabá.
- SILVA, G.G. da, LIMA, M.I.C., ANDRADE, A.R.F. de e ISSLER, R.S. — 1974 — Geologia das Folhas SB22 Araguaia e parte de SC-22 Tocantins. In: Projeto Radam, Rio de Janeiro, Dept^o Nac. de Prod. Mineral. 4. 474 p.
- WAKATSUKI, T., FURUKAWA, H. and KYUMA, K. — 1977 — Geochemical study of the redistribution of elements in soil. I. Evaluation of degree of weathering of transported soil materials by distribution of major elements among the particle size fractions and soil extracts. *Geoch. et Cosmoch. Acta* 41:891-902.

MANUSCRITO

Recebido em 3 de novembro de 1982

Revisão aceita em 13 de setembro de 1983