Bauxitas do nordeste do Amazonas

Sancleiver Freire Peixoto¹ & Adriana Maria Coimbra Horbe²

Resumo Este trabalho discute os perfis com crosta bauxítica desenvolvidos sobre rochas ígneas e sedimentares do NE do estado do Amazonas. Os resultados estruturais, texturais, mineralógicos e químicos apontam algumas diferenças entre eles, as quais refletem principalmente a natureza de suas rochas-mãe. A crosta bauxítica dos perfis 1 (rochas vulcânicas) e 2 (graníticas) é mais espessa que no perfil 3 (sedimentares), apresenta maior variedade de fácies (maciça, protonodular, nodular e pisolítica) e se desenvolveu imediatamente acima do saprólito. Por outro lado, o perfil 3 possui espesso horizonte mosqueado, crosta ferruginosa bem desenvolvida e crosta bauxítica incipiente. A análise de componentes principais (ACP) definiu as seguintes associações geoquímicas: (1) SiO₂, Al₂O₃, K₂O, Ba, Sr e ETRL, onde SiO₂ predomina no saprólito e mosqueado do perfil 3 como quartzo, Al₂O₃ na crosta bauxítica (maciça e pisolítica) e nos fragmentos dos perfis 1 e 2 como gibbsita e secundariamente na caulinita, enquanto Ba, Sr e ETRL destacam-se no saprólito dos perfis 1 e 3, associados a feldspato, illita e muscovita; (2) V, Pb, Fe₂O₃ e As estão concentrados, principalmente na crosta ferruginosa dos três perfis e seus fragmentos ricos em óxi-hidróxidos de ferro (hematita e goethita), enquanto (3) Ga, Th, Ta, Sn, Nb, Hf, Zr, Y, TiO₂ e ETRP predominam na matriz do desmantelado e no solo dos perfis 1 e 2, associados aos resistatos (zircão, columbita, thorita, xenotima, etc) ou como anatásio (TiO₂). Os resultados indicam qualidade industrial para os horizontes bauxíticos da mina do Pitinga (perfis 1 e 2) e são equivalentes aos das bauxitas de outras regiões da Amazônia. Os três perfis foram interpretados como produto de alteração *in situ*, e apesar de resultarem do intemperismo polifásico atuante em toda a Amazônia desde o Cretáceo Superior, a ausência de horizonte mosqueado nos perfis 1 e 2 em relação aos que ocorrem sobre as vulcânicas mais a sul da área sinaliza variações regionais nas condições de lixiviação. Isto justifica também o não desenvolvimento de horizontes bauxíticos em outras áreas e a bauxita incipiente sobre a Formação Prosperança.

Palavras-chaves: Rochas ígneas, Amazônia, intemperismo, composição química, componentes principais, associações geoquímicas.

Abstract *Bauxites of the northeastern of Amazonas.* This paper discuss the profiles with bauxitic crust formed from igneous and siliciclastic rocks of the northeastern part of the Amazonas. The structural, textural, mineralogic and chemical results show some differences among them, which reflect mainly in the parent rock nature. The bauxitic crust from profiles 1 (volcanic rocks) and 2 (granitic) is thicker than in the profile 3 (sedimentary), shows greater range of facies (massive, pronodular, nodular and pisolitic) and developed right over the saprolite. On the other hand, the profile 3 thick mottled horizon, ferruginous crust well developed and bauxitic crust not well formed. The principal component analysis (PCA) for elements and samples defined the following geochemical associations: (1) SiO₂, Al₂O₃, K₂O, Ba, Sr e LREE, where SiO₂ predominate in the saprolite and mottled from profile 3 in the form of quartz, Al₂O₃ in the bauxitic crust (massive and pisolitic) and the fragments from the profiles 1 and 2 in the form of gibbsite and secondly in kaolinite, whereas Ba, Sr e LREE occur principally in the saprolite from profiles 1 e 3, associated to feldspar, illite and muscovite; (2) V, Pb, Fe₂O₃ and As are concentrated mainly in the ferruginous crust of the three profiles and their fragments rich in Fe oxy-hydroxides (hematite and goethite), whereas (3) Ga, Th, Ta, Sn, Nb, Hf, Zr, Y, TiO₂ e HREE predominate in the matrix of the concretionary horizon and in the soil of profiles 1 and 2, associated with the resistant (zircon, columbite, thorite, xenotime, etc) or in the form of anatase (TiO₂). The results indicate industrial quality for the bauxitic horizons of mine Pitinga (profiles 1 and 2) and are equivalent of the bauxites extracted from other Amazon regions. The three profiles were interpreted as the result of weathering *in situ*, and despite their resulting from poliphasic weathering acting in the whole Amazon region since Upper Cretaceous, the absence of mottled horizon in the profiles 1 and 2 in relation to the occurrence over the volcanic rocks further south suggests regional variations in the leaching conditions. This also justifies the absence of bauxitic horizon in other areas and the small development over Prosperança Formation.

Keywords: Igneous rock, Amazônia, weathering, chemical composition, principal component analysis, geochemical associations.

1 - Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Departamento de Geociências, Manaus (AM), Brasil. E-mail: sancleiverp@yahoo.com.br

2 - Universidade Federal do Amazonas, Departamento de Geociências, Manaus (AM), Brasil. E-mail: ahorbe@ufam.edu.br

INTRODUÇÃO O clima sazonal quente e úmido da Amazônia propiciou intenso intemperismo e o consequente desenvolvimento de amplo espectro de perfis de alteração durante o Cenozóico (Dennen & Norton 1977, Grubb 1979, Kronberg *et al.* 1979 e 1982, Costa 1991, Angélica & Costa 1991 e 1993, Costa *et al.* 1993, Costa & Araújo 1996, Costa 1997, Fernandes Filho *et al.* 1997, Horbe & Costa 1999, Costa *et al.* 1999) e, consequentemente de bauxita (Boulangé & Carvalho 1997, Lucas 1997, Kotschoubey *et al.* 2005a, 2005b e 1997). Os grandes depósitos de bauxita da Amazônia (Paragominas, Juruti, Trombetas e Almerim) estão associados às rochas sedimentares das Formações Itapecuru e Alter do Chão, bacias do Parnaíba e Amazonas, respectivamente, entretanto rochas ígneas e metamórficas também formam jazidas no sudeste do Brasil como as de Ouro Preto, Poços de Caldas, Cataguazes, Mirai (Guimarães & Coelho 1945, Lopes & Carvalho 1990, Schulman *et al.* 1997, Beissner *et al.* 1997) e na África, Venezuela e Austrália (Sadler & Gilkes 1976, Davy 1979, Anand & Gilkes 1987, Hickman *et al.* 1992, Soler & Lasaga 2000, Anand & Butt 2003, Mutakyahwa *et al.* 2003).

No nordeste do Amazonas, sobre as rochas sedimentares das Formações Nhamundá e Alter do Chão, ocorre bauxita, mas é esporádica e em horizontes pouco

desenvolvidos (Horbe *et al.* 2001). Entretanto, sobre as vulcânicas e granitos do Grupo Uatumã, Costa *et al.* (1988) relata a primeira ocorrência de bauxita sobre rochas ígneas na Amazônia. Este trabalho detalha essa ocorrência, bem como a sobre a Formação Prosperança com base nos aspectos estruturais, texturais, mineralógicos e químicos (Fig. 1).

GEOLOGIA, GEOMORFOLOGIA E FISIOGRAFIA

A região do Pitinga é constituída predominantemente por rochas efusivas ácidas do Grupo Iricoumé (perfil 1) e plútons graníticos (Água Boa - perfil 2) da Suíte Mapuera. São riolitos, riodacitos, quartzo-traquitos e piroclásticas com idade 1888 ± 3 Ma intrudido principalmente por biotita granitos, granitos rapakivi, albita granitos com idades entre 1794 ± 19 e 1815 ± 5 Ma (Costi *et al.* 2000 e Lenharo 2003).

A Formação Prosperança (perfil 3), a sul da área, representa a primeira sedimentação da bacia do Amazonas (Cunha *et al.* 1994). É constituída de arenitos arco-seanos, siltitos e conglomerados. Resultados de datação em zircão detrítico indicaram que a sedimentação teve início há pelo menos 1027 ± 22 Ma (CPRM 2001).

Esses dois grupos de rochas se encaixam em duas unidades morfoestruturais: o Planalto Dissecado Norte

Figura 1 - Mapa geológico e de localização dos perfis estudados no NE do Amazonas.

da Amazônia a norte e o Planalto da Bacia Sedimentar do Amazonas a sul. A primeira desenvolvida sobre as vulcânicas e granitos da região, consiste de extensos platôs com até 25 km de extensão com altitudes entre 100 e 450 m, vales amplos e pouco aprofundados. O segundo sobre as rochas sedimentares paleozóicas da região, também é caracterizada por extensos platôs (até 22 km), mas com altitudes menores, em média 100 m, embora localmente possam atingir até 250 m. Os vales são largos e pouco profundos encaixados em falhas com direções predominantes NE-SW e NW-SE (RADAMBRASIL 1978).

A vegetação da região é do tipo floresta densa, típica de clima tropical quente e úmido, com uma estação chuvosa de dezembro a maio, índice pluviométrico de 2000 mm/ano e temperatura média anual de 26 °C.

MATERIAIS E MÉTODOS Para este estudo foram selecionados três perfis que representam o intemperismo sobre as rochas vulcânicas e plutônicas do Grupo Uatumã e sedimentares da Formação Prosperança num total de 27 amostras. Os perfis foram caracterizados em função dos aspectos físicos como textura, estrutura e cor, além da mineralogia e química. A mineralogia foi obtida por difração de raios-x e complementada com análise petrográfica, ambas no laboratório do Departamento de Geociências da Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Os elementos maiores, na forma de seus óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , MgO , CaO , Na_2O e K_2O), e a perda ao fogo (PF) foram analisados por ICP-ES após fusão com LiBO_2 . Os elementos-traço por ICP-MS, alguns após abertura das amostras por fusão com LiBO_2 (Mo, Cu, Pb, Zn, Ni, As, Cd, Sb, Bi, Ag, Au, Hg, Tl, Se, Ba, Be, Co, Cs, Ga, Hf, Nb, Rb, Sn, Sr, Ta, Th, U, V, W, Zr, Y e ETR) enquanto outros por água-régia (Au, Ag, As, Bi, Cd, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Tl e Zn). O Mn foi analisado por absorção atômica na UFAM após abertura ácida e todos os demais elementos pela Acme Analytical Laboratories LTD em Vancouver, Canadá.

O percentual correspondente a cada mineral ao longo dos perfis foi obtido por cálculo estequiométrico a partir dos dados de difratometria de raios-X e das análises químicas dos óxidos maiores (Tab. 1). O procedimento para esse cálculo está descrito na tabela 2 e constou das seguintes etapas: 1) nas amostras onde o quartzo é ausente o SiO_2 foi atribuído à caulinita; 2) a diferença entre o percentual de Al_2O_3 em uma determinada amostra e o necessário para formar a caulinita corresponde, ao teor de gibbsita na amostra; 3) quando há caulinita e quartzo, todo o Al_2O_3 foi atribuído à caulinita. Este procedimento possibilitou estimar quanto de SiO_2 do total foi necessário para formá-la. O SiO_2 restante foi atribuído ao teor de quartzo na amostra; 4) para as amostras com muscovita, illita e caulinita o cálculo teve início com a atribuição de todo MgO à illita (única possível fonte desse elemento nos minerais encontrados). Isso permitiu estimar o percentual de K_2O proveniente da illita, o restante foi atribuído à muscovita; 5) o percentual de hematita+goethita foi obtido pela diferença entre o Fe_2O_3 total e o contido na illita, enquanto todo o TiO_2 foi atribuído ao anatásio.

Tabela 1 - Minerais identificados nas amostras e suas respectivas composições centesimais.

Mineral	Composição centesimal (CC)
Quartzo: SiO_2	100 % SiO_2
Caulinita: $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{SiO}_2)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 = 39,5$ % $\text{SiO}_2 = 46,49$ % $\text{H}_2\text{O} = 14,01$ %
Gibbsita: $\text{Al}(\text{OH})_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3 = 65,37$ % $\text{H}_2\text{O} = 34,63$ %
Illita: $\text{KAl}_6\text{Fe}_2\text{Mg}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}\text{H}_2$	$\text{K}_2\text{O} = 5,8$ % $\text{Al}_2\text{O}_3 = 37,7$ % $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 19,68$ % $\text{MgO} = 4,97$ % $\text{SiO}_2 = 29,62$ % $\text{H}_2\text{O} = 2,22$ %
Muscovita: $\text{KAl}_2(\text{OH})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}$	$\text{K}_2\text{O} = 11,82$ % $\text{Al}_2\text{O}_3 = 38,4$ % $\text{SiO}_2 = 45,26$ % $\text{H}_2\text{O} = 4,52$ %
Hematita/Goethita: Fe_2O_3	100 % Fe_2O_3
Anatásio: TiO_2	100 % TiO_2

Tabela 2 - Procedimento para a quantificação dos minerais presentes nas amostras que compõem os perfis estudados. CC – composição centesimal.

Mineral	Cálculo composicional
Muscovita (M)	$\text{K}_2\text{O}(\text{M}) = \text{K}_2\text{O total} - \text{K}_2\text{O}(\text{I}); \text{M} = \text{K}_2\text{O}(\text{M}) \times 100 / \text{K}_2\text{O}(\text{CC})\text{M}; \text{Al}_2\text{O}_3(\text{M}) = \text{Al}_2\text{O}_3(\text{CC}) \text{M} \times \text{M} / 100; \text{SiO}_2(\text{M}) = \text{SiO}_2(\text{CC})\text{M} \times \text{M} / 100;$
Illita (I)	$\text{I} = \text{MgO total} \times 100 / \text{MgO}(\text{CC})\text{I}; \text{K}_2\text{O}(\text{I}) = \text{K}_2\text{O}(\text{CC})\text{I} \times \text{I} / 100; \text{Al}_2\text{O}_3(\text{I}) = \text{Al}_2\text{O}_3(\text{CC}) \text{I} \times \text{I} / 100; \text{SiO}_2(\text{I}) = \text{SiO}_2(\text{CC})\text{I} \times \text{I} / 100; \text{SiO}_2(\text{C}) = \text{SiO}_2(\text{CC})\text{C} \times \text{C} / 100; \text{Fe}_2\text{O}_3(\text{I}) = \text{Fe}_2\text{O}_3(\text{CC})\text{I} \times \text{I} / 100$
Caulinita (C)	$\text{C} = \text{SiO}_2 \text{ total} \times 100 / \text{SiO}_2(\text{CC}); \text{Al}_2\text{O}_3(\text{C}) = \text{C} \times \text{Al}_2\text{O}_3(\text{CC}) / 100; \text{C} = \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ total} \times 100 / \text{Al}_2\text{O}_3(\text{CC})\text{C}; \text{SiO}_2(\text{C}) = \text{SiO}_2(\text{CC}) \text{C} \times \text{C} / 100; \text{C} = [\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ total} - \text{Al}_2\text{O}_3(\text{I}) - \text{Al}_2\text{O}_3(\text{M})] \times 100 / \text{Al}_2\text{O}_3(\text{CC})\text{C}$
Gibbsita (G)	$\text{Al}_2\text{O}_3(\text{G}) = \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ total} - \text{Al}_2\text{O}_3(\text{C}); \text{G} = \text{Al}_2\text{O}_3(\text{G}) \times 100 / \text{Al}_2\text{O}_3(\text{CC})\text{G}$
Quartzo (Q)	$\text{Q} = \text{SiO}_2 \text{ total} - \text{SiO}_2(\text{C}); \text{Q} = \text{SiO}_2 \text{ total} - \text{SiO}_2(\text{I}) - \text{SiO}_2(\text{M}) - \text{SiO}_2(\text{C})$
Hematita + Goethita (H+Gt)	$\text{H+Gt} = \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ total} - \text{Fe}_2\text{O}_3(\text{I})$
Anatásio (An)	$\text{An} = \text{TiO}_2 \text{ total}$

Os dados químicos foram tratados com o aplicativo STATISTICA 6.0 por análise de componentes principais (ACP). Essa técnica consiste em concentrar

a variância dos dados em um número reduzido de componentes. Em consequência, a primeira componente principal (CP1) descreve a informação máxima dos dados originais; a segunda (CP2) a quantidade máxima da variação residual e assim por diante. A variância total quando plotada em um gráfico de CP1 *versus* CP2 pode revelar um padrão e este ser correlacionado às características estruturais, texturais, mineralógicas e químicas das amostras. Nesse trabalho essa técnica foi usada para definir os principais agrupamentos de elementos e amostras. Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , K_2O , TiO_2 , Zr, Ba, Nb, Ga, Y, Hf, Sr, Th, V, Sn, Pb, Ta, As e ETR são os que forneceram os agrupamentos mais importantes. Elementos abaixo do limite de detecção em muitas amostras (Co,

Hg, Sb, Au) ou muito homogêneos entre os perfis (Mn, Sc, Mo, W, U, Zn) não foram tratados.

PERFIL 1 - PERFIL SOBRE VULCÂNICAS DA FORMAÇÃO IRICOURÉ

Estruturação do perfil e mineralogia Saprólito, crosta laterítica, horizonte ou material desmantelado e solo formam os horizontes deste perfil (Fig. 2). O saprólito é areno-argiloso avermelhado a cinzento, possui porções argilosas esbranquiçadas e preserva a foliação incipiente da rocha-mãe. Gibbsita e caulinita dominam com 87%, mas também ocorrem hematita, goethita, quartzo e anatásio (Tab. 3). A crosta laterítica está disposta imediatamente acima do saprólito, mede cerca

Figura 2 - Estruturação dos perfis lateríticos sobre rochas vulcânicas (Perfil 1) graníticas (Perfil 2) e sedimentares (Perfil 3) no NE do Amazonas. Fc – fácies; Al – aluminoso; Fe – ferruginoso; Fe-Al – ferro-aluminoso; Al-Fe – aluminoso-ferruginoso.

6 m de espessura e é composta de três fácies da base para o topo: maciça com porções protonodulares, protonodular a pisolítica e pisolítica (Fig. 3). Essas fácies variam entre aluminosa e ferro-aluminosa, são marrons avermelhadas e esbranquiçadas, cortadas por porções argilosas amareladas constituídas de caulinita e goethita. A gibbsita atinge 86% e predomina na fácies maciça e no plasma rosado e esbranquiçado que envolve os pisólitos hematíticos da crosta protonodular a pisolítica e pisolítica. A hematita ocorre associada à goethita (< 50%) e dá coloração avermelhada às porções maciças,

nodulares e pisolíticas. A caulinita é mais abundante no saprólito e no solo (< 35%), mas também compõe as porções argilosas da crosta onde o quartzo está em proporções reduzidas (< 1%); ambos também ocorrem junto a hematita nos pisólitos. Anatósio aumenta de teor em direção ao solo, mas não ultrapassa 4% (Tab. 3).

O horizonte dismantelado que recobre a crosta tem 1,5 m de espessura (Fig. 2). É formado por fragmentos decimétricos e centimétricos da fácies pisolítica, envolvidos por matriz argilosa amarela-avermelhada, esta é constituída de gibbsita (66%), caulinita (15%),

Tabela 3 - Composição mineralógica, em %, de amostras representativas dos perfis estudados. Fc – fácies; Hz – horizonte; HzM - horizonte mosqueado; F - fragmentos; M - matriz; H – hematita; Gt – goethita.

Horizontes	Quartzo	Caulinita	Gibbsita	H + Gt	Anatósio	Muscovita	Illita	Total
Perfil 1								
Solo	<1	11	68	14	4			98
Hz. dismantelado (F)	<1	31	65	1	1			99
Hz. dismantelado (M)	<1	15	66	13	4			99
Crosta								
F pisolítica	<1	8	87	3	1			100
F protonodular a pisolítica	<1	10	39	48	1			99
F protonodular/ pisolítica	<1	3	69	25	1			99
Fc. maciça	<1	3	86	9	1			100
Saprolito	<1	34	53	11	2			101
Perfil 2								
Solo	<1	77	9	8	2			97
Hz. dismantelado (F)	<1	17	75	6	2			101
Hz dismantelado (M)	<1	79	9	7	2			98
Crosta								
F protonodular	<1	13	38	47	2			101
F maciça	<1	18	66	14	<1			99
Saprolito	2	52	39	7	<1			101
Perfil 3								
Solo	<1	89	2	3	2			97
Crosta								
F protonodular	15	4	26	52	<1			98
Matriz (topo)	3	88	2	7	2			102
F colunar	10	4	33	51	<1			99
Matriz (base)	2	77	8	13	1			101
Topo do HzM (F)	<1	14	80	4	1	<1	<1	100
Topo do HzM (M)	<1	76	17	2	2	<1	<1	98
Hz. mosqueado	1	82	10	4	2	<1	<1	99
Hz. mosqueado	6	90	<1	2	1	<1	<1	100
Saprolito (F argilosa)	5	71	<1	10	2	7	3	99
Saprolito (F arenosa)	94	4	<1	1	<1	<1	<1	100

Figura 3 – Diferentes fácies da crosta laterítica e fragmentos dos perfis 1, 2 e 3. Fc – fácies; H – hematita; G – gibbsita; Gt – goethita.

hematita e goethita (13%) (Tab. 3). Os fragmentos maiores exibem feições côncavas revestidas por filme de goethita, moldes de porções anteriormente ocupadas por pisólitos hematíticos (Fig. 3). Os fragmentos menores são constituídos, principalmente de nódulos, tanto hematíticos, avermelhados e sub-arredondados, como gibbsíticos, amarelo-esbranquiçados, angulosos; ambos com até 3 cm de diâmetro e constituídos, em média, por 65% de gibbsita e 31% de caulinita. Recobrendo esse horizonte ocorre o solo, tem 2,5 m de espessura, é argilo-arenoso e passa de amarelado na base a cinza no topo. Possui composição mineralógica equivalente à da matriz do horizonte desmantelado sotoposto.

Composição química Os principais óxidos do perfil são Al_2O_3 e SiO_2 (Tab. 4), relacionados a gibbsita e caulinita. O Al_2O_3 , constituinte fundamental da gibbsita, predomina nas fácies maciça da base (58%) e pisolítica do topo da crosta (60%), e também nos fragmentos do horizonte desmantelado (55%). O teor mais baixo está na fácies protonodular a pisolítica (29%) da porção

intermediária da crosta (Fig. 4). A P.F. varia em torno de 30% no perfil e tem o mesmo comportamento do Al_2O_3 . Por outro lado, Fe_2O_3 tem distribuição oposta, ou seja, aumenta de teor do saprólito (~ 10%) para a fácies protonodular na porção central da crosta (48%), e diminui para menos de 2% nos fragmentos do horizonte desmantelado no topo do perfil. O SiO_2 não atinge 7%, exceto no saprólito e nos fragmentos do horizonte desmantelado (15%). Os teores de TiO_2 aumentam progressivamente de 1% na base para 4% no topo do perfil, enquanto CaO , Na_2O , MgO e K_2O diminuem muito de teor da rocha mãe para o perfil onde raramente atingem 0,5%. O P_2O_5 também está presente em teor muito baixo em todo o perfil e não ultrapassa 0,3% no saprólito.

Elementos-traço Os teores de Zr, Th, Nb, Ga, Hf, Y, V, Sn, Sc, W, Ta, U e Hg no perfil são maiores do que a média crustal, Ba, Sr, Mn, Zn, Co, Ni, Rb e Au menores, enquanto Pb, V, As, Mo, Cu e Sb estão na mesma ordem de grandeza dela (Tab. 5). Os elementos mais abundantes no perfil, em ordem decrescente, são Zr, Ba, Nb, Ga, Th,

Tabela 4 - Composição química, em %, das amostras representativas dos perfis 1, 2 e 3. Fc – fácies; Hz – horizonte; HzM – horizonte mosqueado; F – fragmentos; M – matriz.

Horizontes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	P.F.	Total
Perfil 1							
Solo	5,24	48,93	13,60	3,62	0,1	27,70	99,13
Hz. desmantelado (F)	14,60	55,12	1,14	1,02	<0,01	27,90	99,82
Hz. desmantelado (M)	6,98	49,11	13,38	3,54	0,1	26,10	99,15
Crosta							
F pisolítica	3,82	59,88	3,37	1,32	0,03	31,30	99,73
F protonodular/ pisolítica	4,54	29,27	47,55	0,94	0,06	17,40	99,74
F protonodular a pisolítica	1,54	46,43	25,04	1,03	0,08	25,60	99,68
F maciça	1,48	57,76	8,80	1,24	0,22	30,00	99,32
Saprólito	15,79	47,79	10,54	1,46	0,29	23,40	99,09
Rocha-mãe ¹	71,27	14,73	3,31	0,36	0,29	0,5	95,70
Perfil 2							
Solo	35,91	36,41	7,75	1,78	0,02	17,50	99,39
Hz. desmantelado (F)	7,84	55,65	6,24	0,64	<0,01	29,40	99,81
Hz. desmantelado (M)	36,82	37,20	6,79	1,59	<0,01	17,00	99,44
Crosta							
F protonodular	5,85	29,57	46,96	0,32	0,04	17,20	99,94
F maciça	8,42	50,39	13,74	0,27	<0,01	27,00	99,86
Saprólito	24,28	45,92	6,70	0,42	<0,01	22,40	99,76
Rocha-mãe ³	75,86	12,55	1,61	0,16	0,04	0,70	96,04
Perfil 3							
Solo	41,50	36,18	2,74	1,79	0,04	17,40	99,65
Crosta							
F protonodular	18,28	18,34	51,76	0,70	0,02	9,61	98,62
Matriz (topo)	40,87	36,04	6,32	1,65	0,20	14,80	99,68
F colunar	12,57	23,41	50,95	0,60	0,20	11,02	98,55
Matriz (base)	35,70	35,59	13,27	1,02	0,10	14,71	100,29
Topo do HzM (F)	6,58	57,88	3,56	1,18	0,02	30,50	99,74
Topo do HzM (M)	35,22	40,84	2,02	1,82	0,04	19,70	99,64
Hz. mosqueado	38,34	39,29	4,14	1,52	0,04	16,30	99,65
Hz. mosqueado	47,79	35,51	1,66	1,04	0,05	13,60	99,69
Saprólito*(F argilosa)	42,09	32,05	10,77	1,68	0,19	11,80	99,41
Saprólito (F arenosa)	95,68	1,44	0,86	0,43	0,02	1,40	99,85

* Única amostra com teores de MgO (0,17%) e K₂O (1,02%) superiores ao limite de detecção (0,01 e 0,04%, respectivamente).

Na₂O e CaO são menores que 0,01%.

¹Vulcânica ácida (Costa *et al.* 1988): Na₂O (2,53 %), CaO (0,85 %) e MgO (0,28 %).

²Vulcânica ácida (CPRM 2000).

³Biotita granito (Lenharo *et al.* 2003): Na₂O (3,71 %), CaO (0,05 %) e MgO (0,04 %).

Figura 4 - Distribuição da composição química, em %, das amostras representativas dos perfis 1, 2 e 3. Fc – fácies; HzM - horizonte mosqueado; F - fragmentos; M - matriz.

Hf, Y, V, Sr e Mn, por outro lado, os menos são As, Ni, Mo, Cu, Co, Hg, Sb e Au. Desses, Zr, Th, Ga, Nb, Y e Hf predominam com teor similar na matriz argilosa do horizonte desmantelado e no solo, enquanto V, As, Sb, Cu e Mo são mais abundantes na fácies protonodular a

pisolítica da crosta devido associação com Fe (Fig. 5).

Os elementos terras raras (ETR) estão acima da média crustal, exceto Eu, Gd, Tb e Ho. Todos aumentam de teor para os horizontes do perfil em relação à rocha-mãe, exceto nos fragmentos do horizonte des-

Tabela 5 - Composição química, em ppm, nas amostras representativas dos perfis 1, 2 e 3. Fc – fácies; Hz – horizonte; HzM - horizonte mosqueado; F - fragmentos; M - matriz.

Amostra	Zr	Ba	Nb	Ga	Y	Hf	Sr	Th	V	Mn	Sn	Sc	W	Pb	Ta	U	Zn	Rb	As	Ni	Mo	Cu	Co	Hg	Sb	Au	
Perfil 1																											
Solo	3757	156	147	108	100	104	76	152	143	22	50	23	12	5,2	10	15	12	1,1	1	1,8	0,9	6,2	0,6	0,13	0,6	<0,5	
H ₂ desman- telado (F)	634	15	27	73	9	18	12	24	42	15	4	4	2,5	1	1,9	2,2	1	2	1	0,6	0,3	0,2	<0,5	0,18	<0,1	<0,5	
H ₂ desman- telado (M)	3596	159	146	108	101	100	83	156	141	25	26	24	12	4,1	10	15	3	2,1	1,2	0,6	0,7	0,6	0,6	0,09	0,6	<0,5	
Crosta																											
F pisolítica	1122	55	54	64	38	32	29	55	35	17	11	11	4,8	2,2	3,9	6	1	<0,5	1,5	0,3	0,4	0,5	<0,5	0,31	0,6	1,3	
F proto- nodular/ pisolítica	716	46	38	91	39	19	19	57	413	13	9	21	5,9	46	2,6	7,8	11	1	19	0,6	5,4	7,3	0,6	0,27	12	3,3	
F proto- nodular/ pisolítica	865	140	44	68	40	26	45	53	161	14	8	10	4,3	11	2,8	5,2	5	1,8	12	0,3	2,8	4,5	<0,5	0,15	9,2	3,4	
F maciça	1001	1232	61	69	66	28	165	66	34	45	8	11	4,8	13	4,1	7,2	13	1,2	2,2	0,7	0,4	1,7	2,4	0,06	4,1	1,4	
Saprólito	1137	1402	65	65	83	32	208	81	38	74	10	13	6	20	4,7	9,2	21	6,5	2	1	0,4	1,5	4,6	0,02	1,7	1,3	
Perfil 2																											
Solo	2531	9,4	441	187	95	119	16	325	80	21	248	7	36	0,9	41	19	4	1,3	2,9	1,3	1,8	0,4	<0,5	0,14	0,1	<0,5	
H ₂ desman- telado (F)	746	5,1	166	156	32	35	5,2	175	80	11	83	3	21	0,7	13	5,8	1	<0,5	18	0,3	3,4	0,3	<0,5	0,19	0,5	2,8	
H ₂ desman- telado (M)	2219	7,5	443	175	87	103	11	294	61	16	382	6	36	2,2	41	16	76	1,2	3,7	2,9	1,7	80	<0,5	0,06	0,1	0,9	
Crosta																											
Fproto- nodular	512	1,2	151	136	21	26	1,9	319	304	14	57	4	19,8	45	12	5,8	3	0,6	44	0,1	18	2,4	<0,5	0,67	7,4	8,5	
F maciça	445	2,1	181	110	29	25	3,3	127	30	10	54	3	15	7,5	17	4,8	2	1,1	10	0,1	2,8	1,8	<0,5	0,24	1,9	6,8	
Saprólito	823	1,1	267	111	53	43	1,7	101	12	8,1	90	3	18	5	24	8,3	2	0,7	6,1	0,3	1,3	0,6	<0,5	0,06	1	2,6	
Perfil 3																											
Solo	1308	41	54	54	21	40	39	48	65	18	7	8	4,3	2,7	3,8	4,6	2	1,1	1	0,8	0,3	0,5	<0,5	0,19	<0,1	1,3	
Topo do H ₂ M (F)	1076	37	51	71	35	31	21	50	29	8,9	20	10	4,8	1,3	3,6	5,5	2	0,9	2,7	0,5	0,3	0,4	<0,5	0,25	0,3	0,6	
Topo do H ₂ M (M)	1158	48	53	53	17	34	39	44	63	15	7	8	4,3	2,4	3,8	3,8	2	1,1	0,9	1,2	0,2	0,9	<0,5	0,12	0,1	1,2	
H ₂ mos- queado	1192	83	47	52	18	34	58	42	80	13	5	8	4,2	4	3,3	3,5	0,1	2,8	1,4	0,7	0,4	0,5	0,6	0,1	0,1	0,7	
H ₂ mos- queado	744	89	33	39	26	22	59	32	67	15	4	7	2,3	3,1	2,3	3,1	1	5,7	<0,5	0,3	0,2	0,1	0,6	0,02	0,1	1,1	
Saprólito (F argilosa)	432	752	28	37	37	13	207	23	236	13	6	11	3,1	8,6	2,2	8,1	4	38	8,3	3,2	0,5	7,7	2,8	0,01	0,5	1,7	
Saprólito (F arenosa)	348	80	13	1,6	11	10	35	6,4	21	9,7	<1	1	0,5	1,2	0,9	0,9	1	0,7	<0,5	0,2	0,1	0,9	<0,5	<0,01	0,1	0,7	
¹ Média crustal	150	580	20	26	30	3	300	10	150	1000	2	13	1	10	0,45	2,5	80	150	2	75	1,5	50	25	0,02	0,1	3	

Elementos abaixo do limite de detecção: Cd (<0,1), Bi (<0,1), Ag (<0,1), Tl (<0,1), Se (<0,5), Cs (<0,5) e Be (<1 ppm). Rose et al. (1979)¹.

mantelado onde diminuíram três ou quatro vezes (Tab. 6). As razões La_N/Lu_N (entre 5 e 16) revelam enriquecimento acentuado dos terras raras leves (ETRL) em

relação aos pesados (ETRP), com valores mais altos na porção inferior do perfil (saprólito e fácies maciça) e mais baixos na superior (fácies pisolítica, desmantelado

Figura 5 - Distribuição dos elementos-traço no perfil 1. Hz – horizonte; Fc – fácies; F – fragmentos. Os valores dos elementos-traços da matriz do horizonte desmantelado estão na tabela 5.

e solo). O paralelismo das curvas dos ETR em relação aos condritos demonstra a forte correlação química entre os horizontes (Fig. 6).

PERFIL 2 - PERFIL SOBRE GRANITOS DA SUÍTE MAPUERA

Estruturação do perfil e mineralogia A diferença de estrutura deste perfil em relação ao anterior está restrita à espessura de cada horizonte. A crosta do perfil 2 é menos espessa (5 m) que do perfil 1, enquanto o horizonte desmantelado (2 m) e o solo (5,5 m) mais espessos. A crosta é formada pelas fácies maciça, protonodular e nodular e difere da crosta do perfil anterior pela ausência de córtex goethítico nos nódulos (Fig. 2 e 3). Quanto à mineralogia os dois perfis são muito semelhantes. Caulinita, gibbsita, hematita, goethita, quartzo e anatásio também são os minerais essenciais deste perfil, entretanto, ele difere do anterior por apresentar cerca de 80% de caulinita na matriz do horizonte desmantelado e no solo (Tab. 3). Neste perfil, bem como o sobre a rocha vulcânica (perfil 1), a fácies protonodular é a mais ferruginosa.

Composição química A composição química deste perfil é semelhante à do perfil 1 mas com teores ligeiramente inferiores de Al_2O_3 , P.F. e TiO_2 (Fig. 4). Apesar de conter, em média, menos Fe_2O_3 que o perfil 1, sua crosta e fragmentos possuem maior teor nesse constituinte, principalmente onde a textura é protonodular. Este perfil possui, em média, três vezes mais SiO_2 que o perfil 1 (Tab. 4), mas também é pobre em álcalis e P_2O_5 , que ocorrem frequentemente abaixo do limite de detecção.

Elementos-traço Zr, Th, Nb, Ga, Hf, Sn, Y, W, Ta, e U são mais elevados que a média crustal, V, Mn, Pb, Sc, Zn, Cu, Sr, Ba, Rb e Ni menos, enquanto As, Mo, Hg, Sb e Au ocorrem na mesma ordem de grandeza dela (Tab. 5). Os elementos-traço deste perfil predominam nos mesmos horizontes que no anterior (matriz do desmantelado e solo) e em concentrações similares, exceto Th em média o dobro do perfil 1 (101 – 325 ppm), Ba que está abaixo de 10 ppm e Cu é mais de 130 vezes mais abundante na matriz do horizonte desmantelado deste perfil (80 ppm) que do anterior. Os teores de V, Pb, As, Mo e Sb são equivalentes ao do perfil 1 e têm a mesma distribuição, ou seja, são mais abundantes na

Tabela 6 - Composição química, em ppm, dos elementos terras raras em amostras representativas dos perfis estudados. Fc – fácies; Hz – horizonte; HzM - horizonte mosqueado; F - fragmentos; M - matriz.

Amostra	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣETRL	ΣETRP	ΣETR	La _N /Lu _N	La _N /Eu _N	Gd _N /Lu _N	Eu/Eu*
Perfil 1																					
Solo	143	271	26	82	12	2,0	9,4	1,9	14	3,3	12	2,2	17	2,9	537	62	599	5,18	16,85	0,41	0,55
Hz desmantela do (F)	19	27	2	8	1	0,2	0,9	0,2	1	0,3	1	0,2	2	0,3	57	5,7	63	7,11	19,08	0,40	0,74
Hz desmantela do (M)	148	275	27	82	13	2,0	9,6	2,0	15	3,3	12	2,1	16	2,7	547	63	610	5,64	17,78	0,44	0,51
Crosta																					
F pisolítica	59	105	10	31	5	0,8	3,7	0,8	6	1,2	4	0,8	6	1,0	210	24	234	6,02	18,29	0,46	0,53
F protonodular/psolítica	51	93	11	38	8	1,3	5,6	1,2	8	1,7	6	1,0	7	1,0	202	31	233	5,41	9,62	0,72	0,56
F protonodular/psolítica	109	132	18	52	7	1,1	4,5	1,0	6	1,3	5	0,8	6	1,0	320	25	345	11,71	22,76	0,57	0,57
F maciça	199	307	37	125	19	2,9	14	2,3	12	2,3	7	1,2	8	1,3	690	49	739	15,74	16,20	1,35	0,52
Saprólito	251	483	50	168	25	3,7	16	3,0	16	3,0	9	1,5	11	1,7	980	61	1042	15,39	15,98	1,20	0,53
Dacito ¹	34	78	n.a	31	4,8	1	2,7	n.a	1,9	0,4	0,8	n.a	0,6	0,1							
Perfil 2																					
Solo	14	31	2,8	9,7	3,0	0,4	5,0	1,7	13	3,2	13	2,5	20	3,2	61	61	122	0,44	7,93	0,19	0,32
Hz desmantela do (F)	7	14	1,2	4,7	1,0	0,1	1,5	0,5	4	1,1	4	0,8	6	1,1	28	19	47	0,69	11,86	0,17	0,36
Hz desmantela do (M)	12	29	2,5	8,8	2,5	0,3	4,5	1,5	12	2,9	11	2,3	17	2,9	55	54	109	0,43	10,34	0,19	0,25
Crosta																					
F protonodular	5	9	0,8	2,4	0,6	0,1	1,0	0,3	3	0,7	3	0,6	5	0,9	18	13	31	0,62	20,16	0,15	0,23
F maciça	3	5	0,4	1,2	0,4	0,1	0,9	0,3	3	0,8	4	0,7	6	1,0	10	17	27	0,30	13,76	0,11	0,25
Saprólito	3	8	0,5	1,7	0,7	0,1	1,6	0,6	6	1,6	7	1,4	12	2,0	14	31	45	0,14	9,15	0,10	0,20
Biotita granito ²	37	97	n.a	33	7	0,26	4,8	n.a	6,6	1,5	4,7	n.a	6	0,78							
Perfil 3																					
Solo	46	76	7	22	3,3	0,7	2,6	0,4	3,1	0,7	2,4	0,4	3,4	0,6	155	14	169	8,04	15,49	0,54	0,71
Topo do HzM (F)	46	86	8	22	4,0	0,6	3,0	0,7	4,8	1,2	4,3	0,8	5,9	1,0	167	21,7	188	4,99	17,77	0,39	0,52
Topo do HzM (M)	56	90	7	24	3,4	0,7	2,2	0,4	2,8	0,6	2,1	0,4	3,1	0,5	181	12	194	11,71	19,39	0,54	0,73
HzM	78	132	11	37	5,4	1,1	3,4	0,5	3,1	0,6	2,2	0,4	3,1	0,6	265	14	278	14,63	17,34	0,76	0,71
HzM	87	168	11	31	4,7	0,9	3,0	0,6	3,9	0,8	2,9	0,5	3,5	0,6	302	16	318	16,36	22,85	0,68	0,68
Saprólito (F argilosa)	120	312	40	170	30	5,9	18	2,5	10	1,5	4,0	0,7	4,6	0,7	677	42	719	18,10	4,88	3,18	0,73
Saprólito (F arenosa)	16	33	3	13	2,6	0,5	2,2	0,4	2,0	0,4	1,2	0,2	1,5	0,2	69	8,1	77	8,06	8,06	1,31	0,60
Media crustal ³	30	60	8,2	28	6	1,2	5,4	0,9	3	1,2	2,8	0,5	3	0,5							

Dacito (CPRM, 2000)¹, biotita granito (Lenharo *et al.*, 2000)², média da crosta continental (Taylor, 1964)³. n.a = elemento não analisado.

Figura 6 - Padrão de distribuição dos elementos terras raras nos perfis 1, 2 e 3. ○ – saprólito; ◆ – horizonte mosqueado; ● – crosta; □ – fragmentos do horizonte desmantelado; × – matriz do horizonte desmantelado; Δ – solo.

fácies protonodular (Fig. 7).

O conteúdo de ETR neste perfil é, em média, dez vezes menor que no anterior (Tab. 6). Er, Tm, Yb e Lu ocorrem acima da média crustal, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd e Tb abaixo, enquanto Dy e Ho estão presentes na mesma ordem de grandeza que ela (Fig. 6). Praticamente não há diferença entre o conteúdo de ETR leves (49%) e pesados (51%) no perfil; concentram-se no solo ($\Sigma\text{ETR} = 122$ ppm) e na matriz argilosa do horizonte desmantelado ($\Sigma\text{ETR} = 109$ ppm), onde se destacam Ce e Yb. Ao contrário do perfil 1, houve empobrecimento dos ETRL em relação aos ETRP, conforme indica a razão La_N/Lu_N (0,14 a 0,69). Esta razão chega a ser mais de cem vezes menor que no perfil 1 e, ao contrário dele, aumenta da base para o topo.

PERFIL 3 - PERFIL SOBRE A FORMAÇÃO PROSPERANÇA

Estruturação do perfil e mineralogia Não há na região exposição de um perfil completo sobre essa unidade. Para o compor foram utilizadas duas exposições distantes 5 km e que correspondem ao topo e base de uma colina. A estrutura do perfil difere dos anteriores por apre-

sentar horizonte bauxítico incipiente, crosta ferruginosa colunar mais espessa (Fig. 2) e é marcante a ausência de horizonte desmantelado sobre a crosta. O saprólito preserva parcialmente a laminação do protólito e níveis de “pedras-de-ferro” constituídos por areia quartzosa muito fina cimentada por óxi-hidróxidos de Fe são frequentes. É um horizonte rico em caulinita (71%) intercalado por níveis quartzosos (95%). A presença de muscovita (7%) e illita (3%) no saprólito diferencia este perfil dos do Pitanga (Tab. 3). O espesso horizonte mosqueado (6 m) é uma característica marcante deste perfil. É constituído, em média, por mais de 80% de caulinita e apresenta porções ferruginosas e aluminosas que se tornam mais endurecidas em direção ao topo para formar a crosta. Esta tem 4 m de espessura, é ferro-aluminosa, vermelha com porções cinza escura, colunar a protonodular incipiente e cortada por fissuras preenchidas por argila caulínítica (< 88%). É composta por hematita+goethita (52%), gibbsita (< 33%) e quartzo (< 15%). A gibbsita forma agregados rosados na superfície das colunas ferruginosas (Fig. 3), especialmente na base da crosta. Nas encostas, a crosta está ausente e o solo assenta-se sobre o topo do mosqueado. O solo (6 m), que também recobre a crosta no topo do platô, é mais espesso que nos perfis 1 e 2 e tem contato brusco tanto com a crosta quanto com o mosqueado (perfil truncado). É argilo-arenoso, amarelo-avermelhado a cinza no topo e composto por matriz caulínítica (89%) e fragmentos gibbsíticos alongados (2 cm) e hematíticos arredondados (1 cm), que desaparecem gradativamente para o topo.

Composição química Este perfil, assim como os demais, é composto principalmente de Al_2O_3 , Fe_2O_3 e SiO_2 (Fig. 4). Os teores de Al_2O_3 são menores que nos perfis 1 e 2, SiO_2 maiores, enquanto os de Fe_2O_3 equivalentes. Assim como nos perfis 1 e 2, o Fe_2O_3 (51%) ocorre como hematita e goethita na crosta (colunar e protonodular), entretanto, nesta, Al_2O_3 e SiO_2 estão relacionados sobretudo a caulinita, exceto nos fragmentos gibbsíticos alongados do horizonte desmantelado, onde Al_2O_3 predomina com 58% e o SiO_2 não atinge 7% (Tab. 4). Os teores de TiO_2 são os mesmos nos três perfis, entretanto, MgO e K_2O são mais elevados neste (fácies argilosa do saprólito) em consequência da presença de illita e muscovita. Não há dados sobre a composição química da rocha-mãe desse perfil.

Elementos-traço A maioria (Ba, Y, Sr, Rb, Sc, Pb, Ni, Cu, Co, Mn e Zn) encontra-se em teores abaixo da média crustal e somente Zr, Hf, Ta, Th, Nb e Ga acima (Tab. 5). As maiores variações ocorrem nas fácies arenosa do saprólito, geralmente com baixo conteúdo de traços, e na argilosa, mais abundante em Ba, Sr e V (Fig. 8). Os elementos-traço ocorrem, de modo geral, em teores inferiores aos dos perfis 1 e 2, pois derivam de rochas sedimentares normalmente pobres nesses elementos. Os mais abundantes na crosta desse perfil são Zr (220 – 1500 ppm), V (5 – 560 ppm) e Mn (10 – 450 ppm), os menos Ba, Cu, Co, Mo, Ni, Pb, As, Sc, Y, Nb e U (< 20 ppm), enquanto Ga, Cr e Zn ocorrem em teores intermediários. O conteúdo de ETR é superior ao do perfil 2, mas inferior

Figura 7 - Distribuição dos elementos-traço no perfil 2. Os valores dos elementos-traços da matriz do horizonte desmantelado estão na tabela 5. Hz – horizonte; Fc – fácies; F – fragmentos.

ao do perfil 1. Dentre os ETR, apenas Ce e La ocorrem acima da média crustal, enquanto os demais são equivalentes a ela (Tab. 6). Predominam na fácies argilosa do saprólito ($\Sigma\text{ETR} = 719$ ppm) e são escassos na arenosa ($\Sigma\text{ETR} = 77$ ppm), com diminuição dos teores para o topo. Os ETRL estão enriquecidos em relação aos ETRP, como ocorre no perfil 1 (Fig. 6), sendo a razão La_N/Lu_N levemente mais acentuada neste perfil (8,04 – 18,1) com tendência a diminuir da base para o topo.

TRATAMENTO ESTATÍSTICO Neste estudo não foi considerada a crosta do perfil 3 pois somente alguns elementos-traço foram analisados. Os resultados mostram que 57,15% da variância total das cargas dos elementos químicos considerados neste estudo (Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , K_2O , TiO_2 , Zr, Ba, Nb, Ga, Y, Hf, Sr, Th, V, Sn, Pb, Ta, As e ETR) pode ser explicada por fatores relacionados às componentes principais 1 (33,85%) e 2 (23,3%). Com a extração dos 10 fatores mais significativos é alcançada 99,7% da representatividade dos resultados. A análise de componentes principais (ACP) identificou três associações geoquímicas (Fig. 9a) que podem estar relacionadas a três grupos de amostras (Fig.

9b). A associação geoquímica 1 (SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , Ba, Sr e ETRL) representa, principalmente a composição química do saprólito, mosqueado (perfil 3) e de parte das amostras da crosta (perfil 1), designadas de grupo 1, onde ocorrem como caulinita, gibbsita (perfis 1 e 2), illita, muscovita e quartzo (perfil 3). A associação 2 (V, Pb, Fe_2O_3 e As) representa os que se concentram principalmente na crosta laterítica (perfis 1 e 2), rica em óxi-hidróxidos de ferro (hematita e goethita), e também nos fragmentos gibbsíticos com hematita (perfil 2) que compõem o grupo 2 (crosta e fragmentos). A associação 3 (Ga, Th, Ta, Sn, Nb, Hf, Zr, Y, Ti, ETRP) reflete principalmente a composição do solo e matriz (grupo 3), onde ocorrem em teores mais elevados e estão relacionados aos resistatos (zircão, columbita, thorita, xenotima etc.) acumulados residualmente e ao anatásio, TiO_2 (Fig. 9a).

INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES A potencialidade econômica das rochas do embasamento da Amazônia brasileira como geradoras de bauxitas já havia sido apontada por Costa *et al.* (1988). Outros estudos no NE do Amazonas (Horbe *et al.* 2001) constataram também potencial nas ro-

Figura 8 - Distribuição dos elementos-traço no perfil 3. Os valores dos elementos-traços dos fragmentos do topo do mosqueado estão na tabela 5. Fc – fácies; Hz – horizonte; HzM – horizonte mosqueado; M – matriz.

chas sedimentares paleozóicas. Essas duas informações transformaram a porção nordeste do Amazonas em uma fronteira a ser pesquisada para esse bem mineral. Este trabalho, além de confirmar esse potencial, mostra que apesar dos protólitos serem distintos, as características da bauxita gerada pelas rochas ígneas do Pitinga são similares as de Paragominas, Trombetas/Nhamundá e Juruti no Pará (Boulangé & Carvalho 1997; Kotschoubey *et al.* 1997, Lucas 1997, Kotschoubey *et al.* 2005b). Os teores de Al_2O_3 entre 50 e 60%, SiO_2 entre 1 e 4%, Fe_2O_3 entre 1 e 7% e TiO_2 próximo a 2% atestam a qualidade industrial da bauxita do Pitinga, conforme especificação de Ramos (1982) (Al_2O_3 50-60%, SiO_2 reativa < 5%, Fe_2O_3 < 3,75% e < 4% de TiO_2).

A crosta bauxítica derivada das rochas vulcânicas (perfil 1) é mais espessa que a sobre granitos (perfil 2), estão dentro dos padrões encontrados no leste da Amazônia. A maior espessura da crosta sobre as vulcâ-

nicas se deve a textura afanítica da rocha em relação a dos granitos e também pela tendência de parte do SiO_2 ocorrer como vidro nesse tipo de rocha, o que facilita a transformação mineralógica.

A nodulação incipiente logo acima do contato entre o saprolito e a crosta, os inúmeros pisólitos ferruginosos com borda concêntrica de gibbsita e a presença de manchas amareladas goethíticas, principalmente na parte inferior da crosta dos perfis 1 e 2, sugerem que a variedade de fácies das crostas desses perfis resultam da evolução progressiva do intemperismo com intensa percolação de fluidos transportando ferro e alumínio. Um fato relevante, também observado nos perfis 1 e 2, é a fácies protonodular na porção intermediária da crosta ser o material mais ferruginoso. Essa maior ferruginização da porção intermediária da crosta também foi observada nas bauxitas desenvolvidas sobre a Formação Itapecuru (Kotschoubey *et al.* 2005a) e parece

Figura 9 - Análises de componente principal. (a) distribuição dos elementos e (b) amostras no plano-fatorial (CP1 X PC2). O – saprólito; ♦ - horizonte mosqueado; ● – crosta; □ - fragmentos do horizonte dismantelado; × - matriz do horizonte dismantelado; Δ - solo. 1 – perfil 1 sobre vulcânicas; 2 – perfil 2 sobre granitos; 3 – perfil 3 sobre rochas sedimentares.

ser uma característica comum nesse tipo de material na Amazônia.

Apesar da ausência de horizonte mosqueado nos perfis 1 e 2, o que indica condições hidrolíticas severas no desenvolvimento das crostas, Costa *et al.* (1988) encontraram esse horizonte nos perfis desenvolvidos a partir das rochas vulcânicas a sul da área estudada. Isso sinaliza variações regionais nas condições de lixiviação e justifica a ausência de horizontes bauxíticos em outras porções da área. Fato similar foi constatado em perfis sobre outros tipos de rochas (Aleva 1979, Soler & Lasaga 2000, Lopes & Carvalho 1990). Com base no exposto, pode-se considerar que a bauxitização incipiente

observada no perfil 3 não significa que em outros locais da região não possa ocorrer horizonte bauxítico mais espesso sobre a Formação Prosperança, contudo a pequena exposição areal dessa unidade (Fig. 1) pode ser um fator limitante para o seu melhor desenvolvimento e preservação quando comparado com os perfis sobre as rochas ígneas. A variedade de protólitos submetidos aos agentes controladores do intemperismo como paleoclima, vegetação, relevo e condições de drenagem, com desenvolvimento de bauxita, é consequência do intemperismo ser de escala regional. Isto explica também a ocorrência de espessos horizontes bauxíticos sobre rochas de uma mesma unidade em uma área e sua ausência em locais relativamente próximos.

Assim como em outros locais da Amazônia, o intemperismo no NE do Amazonas gerou crostas aluminosas e ferruginosas *in situ*, uma vez que mostram forte correlação entre seus elementos químicos e os materiais de cada horizonte, especialmente os ETR. A semelhança química entre o saprólito dos perfis 1 e 2 com a parte aluminosa da respectiva crosta e os fragmentos do perfil 1 é consequência da intensa lixiviação que afeta a rocha mãe e neoforma gibbsita. O teor mais elevado de SiO_2 no solo do perfil 3 que nos demais agrupa este horizonte ao saprólito e mosqueado dos perfis 1 e 2. Os teores de TiO_2 e P_2O_5 na crosta do perfil 3 são similares aos obtidos por Kotschoubey *et al.* (2005a) nas bauxitas formadas a partir das rochas sedimentares da Formação Itapecuru. O mesmo ocorre, em média, com Zr, Ba, Sr, V, Nb, Ga, Y, Hf, Th e ETR.

Com o avanço do intemperismo, especialmente SiO_2 e álcalis foram lixiviados dos aluminossilicatos, enquanto V, Pb, Fe_2O_3 e As concentraram-se na crosta e seus fragmentos ricos em óxi-hidróxidos de ferro (hematita e goethita), conforme aponta o modelo proposto por diversos pesquisadores (Kotschoubey & Truckenbrodt 1981, Kronberg *et al.* 1982, Truckenbrodt *et al.* 1982, Costa 1997, Tardy & Roquin 1998, Kotschoubey *et al.* 2005b entre outros). A associação Ga, Th, Ta, Sn, Nb, Hf, Zr, Y, Ti e ETRP indica que as rochas ígneas, inicialmente com teores elevados nesses elementos, os concentraram ainda mais durante o intemperismo, especialmente na matriz dos perfis 1 e 2. Os conteúdos mais elevados nesses elementos no perfil 2 em relação ao perfil 3 é consequência da intensa especialização dos granitos do Pitinga para Sn, Zr, Nb, Y e ETR (Horbe & Costa 1999, Costi *et al.* 2002).

As idades da lateritização na Amazônia ainda não foram plenamente estabelecidas, as mais precisas resultam de dados geocronológicos em crostas lateríticas manganíferas de Carajás (Vasconcelos *et al.* 1994, Ruffet *et al.* 1996, Costa *et al.* 2005) e paleomagnéticos em crostas ferruginosas e aluminosas da Guiana Francesa e Suriname (Théveniaut & Freyssinet 1999 e 2002). Elas indicam formação entre 65 e 70 Ma (Cretáceo Superior-Paleoceno) e marcariam o primeiro episódio de bauxitização. Essa informação indica que o desenvolvimento de crostas lateríticas sobre diversos protólitos iniciou no Paleógeno e que o norte do Amazonas esteve exposto a esse processo, assim como grande parte da Amazônia

(Boulangé & Carvalho 1997, Costa 1997, Lucas 1997, Kotschoubey *et al.* 1997 e 2005b). Atualmente a região está dissecada pelos processos erosivos, é caracterizada por platôs mais altos e extensos sobre as rochas do embasamento, enquanto as unidades mais jovens, com platôs topograficamente mais baixos e menores, estão em sua maior parte sustentados por perfis truncados.

Agradecimentos Os autores agradecem ao Grupo Parapanema S/A que permitiu a pesquisa na mina do Pitanga, a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) que concedeu bolsa de mestrado ao primeiro autor e ao CNPq (processo n°. 472426/2004-4) responsável pelo auxílio financeiro à pesquisa.

Referências

- Aleva G.J.J. 1979. Bauxitic and other duricrusts in Suriname: a review. *Geol. Mijnbouw*, **58** (3):321-336.
- Anand R.R. & Butt C.R.M. 2003. Distribution and evolution of 'laterites' and lateritic weathering profiles, Darling Range, Western Australia. *Australian Geomechanics*, **38**:41-58.
- Anand R.R. & Gilkes R.J. 1987. The association of maghemite and corundum in Darling Range laterites, Western Australia. *Australian Journal of Soil Research*, **35**:303-11.
- Angélica R.S. & Costa M.L. 1991. Associações geoquímicas nos lateritos superficiais do Complexo de Maicuru, Estado do Pará. *Geochimica Brasiliensis*, **5**:101-115.
- Angélica R.S. & Costa M.L. 1993. Geochemistry of rare-earth elements in surface lateritic rocks and soils from the Maicuru Complex, Pará, Brazil. *Jour. Geochem. Explor.*, **47**:165-182.
- Beissner H., Carvalho A., Lopes L.M., Valetton I. 1997. The Cataguazes Bauxite Deposit. In: Carvalho A., Boulangé B., Melfi A.J., Lucas Y. (eds.) *Brazilian Bauxites*. São Paulo, USP/FAPESP/ORSTOM, p. 195-208.
- Boulangé B. & Carvalho A. 1997. The bauxite of Porto Trombetas. In: Carvalho A., Boulangé B., Melfi A.J., Lucas Y. (eds.) *Brazilian Bauxites*. São Paulo, USP/FAPESP/ORSTOM, p. 55-73.
- Costa M.L. 1991. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. *Rev. Bras. Geoc.*, **21**(2):146-160.
- Costa M.L. 1997. Lateritization as a major process of ore deposit formation in the Amazon region. *Explor. Mining Geol.*, **6**:79-104.
- Costa M.L., Angélica R.S., Costa N.C. 1999. The geochemical association Au-As-B-W-Cu-Sn in latosol, colluvium, lateritic iron crust and gossan in Carajás, Brazil: its importance for identification of primary ore. *Jour. Geochem. Explor.*, **67**:33-49.
- Costa M.L. & Araújo E.S. 1996. Application of multi-element geochemistry in Au-phosphate-bearing lateritic crust for identification of their parent rocks. *Jour. Geochem. Explor.*, **57**:257-272.
- Costa M.L., Costa J.A.V., Angélica R.S. 1993. Gold-bearing bauxitic laterite in a tropical rain forest climate: Cassiporé, Amapá, Brazil. *Chron. Rech. Min.*, **510**:41-51.
- Costa M.L., Fernandes O.J.C., Requelme M.E.R. 2005. O depósito de manganês do Azul, Carajás: estratigrafia, mineralogia, geoquímica e evolução geológica. In: Marini O.J., Queiroz E.T., Ramos B.V. (eds.) *Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. Brasília, DNPM-CT/Mineral-ADIMB, p. 227-333.
- Costa M.L., Horbe M.A., Horbe A.M.C., Teixeira J.T., Costa W.A.M. 1988. A região laterítica bauxítica do Pitanga-AM. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 35, Belém, *Resumos*, **1**:22-26.
- Costi H.T., Dall'agnol R., Borges R.M.K., Minuzzi O.R.R., Teixeira J.T. 2002. Tin-Bearing Sodic Episyenites Associated with the Proterozoic, A-type Água Boa Granite, Pitanga Mine, Amazonian Craton, Brazil. *Gondwana Research*, **5**(2):435-451.
- Costi H.T., Dall'agnol R., Moura C.A.V. 2000. Geology and Pb-Pb geochronology of Paleoproterozoic volcanic and granitic rocks of Pitanga Province, Amazonian craton, Northern Brazil. *Inter. Geol. Rev.*, **43**:832-849.
- CPRM 2000. Programas Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. *Caracará, Folhas NA.20-Z-B e NA.20-Z-D inteiras e parte das folhas NA20-Z-A, NA-21-Y-C e NA.21-Y-A*. Estado de Roraima. Brasília, escala 1:500.000.
- CPRM 2001. Excursão científica no trecho Manaus - Boa Vista. Manaus, *Guia de Excursão*, Divulgação Interna, CPRM, [s.ident], 99p.
- Cunha P.R.C., Gonzaga F.G., Coutinho L.F.C., Feijó F.J. 1994. Bacia do Amazonas. PETROBRÁS, *Bol. Geoc.*, **8**:47-55.
- Davy R. 1979. *A study of laterite profiles in relation to bed-rock in the Darling Range, near Perth, W.A.* Geological Survey of Western Australia, Report 8, 87p.
- Dennen W.H. & Norton H.A. 1977. Geology and geochemistry of bauxite deposits in the lower Amazon basin. *Econ. Geol.*, **72**:82-89.
- Fernandes Filho L.A., Costa M.L., Costa J.B.S. 1997. Registros neotectônicos nos lateritos de Manaus. *Rev. Geoc.*, **16**(1):9-32.
- Grubb P.L.C. 1979. Genesis of bauxite deposits in the lower Amazon basin and Guianas coastal plain. *Econ. Geol.*, **74**:735-750.
- Guimarães D. & Coelho T.S. 1945. *Bauxita do Morro do Cruzeiro, Ouro Preto, MG*. Boletim Divisão de Fomento da Produção Mineral, DNPM, **67**:1-40.
- Hickmann A.H., Smurthwaite A.J., Brown I.M., Davy R. 1992. *Bauxite mineralization in the Darling Range, Western Australia*. Geological Survey of Western Australia, Report 33.
- Horbe A.M.C. & Costa M.L. 1999. Geochemical evolution of a lateritic Sn-Zr-Th-Nb-Y-REE-bearing ore body derived from apogranite: the case of Pitanga, Amazonas – Brasil. *Jour. Geochem. Explor.*, **66**:339-351.
- Horbe A.M.C., Nogueira A.C.R., Horbe M.A., Costa, M.L., Suguio K. 2001. A laterização na gênese das superfícies de aplainamento da região de Presidente Figueiredo, Balbina, nordeste do Amazonas. In: Reis N., Monteiro,

- M.A. (Org.) *Contribuições à Geologia da Amazônia*. Manaus, vol. 2, p.148-176.
- Kotschoubey B., Calaf J.M.C., Lobato A.C.C., Leite A.S., Azevedo C.H.D. 2005a. Caracterização e gênese dos depósitos de bauxita da Província Bauxitífera de Paragominas, noroeste da bacia do Grajaú, nordeste do Pará/oeste do Maranhão. In: Marini O.J., Queiroz E.T., Ramos B.V. (eds.) *Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. Brasília, DNPM-CT/Mineral-ADIMB, p. 691-782.
- Kotschoubey B. & Truckenbrodt W. 1981. Evolução poligênica das bauxitas do distrito de Paragominas – Açailândia (estados do Pará e Maranhão). *Rev. Bras. Geoc.*, **11**:193-202.
- Kotschoubey B., Truckenbrodt W., Calaf J.M.C. 2005b. Evolução Geológica da porção meridional da província bauxitífera de Paragominas durante o Neógeno/Pleistoceno (nordeste da Bacia do Grajaú, nordeste do Pará e extremo oeste de Maranhão). *Rev. Bras. Geoc.*, **35**(2):263-272.
- Kotschoubey B., Truckenbrodt W., Heironimous B. 1997. Bauxite Deposits of Paragominas. In: Carvalho A., Boulangé B., Melfi A.J., Lucas Y. (eds.) *Brazilian Bauxites*. São Paulo, USP/FAPESP/ORSTOM, p.75-116.
- Kronberg B.I., Cuoston J.F., Stilianidi Filho B., Fyfe W.S., Nash R.A., Sugden D. 1979. Minor element geochemistry of the Paragominas bauxite, Brazil. *Econ. Geol.*, **74**:1869-1875.
- Kronberg B.I., Fife W.S., Mckinnon B.J., Couston J.F.C., Stilianidi Filho B., Nash R.A. 1982. Model for bauxite formation: Paragominas (Brasil). *Chem. Geol.*, **35**:311-320.
- Lenharo S.L.R., Pollard P.J., Born H. 2000. Matrix rock texture in the Pitinga topaz granite, Amazonas, Brazil. *Rev. Bras. Geoc.*, **30**:238-241.
- Lenharo S.R.L., Pollard P.J., Born H. 2003. Petrology and textural evolution of granites associated with tin and rare-metals mineralization at the Pitinga mine, Amazonas, Brazil. *Lithos*, **66**:37-61.
- Lopes L.M. & Carvalho A. 1990. Gênese da bauxita de Mirai, MG. *Rev. Bras. Geoc.*, **19**(4):462-469.
- Lucas Y. 1997. The Bauxite of Juruti. In: Carvalho A., Boulangé B., Melfi A.J., Lucas Y. (eds.) *Brazilian Bauxites*. São Paulo, USP/FAPESP/ORSTOM, p.107-133.
- Mutakyahwa M.K.D., Ikingura J.R., Mruma A.H. 2003. Geology and geochemistry of bauxite in Lushoto district, Usambara Mountains, Tanzania. *Journal of African Earth Science*, **36**:357-369.
- RADAMBRASIL. 1978. *Projeto RADAMBRASIL, Folha AS-20, Manaus*. Rio de Janeiro, DNPM/MME, 567p.
- Ramos C.R. 1982. *Perfil analítico do alumínio*. Brasília, DNPM, Boletim 55, 152p.
- Rose A.W., Hawkes H.E., Webb J.S. 1979. *Geochemistry in mineral exploration*. 2ed., New York, Academy Press, 657p.
- Ruffet G., Innocent C., Michard A., Feraud G., Beauvais A., Nahon D., Hamelin B. 1996. A geochronological $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$ study of K-Mn oxides from the weathering of Azul, Brazil. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **60**:2219-2232.
- Sadler S.B. & Gilkes R.J. 1976. Development of bauxite in relation to parent material near Jarrahdale, Western Australia. *Journal of the Geological Society of Australia*, **23**:333-44.
- Schulmann A., Carvalho A., Valetton I. 1997. Bauxite of Poços de Caldas. In: Carvalho A., Boulangé B., Melfi A.J., Lucas Y. (eds.) *Brazilian Bauxites*. São Paulo, USP/FAPESP/ORSTOM, p. 229-254.
- Soler J.M. & Lasaga A.C. 2000. The Los Pijiguas bauxite deposit (Venezuela): A compilation of field data and implications for the bauxitization process. *Journal of South American Earth Sciences*, **13**:47-65.
- Tardy Y. & Roquin C. 1998. *Dérive des continents, paléoclimats et altérations tropicales*. BRGM, Orléans, France, 473p.
- Taylor S.R. 1964. The abundance of chemical elements in the continental crust – a new table. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **38**:1415-1433.
- Théveniaut H. & Freyssinet Ph. 1999. Paleomagnetism applied to lateritica profiles to assess saprolite and duricrust formation processes: the example of the Mont Bauduel profile (French Guiana). *Paleogeogr., Paleoclim., Paleoeco.*, **148**:209-231.
- Théveniaut H. & Freyssinet Ph. 2002. Timing of lateritization of the Guiana Shield: synthesis of paleomagnetic results from French Guiana and Suriname. *Paleogeogr., Paleoclim., Paleoeco.*, **178**:91-117.
- Truckenbrodt W., Kotschoubey B., Góes A.M. 1982. Considerações a respeito da idade das bauxitas na parte leste da região Amazônica. In: SBG/Norte, Simp. Geol. Amaz., 1, *Anais*, p. 201-209.
- Vasconcelos P.M., Renne P.R., Brimhall G.H., Becker T.A. 1994. Direct dating of weathering phenomena by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and K-Ar analysis of supergene K-Mn oxides. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **58**:1635-1665.

Manuscrito ID 10528

Submetido em 12 de fevereiro de 2008

Aceito em 20 de junho de 2008

Sistema eletrônico de submissão