

**MOBILIDADE DE ELEMENTOS TERRAS RARAS EM METABASALTOS DE
BAIXO (CRIXÁS) E ALTO (CHAPADA) GRAUS METAMÓRFICOS**

R.M. Kuyumjian

ABSTRACT

Qualitative evaluation of altered mafic pillows, from the Crixás greenstone belt, and epidotised metabasalts, from the Chapada sequence, reveals that, for low-grade metamorphism, the rare earth elements are immobile while, for high-grade metamorphism, the light-rare earth elements are redistributed. The existence of epidote in the most altered Chapada metabasalts indicates that the light rare earth elements are leached and that they substitute Ca^{2+} in the epidote group.

RESUMO

A avaliação qualitativa dos metabasaltos almofadados do greenstone belt de Crixás e dos metabasaltos epidotizados da seqüência de Chapada, evidencia que os elementos terras raras leves são redistribuídos durante o metamorfismo de alto grau. A existência abundante de epidoto nos metabasaltos de Chapada sugere que os elementos terras raras leves foram, provavelmente, lixiviados e passaram então a ocupar a posição de Ca^{2+} nos minerais do grupo dos epidotos.

INTRODUÇÃO

A alteração de lavas máficas sob condições de metamorfismo tem sido objeto de vários estudos, os quais têm enfatizado as variações químicas que ocorrem durante a alteração de basaltos de assoalho oceânico e basaltos de associações ofiolíticas.

Estudos sobre elementos terras raras mostram que a questão da mobilidade dos mesmos em processos de alteração hidrotermal e metamorfismo é bastante controversa (Hellman & Henderson, 1977; Humphris et al., 1978). No entanto, há evidências de que naqueles processos as abundâncias dos elementos terras raras e os seus padrões de distribuição, quando normalizados a condritos, podem sofrer variações de tal modo a influir significativamente nas considerações sobre, por exemplo, petrogênese. É também cada vez mais evidente a não existência de uma relação simples entre grau de mobilidade e imobilidade dos elementos terras raras, grau de metamorfismo, e tipo de rocha submetida à alteração.

Palagonitização de vidros submarinhos resulta em enriquecimento de terras raras leves e enriquecimento uniforme de terras raras pesadas nas bordas das "pillows" em relação aos seus interiores (Ludden & Thompson, 1979). Estudos sobre espilitos revelam que espilitização pode não afetar a distribuição dos elementos terras raras (Herrman et al., 1974), ou provocar enriquecimento destes elementos (Hellman & Henderson, 1977). Condie et al. (1977) mostraram que, durante os processos de epidotização e carbonatização-cloritização dos toleitos do greenstone belt de Barberton, África do Sul, as terras raras pesadas

foram muito pouco mobilizadas. Humphris et al. (1978) mostraram que, durante os processos de alteração hidrotermal dos basaltos da Islândia, Mull e cadeias meso-oceânicas, somente as terras raras leves foram mobilizadas. Ao investigarem a mobilidade dos elementos terras raras durante a formação de greenstone belts a elevadas temperaturas, Staudigel et al. (1979) verificaram que, durante a interação entre basaltos e água do mar, as terras raras não são redistribuídas, e que as pequenas variações nas concentrações destes elementos foram consequência de metamorfismo retrogressivo da facies xisto verde. De grande importância são os dados obtidos por Ludden et al. (1982), os quais indicam que, em rochas máficas alteradas, os elementos terras raras são imóveis para o metamorfismo de baixo grau, mas que os mesmos são redistribuídos durante o metamorfismo de alto grau. Ao efetuar uma avaliação dos principais estudos existentes na literatura geológica mundial sobre mobilidade de elementos terras raras, Beswich (1982) concluiu que as terras raras leves e európio são mais suscetíveis de serem redistribuídos do que as terras raras pesadas. Ao estudarem lavas basálticas silicificadas de Saint John, New Brunswick, Dostal & Strong (1983) verificaram que o principal efeito da silicificação foi diluição dos elementos terras raras, resultando em padrões paralelos aos padrões originais, porém a níveis de concentração mais baixos. Ao estudar a mobilidade química de elementos maiores e traços em basaltos de Telemark, sul da Noruega, afetados por metamorfismo

termal provocado por intrusões graníticas, Brewer & Atkin (1989) concluíram que todos os elementos terras raras foram redistribuídos, resultando em um enriquecimento dos mesmos nos basaltos metamorizados.

Neste artigo, são apresentados os resultados e dados obtidos do estudo sobre os efeitos do metamorfismo de baixo (Crixás) e alto (Chapada) graus, nas concentrações de elementos terras raras de rochas basálticas.

AMOSTRAGEM E ANÁLISES QUÍMICAS

Ao discutir a mobilidade de elementos terras raras, é prática comum comparar padrões de elementos terras raras normalizados a condrito, obtidos de rochas frescas e alteradas. A metodologia adotada neste trabalho foi a de comparar amostras menos e mais alteradas (pares de amostras de um mesmo afloramento) (Fig. 1).

A amostragem de rochas foi dirigida às estruturas almofadadas dos metabasaltos do greenstone belt de Crixás, e metabasaltos da seqüência de Chapada. Em cada "pillow" amostrou-se a borda e o núcleo da estrutura, de tal maneira que as amostras representassem diferentes graus de alteração. Em Chapada, foram amostrados anfíbolitos mais e menos epidotizados.

As dosagens de elementos terras raras foram efetuadas por ativação neutrônica, nos laboratórios da University of London Reactor Centre, enquanto que os elementos maiores foram dosados através de ICP (plasma) nos laboratórios do Imperial College, Londres, Inglaterra (Tabelas 1 e 2).

PETROGRAFIA DOS METABASALTOS

O greenstone belt de Crixás constitui uma calha sinclinal alongada e situada entre os domos siálicos Anta e Caiamar. Os derrames máficos, maciços ou almofadados, komatiíticos ou toleíticos, fazem parte da unidade intermediária do greenstone (Formação Rio Vermelho). A mineralogia dos metabasaltos é constituída essencialmente por actinolita-tremolita, plagioclásio sódico, epidoto, clorita, calcita e titanita, indicando metamorfismo da fácies xisto verde. Nos afloramentos de metabasaltos do Rio Vermelho, as estruturas almofadadas mostram-se como unidades ovóides estiradas, de dimensões que podem atingir até 1,5 metros, e sua individualização é facilitada pela presença de material "interpillow". Internamente, as estruturas almofadadas de Crixás apresentam amígdalas preenchidas por quartzo, clorita, calcita, e epidoto; varíolas e amígdalas (plagioclásio + epidoto).

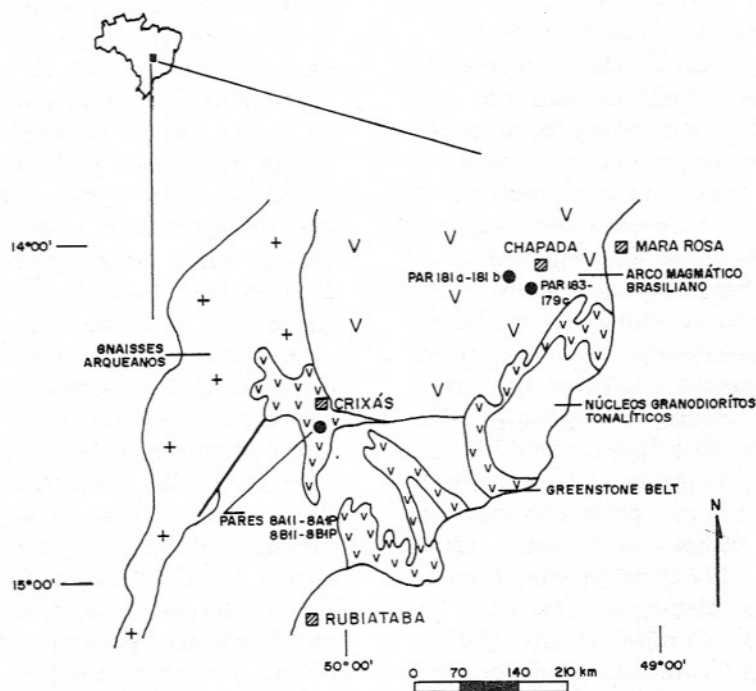


Figura 1 - Localização das estações de amostragem dos pares de amostras estudados.

Tabela 1 – Concentração de elementos terras raras nos metabasaltos almofadados de Crixás. As amostras 8A-1P e 8B-1P representam núcleos de “pillows” (menos alteradas), enquanto que 8A-1I e 8B-1I representam bordas de “pillows” (mais alteradas). Valores em ppm.

	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu
Amostra 8A-1P (Núcleo)	2,31	6,06	4,69	1,40	0,61	0,37	1,34	0,22
Amostra 8A-1I (Borda)	2,58	6,78	6,98	1,72	0,77	0,40	1,61	0,25
Amostra 8B-1P (Núcleo)	1,95	5,19	7,34	1,97	1,10	0,68	2,87	0,42
Amostra 8B-1I (Borda)	2,01	5,36	8,19	2,19	1,14	0,83	3,31	0,49

Tabela 2 – Concentrações de elementos maiores e terras raras e análises modais em metabasaltos de Chapada. As amostras 181a e 183 representam metabasaltos menos epidotizados, enquanto que 181b e 179c representam metabasaltos mais epidotizados. Valores de elementos maiores em percentagem em peso, e os de elementos traços em ppm.

Amostra	181a	181b	183	179c
SiO ₂	47,86	45,26	50,57	48,02
Al ₂ O ₃	15,64	15,55	14,34	13,80
TiO ₂	0,97	0,94	1,23	1,09
FeO	6,69	6,09	8,35	7,27
Fe ₂ O ₃	3,44	3,72	2,78	3,98
MgO	7,85	7,00	6,89	7,22
CaO	12,50	14,58	10,89	14,33
Na ₂ O	3,66	3,09	3,34	2,15
K ₂ O	0,40	0,26	0,12	0,26
MnO	0,15	0,16	0,21	0,20
P ₂ O ₅	0,07	0,06	0,09	0,09
P.F.	1,44	2,66	1,50	2,19
Soma	100,67	99,37	100,31	100,60
La	0,82	1,03	0,70	2,30
Ce	3,07	3,91	3,87	5,96
Nd	4,58	4,94	7,15	8,28
Sm	2,01	2,12	2,91	2,50
Eu	0,81	0,85	1,14	1,11
Tb	0,45	0,48	0,64	0,68
Yb	2,20	2,45	3,81	2,92
Lu	0,36	0,36	0,41	0,40
Quartzo	1,00	4,00	traços	6,00
Plagioclásio	26,00	22,00	37,00	24,00
Anfibólio	55,40	50,00	54,00	40,00
Epidoto	10,00	18,00	2,00	26,00
Titanita	4,00	2,00	3,00	traços
Piroxênio	3,00	4,00	4,00	4,00

to); cavidades preenchidas por quartzo; e seus núcleos mostram granulação mais fina (Teixeira et al., 1981). Os minerais epidoto, calcita e, principalmente, clorita são mais abundantes nas bordas das estruturas almofadadas do que no núcleo das mesmas. Os metabasaltos do Rio Vermelho, os quais são enfocados neste trabalho, mostram alteração hidrotermal muito mais intensa que os que afloram em Crixás, na estrada Crixás-Rubiataba.

A seqüência vulcano-sedimentar de Chapada (Proterozóico Médio-Superior?) consiste de metassedimentos e metavulcânicas metamorizadas na fácies anfíbolito de alto grau. Os anfíbolitos constituem, predominantemente, metabasaltos toleíticos de composição química similar às dos basaltos existentes em arcos e bacias marginais recentes. Tais rochas foram afetadas por intensos processos de epidotização, decorrentes da percolação de fluidos hidrotermais durante a formação da seqüência vulcano-sedimentar. Nos anfíbolitos mais intensamente afetados pela epidotização, a composição modal revela a presença de até 50% de epidoto, e as relações texturais naquelas rochas indicam que o epidoto substitui, principalmente, plagioclásio, mas também, hornblenda.

RESULTADOS OBTIDOS

As Figuras 2c e 2d mostram os padrões de distribuição dos elementos terras raras normalizados a condrito, dos metabasaltos da fácies xisto verde do greenstone belt de Crixás. Durante a formação dos greenstones, as alterações hidrotermais ocorrem, aparentemente, a temperaturas de 150-350°C, pressões de 500 bar, e razão água/rocha da ordem de 10-125. Menzies et al. (1979) mostram que, nestas condições, os elementos terras raras são imóveis. Quando se compara os padrões de terras raras obtidos para os basaltos de Crixás, verifica-se que há apenas um deslocamento paralelo entre os padrões. É possível que, neste caso, não tenham havido variações reais nas concentrações dos elementos terras raras, mas sim, uma diferença aparente devido a extração ou adição de outros elementos durante o metamorfismo, o que contraria as conclusões de Arndt et al. (1989) sobre o comportamento dos elementos terras raras nos komatiitos de Crixás.

Os padrões de terras raras obtidos pa-

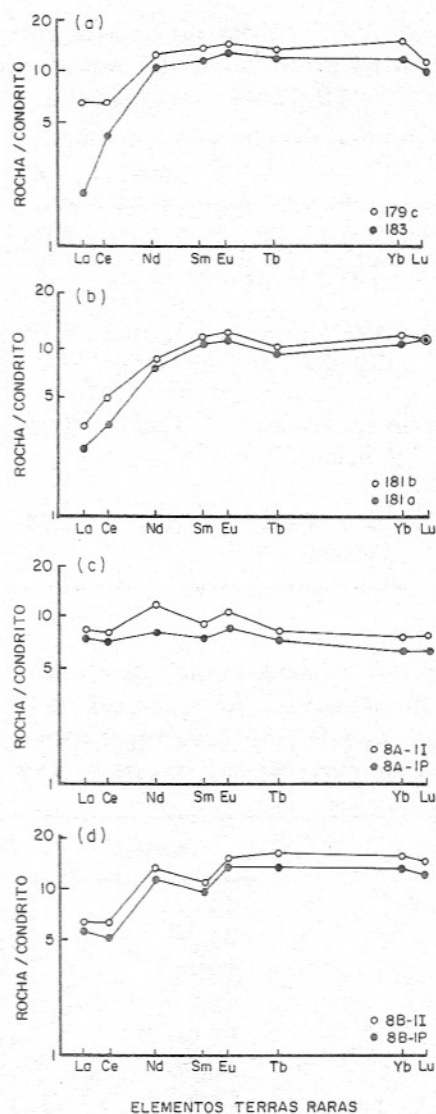


Figura 2 - Padrões de distribuição de elementos terras raras de rochas menos alteradas (181a e 183, de Chapada; 8A-1P e 8B-1P, de Crixás) e mais alteradas (181b e 179c, de Chapada; 8A-1I e 8B-1I, de Crixás). Valores de condrito para normalização são os indicados por Thompson et al. (1984).

ra os metabasaltos de Crixás são semelhantes aos obtidos por Menzies et al. (1979) em basaltos toleíticos vítreos inalterados de greenstone belts de outras regiões do mundo, e também, semelhantes aos obtidos por Arndt et al. (1989) em metabasaltos almofadados que afloram nas proximidades de Crixás (estrada Crixás-Rubiataba). No entanto, ao contrário dos padrões obtidos por Arndt et al. (1989) e Menzies (1979), os quais mostram anomalias negativas de Eu, os padrões de terras raras dos metabasaltos almofadados do Rio Vermelho

apresentam anomalias positivas de Eu. Considerando-se que os metabasaltos do Rio Vermelho apresentam alteração hidrotermal muito mais intensa que a dos metabasaltos almofadados próximos a Crixás, é possível que a anomalia positiva de Eu resulte de enriquecimento deste elemento devido à alteração hidrotermal mais intensa. É importante frisar que os padrões de terras raras das ultrabásicas komatiíticas de Crixás também apresentam anomalias negativas e positivas de Eu (Arndt et al., 1989).

As Figuras 2a e 2b mostram os padrões de distribuição de elementos terras raras normalizados a condrito, para os metabasaltos da seqüência de Chapada. É evidente que os elementos terras raras leves sofreram remobilização, conseqüência da intensa epidotização dos basaltos, os quais foram ainda, posteriormente, afetados por metamorfismo regional da fácies anfíbolito. Este fato está de acordo com a observação de Ludden et al. (1982), ou seja, a de que os elementos terras raras são muito mais afetados pelo metamorfismo de alto grau. O par 183-179c representa epidotização mais intensa (aumento em 24% de epidoto modal), enquanto que o par 181a-181b representa menor incremento na epidotização (aumento em 7% de epidoto modal), o que justifica uma menor variação nas concentrações de terras raras leves neste último

par.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados obtidos sugerem que: (1) em relação às composições químicas do centro e da borda das estruturas almofadadas, o metamorfismo hidrotermal da fácies xisto verde que afetou os metabasaltos do greenstone belt de Crixás, não provocou modificações significativas nas concentrações dos elementos terras raras destas rochas. No entanto, alteração hidrotermal mais intensa parece favorecer o enriquecimento em Eu; (2) em condições de metamorfismo de alto grau superimposto a zonas de alteração hidrotermal, os elementos terras raras leves são lixiviados e, em Chapada, redepositados nas zonas mais enriquecidas em epidoto. Em Chapada, epidotização mais intensa implica em maior enriquecimento em terras raras leves.

Tais conclusões permitem afirmar que as concentrações de elementos terras raras de rochas alteradas e/ou metamorfizadas, resultam da combinação de processos primários e secundários, e que o estudo petrogenético de rochas de terrenos metamórficos de alto grau, principalmente com base nas terras raras leves, pode constituir um procedimento equivocado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARNDT, N.T.; TEIXEIRA, N.A.; WHITE, W.M. (1989) Bizarre geochemistry of komatiites from the Crixás greenstone belt, Brazil. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **101**: 187-197.
- BESWICK, A.E. (1982) Some geochemical aspects of alteration and genetic relations in komatiitic suites. In: N.T. Arndt & A.E. Nisbet (eds.) *Komatiites*. Allen and Unwin, London, Boston, Sydney, p. 1606-1628.
- BREWER, T.S. & ATKIN, B.P. (1989) Elemental mobilities produced by low-grade metamorphic events. A case study from the Proterozoic supracrustals of Southern Norway. *Precambrian Research*, **46**: 143-158.
- CONDIE, K.C.; VILJOEN, M.J.; KABLE, E.J.D. (1977) Effects of alteration on element distributions in Archaean tholeiites from the Barberton Greenstone Belt, South Africa. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **64**: 75-89.
- DOSTAL, J. & STRONG, D.F. (1983) Trace-element mobility during low-grade metamorphism and silicification of basaltic rocks from Saint John, New Brunswick. *Can. J. Earth Sci.*, **20**: 431-435.
- HELLMAN, P.L. & HENDERSON, P. (1977) Are rare earths mobile during spilitization? *Nature*, **267**: 38-40.
- HERRMANN, A.G.; POTTS, M.J.; KNAKE, D. (1974) Geochemistry of the rare earth elements in spilites from the oceanic and continental crust. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **44**: 1-16.
- HUMPHRIS, S.E.; MORRISON, M.A.; THOMPSON, R.N. (1978) Influence of rock recrystallization history upon subsequent lanthanide mobility during hydrothermal alteration of basalts. *Chem. Geol.*, **23**: 125-137.
- LUDDEN, J. & THOMPSON, G. (1978) Behaviour of rare earth elements during sub-

- marine weathering of tholeiitic basalt. *Nature*, **274**: 147-149.
- LUDDEN, J.; GELINAS, L.; TRUDEL, P. (1982) Archaean metavolcanics from the Rowyn-Noranda district, Abitibi Greenstone Belt, Quebec. 2. Mobility of trace elements and petrogenetic constraints. *Can. J. Earth Sci.*, **19**: 2276-2287.
- MENZIES, M.; SEYFRIED JR., W.; BLANCHARD, D. (1979) Experimental evidence of rare earth element immobility in greenstones. *Nature*, **282**: 398-399.
- STAUDIGEL, H.; FREY, F.A.; HART, S.A. (1979) Incompatible trace element geochemistry and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in basalts and corresponding glasses and palagonite. In: T. Donnelly & I. Francheteau (eds.) Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project. Part 2, 1137-1144.
- TEIXEIRA, N.A.; SABOIA, L.A.; FERREIRA, M.C.B.; TEIXEIRA, S.A.; CASTRO, J.H.G. (1981) Estruturas e texturas das lavas ultrabásicas e básicas do greenstone belt de Crixás, Goiás, Brasil. *Soc. Bras. Geol., Núcleo Centro-Oeste, Boletim Informativo*, **10**: 33-87.
- THOMPSON, R.N.; MORRISON, M.A.; HENDRY, G.L.; PARRY, S.J. (1984) An assessment of the relative roles of crust and mantle in magma genesis: an elemental approach. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, **A310**: 549-550.