

## CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA E TECTÔNICA DE ROCHAS METAVULCÂNICAS DE "GREENSTONE BELTS" ARQUEANOS DA REGIÃO DE RIO MARIA, SE DO PARÁ\*

Z.S.Souza<sup>1</sup>, R.Dall'Agnol<sup>2</sup>

O terreno granito - "greenstone" de Rio Maria situa-se na borda SE do cráton Amazônico, 250 km a sul da Serra dos Carajás, no Estado do Pará. O conhecimento geológico regional avançou bastante na última década, conforme sínteses de Docegeo (1988), Souza et al. (1990), Althoff et al. (1994), Araújo et al. (1994) e Dall'Agnol et al. (1996). Diversas seqüências de "greenstone belts", orientadas em torno da direção E-W foram englobadas no Supergrupo Andorinhas (Docegeo, 1988), sendo estudadas em maior detalhe as faixas Sapucaia (Oliveira, 1993), Identidade (Souza, 1994; Souza & Dall'Agnol, 1995, 1996), Seringa (Huhn et al., 1986) e Babaçu/Lagoa Seca (Huhn, 1992). Em termos litoestratigráficos, os "greenstones" compõe-se de rochas metavulcânicas de baixo grau metamórfico, compreendendo um pacote metaultamáfico (xistos magnesianos) a máfico (metabasaltos e metagabros), mais volumoso, nas porções basais, e domos e soleiras félsicas (metadacitos) no topo. A idade mínima do Supergrupo Andorinhas, estimada com base na datação de intrusões metaplutônicas, é de *ca.* 2,88-2,87 Ga (Macambira, 1992; Pimentel & Machado, 1994), sendo o vulcanismo dacítico compreendido no intervalo de 2,97-2,90 Ga (Macambira, 1992; Pimentel & Machado, 1994; Souza, 1994). O presente artigo trata de dados geoquímicos especialmente do "greenstone" Identidade, caracterizando a gênese de magma e evolução do vulcanismo ultramáfico a félsico.

Os aspectos petrográficos e texturais do vulcanismo são os seguintes:

*Metaultamáficas (UM)* - São rochas xistosas, contendo quantidades variadas de anfibólio incolor, talco e clorita. O anfibólio é do tipo cálcico, com  $mg\# < 45$ ,  $Si < 6,35$ , classificando-se como Fe-tschermakita (Souza & Dall'Agnol, 1996a). A mineralogia primária não está preservada, porém o arranjo mútuo entre as acículas de anfibólio e a matriz talco-clorítica sugerem reliquias de texturas "spinifex" paralelas, triangulares e espinha de peixe.

*Metabasaltos (BAS) e metagabros (GB)* - Possuem composição modal semelhante (plagioclásio, anfibólios, epidotos), porém diferindo na granulação dos minerais (maior em GB), proporção de material desvitrificado (maior em BAS) e texturas (porfírica - fenocristais saussuritizados de andesina, hialofítica, pilotaxítica e traquitóide em BAS; ofítica, subofítica e poiquilofítica transformadas em GB). O anfibólio de ambos também é do tipo cálcico, porém com  $mg\# > 55$  e  $Si > 7,15$ , classificando-se como actinolita (GB) e hornblenda actinolítica e Mg-hornblenda (BAS) (Souza & Dall'Agnol, 1996b).

*Metadacitos (DAC)* - São tipicamente porfíricos, com fenocristais de quartzo, plagioclásio, titanita, apatita e anfibólio (hornblenda), este mais freqüente nas amostras menos evoluídas, numa matriz granoblástica, recristalizada, composta por K-feldspato, quartzo, titanita e minerais opacos.

<sup>1</sup>Departamento de Geologia, CCE, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

<sup>2</sup>CG, Universidade Federal do Pará.

O estudo geoquímico do “greenstone belt” Identidade permitiu definir três séries magmáticas (Tabela 1): (i) komatiítica piroxenítica (*UM*) - pobre em álcalis e  $Al_2O_3$  e rica Ni, Cr, Co e Mg ( $MgO > 18\%$  em base anidra;  $mg\#=82-78$ ); tipos ainda mais magnesianos ( $mg\#=86$ ) ocorrem no “greenstone” Sapucaia; dentre os elementos terras raras (TR), os TRL (terras raras leves) são mais afetados por efeitos pós-eruptivos, sendo os TRP (terras raras pesadas) mais preservados e com razões  $(Gd/Yb)_N=2,3-0,9$ ; (ii) toleitica de baixo potássio (*BAS* e *GB*), com conteúdos mais elevados de álcalis, V e Y, e mais baixos de Mg ( $mg\#=59-43$ ; semelhante ao de metabásicas do “greenstone” Babaçu/Lagoa Seca) do que os komatiitos; mostram leve enriquecimento em TRL  $((La/Yb)_N=1,6-1,2)$ , com anomalia de Eu ausente ou ligeiramente negativa ( $Eu/Eu^*=1,0-0,74$ ); (iii) cálcico-alcálica sódica (“trondhjemitica”) (*DAC*), ricos em álcalis, Ba, Rb, Sr, Zr e U, com baixos V, Ni, Co, Fet+Ti e Mg ( $mg\#=47-37$ ) e  $SiO_2 > 66\%$  (*UM*, *BAS* e *GB* têm  $SiO_2 \leq 50\%$ ); são fortemente fracionados em TRL e não possuem anomalias significativas de Eu  $((La/Yb)_N=39,5-10,7$ ;  $Eu/Eu^*=1,04-0,88$ ).

Tabela 1 - Razões geoquímicas distintivas de metavulcânicas do “greenstone belt” Identidade.

	KOMATIÍTOS ( <i>UM</i> )	TOLEÍTOS ( <i>BAS</i> , <i>GB</i> )	CÁLCICO-ALCALINAS ( <i>DAC</i> )
SiO <sub>2</sub> (% peso)	44,1-46,8	46,8-48,9	66,2-71,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (% peso)	6,5-7,8	14,3-15,7	15,2-15,9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub> (% peso)	10,1-15,7	11,7-15,5	1,5-3,6
<i>mg#</i>	82-73	59-43	38-48
Cr (ppm)	1460-4000	148-393	12-66
Ni (ppm)	310-1286	89-156	9-36
V (ppm)	113-220	237-311	12-61
Ba (ppm)	tr	tr-99	464-1313
Rb/Sr	0	0,04-1,03	0,07-0,19
$(La/Sm)_N$	0,4-5,7	0,9-1,2	2,6-4,5
$(Gd/Yb)_N$	0,9-2,3	1,1-1,3	2,4-4,3

Os padrões de elementos maiores, menores e traços (relações compatíveis vs. incompatíveis) sugerem a cristalização fracionada como o mecanismo petrogenético principal na evolução das três séries magmáticas. O modelamento quantitativo não foi possível de obter com precisão para as *UM*, em função da irregularidade de determinados elementos traços, especialmente os TRL; concernente aos *BAS/GB* e *DAC*, os resultados foram mais confiáveis. No caso de *UM*, o fracionamento de olivina e ortopiroxênio explicaria os padrões observados, ou seja, enriquecimento em SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub>, CaO e TiO<sub>2</sub> e empobrecimento em MgO com a diferenciação. *BAS* e *GB* mostram enriquecimento em SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub> e TiO<sub>2</sub>, empobrecimento em CaO, com Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mais ou menos constante, sendo explicados por cumulados com os mesmos minerais, diferindo apenas nas suas proporções modais, compondo-se predominantemente de clinopiroxênio e Ca-plagioclásio; a taxa de cristalização seria de 20-30% e 35-55% para *BAS* e *GB*, respectivamente. Já os *DAC* contrastam nitidamente com as séries prévias, caracterizando-se por enriquecimento em Na<sub>2</sub>O e empobrecimento em Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub>, MgO, CaO, K<sub>2</sub>O e TiO<sub>2</sub>. Isto se explicaria por 50-70% de fracionamento a baixas pressões, e sob  $fO_2$  elevada, de plagioclásio (An<sub>50</sub>), quartzo, biotita, hornblenda e K-feldspato, com proporções subordinadas de magnetita, titanita, zircão e alanita.

O diagrama  $(La/Yb)_N$  vs.  $Yb_N$  sugere o lherzolito com pequenas quantidades de granada (1-5%) e ligeiramente empobrecido em elementos incompatíveis como fonte de *UM* e

*BAS/GB*. As taxas de fusão seriam de 10% a 25%. A maior quantidade de dados analíticos dos toleitos permitiram determinar quantitativamente um resíduo com predomínio de olivina (69%) e ortopiroxênio (26%), coerente com os teores esperados de Co, Ni, Rb, Sr, Y e Zr. Diagramas multielementares de *BAS* e *GB* demonstram a afinidade dos mesmos com basaltos de arco insular (toleitos de baixo potássio ou cálcico-alcálicos), porém com uma certa assinatura de basaltos de bacia marginal, com anomalia negativa em Nb e Zr, e altos valores relativos de U e K.

O caráter cálcico-alcálico sódico e os padrões de TR dos *DAC* sugerem a similaridade de fonte e evolução petrogenética dos mesmos com os clássicos TTGs (Tonalitos-Trondhjemitos-Granodioritos) (Barker & Arth, 1976; Martin, 1986, 1994) ou TTDs (Tonalitos-Trondhjemitos-dacitos) (Drummond & Defant, 1990). Para estes magmas, admite-se uma fonte crustal do tipo crosta oceânica transformada em granada anfíbolito ou granada eclogito, em ambiente de subducção (Drummond & Defant, 1990; Martin, 1986, 1994). Tomando-se a crosta oceânica como sendo a composição média dos toleitos do "greenstone" Identidade, o modelo que melhor se ajustou aos dados geoquímicos foi aquele de uma fonte do tipo granada anfíbolito, enriquecida em elementos incompatíveis. Cerca de 10-15% de fusão parcial desta crosta gera um líquido dacítico, deixando um resíduo com hornblenda (43%), plagioclásio (An<sub>50</sub>; 34%), clinopiroxênio (12%) e granada (11%). As características petrológicas dos *DAC*, a saber fracionamento de fases hidratadas (hornblenda, biotita) e fases estáveis em magmas com alta  $fO_2$  (magnetita, titanita) são observadas em magmas gerados em ambiente de subducção (Martin, 1986). No caso em foco, relações entre certos elementos (Rb vs. Y+Nb) e diagramas multielementares (Pearce et al., 1984) mostram uma analogia dos *DAC* com médias de granitóides e vulcânicas de arco insular, com altos Rb e Ba e anomalias negativas em Nb e Zr. Neste contexto, é de se supor a possibilidade de que a crosta oceânica subduccionada contenha algum componente terrígeno, que poderia torná-la enriquecida em elementos incompatíveis, tais como U, Th, Rb, Ba, Cs, TRL, ou mesmo servir como fontes de minerais residuais refratários que acomodariam parte dos TRP (ex. zircão herdado) (Westercamp, 1988; Sorensen & Grosman, 1989).

Em síntese, o vulcanismo dos "greenstone belts" arqueanos da região de Rio Maria caracteriza-se pela existência de três séries magmáticas distintas, sendo as mais precoces komatiítica e toleítica de baixo potássio, e a mais jovem cálcico-alcálica sódica ("trondhjemítica"). Todas estas séries evoluíram principalmente por mecanismos de cristalização fracionada a baixas pressões, cujos cumulados seriam compostos de olivina + ortopiroxênio em *UM*, clinopiroxênio + plagioclásio em *BAS* e *GB*, e plagioclásio + quartzo + hornblenda + biotita + K-feldspato em *DAC*. Embora o processo petrogenético tenha sido similar, as três séries evoluíram de modo distinto.

Os padrões geoquímicos e modelamentos de fonte permitem considerar, como hipótese preliminar, que o pacote "greenstone" começou sua evolução como uma bacia marginal (vulcanismo komatiítico - toleítico), sendo o vulcanismo cálcico-alcálico (dacítico) posterior àquele máfico-ultramáfico e contemporâneo ao fechamento de um arco insular. Tal sucessão temporal é coerente com a litoestratigrafia dos "greenstones" e os tipos de fontes utilizadas nos modelos teóricos. Uma fonte do tipo crosta oceânica para os *DAC* é coerente com a baixa razão isotópica  $I_0Sr$  ( $=0,70219 \pm 29$ , 1s; Souza, 1994). O fechamento do sistema bacia marginal - arco insular propiciaria o envolvimento progressivo de componentes crustais nas etapas finais da evolução do "greenstone", sendo mais expressiva na época de geração do vulcanismo dacítico (2,97-2,90 Ga) e do plutonismo (ca. 2,87 Ga). Isto explica, p. ex., a presença de zircões herdados (ca. 3,04 Ga), obtidas por Pimentel & Machado (1994) em metadacitos do "greenstone" Lagoa Seca. O registro continental em komatiitos e toleitos é difícil de identificar no momento, embora possa justificar os elevados valores de  $m_1$  ( $^{238}U/^{204}Pb = 9,66 \pm 1,44$ , 1s) de metabasaltos e altos U e K (Souza, 1994).



Um aspecto a ressaltar são as baixas taxas de fusão parcial do manto superior na gênese do magma komatiítico (20-25%). Isto parece incoerente com resultados experimentais de Arndt (1976), porém concorda com previsões teóricas feitas por Rajamani et al. (1985). De outro modo, baixos graus de fusão parcial também poderiam ser obtidos por fusão de granada lherzolito a grandes profundidades (Miller et al., 1991) ou por sucessivos baixos graus de fusão parcial durante descompressão adiabática (Green, 1975; Wilson, 1989).

### Referências Bibliográficas

- ALTHOFF, F.J. et al. (1994) In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 4., Belém, 1994. **Boletim de Resumos Expandidos**. Belém, SBG-NO, p.291-294.
- ARAÚJO, O.J.B.; MACAMBIRA, E.M.B.; VALE, A.G.; OLIVEIRA, J.R.; SILVA NETO, C.S.; COSTA, E.J.S.; SANTOS, A.; PENA FILHO, J.I.C.; NEVES, A.P.; JOÃO, X.S.J.; COSTA, J.B.S. (1994) Primeira integração das investigações geológicas do programa grande Carajás na região SE do estado do Pará. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 4., Belém, 1994. **Boletim de Resumos Expandidos**. Belém, SBG-NO, p.299-301.
- ARNDT, N.T. (1976) **Melting relations of ultramafic lavas (komatiites) at 1 atm and high pressure**. Washington, Carnegie Institution. p.555-561.
- BARKER, F.; ARTH, J.G. (1976) Generation of trondhjemitic-tonalitic liquids and archean bimodal trondhjemite-basalt suites. **Geology**, v.4, n.10, p.596-600.
- DALL'AGNOL, R. et al. (1996) **Arch. Terranes S. Amer. Plataf.**, p.29-30.
- DOCEGEO (1988) Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35., Belém, 1988. **Anexo aos anais**. Belém, SBG. p.11-56.
- DRUMMOND, M.S.; DEFANT, M.J. (1990) A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting; archean to modern comparisons. **Journal of Geophysical Research**, v.95, n.B13, p.21503-21521.
- GREEN, D.H. (1975) Genesis of archean perioditic magmas and constraints on archean geothermal gradients and tectonics. **Geology**, v.3, n.1, p.15-18.
- HUHN, S.R.B. (1992) **Tese-Mestrado**. Brasília, 168p. IG/UnB.
- HUHN, S.R.B.; MARTINS, L.P.B.; MONTALVÃO, R.G. (1986) Caracterizações petrográficas, exzeturais e estruturais dos fluxos máfico-ultramáficos do Greenstone belt Seringa, sul do estado do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34., Goiânia, 1986. **Anais**. Goiânia, SBG, v.2, p.648-662.
- MACAMBIRA, M.J.B. (1992) **Chronologie U/Pb, Rb/ Sr, K/Ar et croissance de la croûte continentale dans L'Amazonie du sud-est; exemple de la région de Rio Maria, province de Carajás, Brésil**. Montpellier, 212p. (Tese - Doutorado) - Université Montpellier II.
- MARTIN, H. (1986) Effect of steeper archean geothermal gradient on geochemistru of subduction-zone magmas. **Geology**, v.14, n.9, p.753-756.
- MARTIN, H. (1994) The archean grey gneisses and the genesis of continental crust. In: CONDIE, K.C. (Ed.) **The archean crustal evolution**. Amsterdam, Elsevier. p.205-259.
- MILLER, G.; STOLPER, E.M.; AHRENS, T.J. (1991) The equation of state of a molten komatiite 2. Application to komatiite petrogenesis and the hadean mantle. **Journal of Geophysical Research**, v.96, n.B7, p.11849-11864.
- OLIVEIRA, C. (1993) **Tese - Doutorado**. Brasília, 187p. IG/UnB.

- PEARCE, J.A.; HARRIS, N.B.W.; TINDLE, A.G. (1984) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, v.25, n.4, p.956-983.
- PIMENTEL, M.M.; MACHADO, N. (1994) Geocronologia U-PB dos terrenos granito-greenstone de Rio Maria, Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38., Camboriú, 1994. *Boletim de Resumos Expandidos*. Camboriú, SBG. v.2, p.390-391.
- RAJAMANI, V.; SHIVKUMAR, K.; HANSON, G.N.; SHIREY, S.B. (1985) Geochemistry and petrogenesis of amphibolites, kolar schist belt, South India; evidence for komatiitic magma derived by low percentages of melting of the mantle. *Journal of Petrology*, v.26, n.1, p.92-123.
- SORENSEN, S.S.; GROSSMAN, J.N. (1989) Enrichment of trace elements in garnet amphibolites from a paleo-subduction zone: catalina schist, southern California. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v.53, n.12, p.3155-3177.
- SOUZA, Z.S. (1994) Tese - Doutorado, CPGG/UFGA.
- SOUZA, Z.S.; DALL'AGNOL, R. (no prelo) *Anais da Academia Brasileira de Ciências*.
- SOUZA, Z.S.; DALL'AGNOL, R. (no prelo) *Geochimica Brasiliensis*.
- SOUZA, Z.S.; DALL'AGNOL, R. (1996) Química mineral em rochas metavulcânicas do "greenstone belt" identidade, SE do Pará: implicações quanto ao metamorfismo. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 5., Belém, 1996. *Boletim de Resumos Expandidos e Guia de Excursões*. Belém, SBG- Núcleo Norte. p.94-96.
- SOUZA, Z.S.; MEDEIROS, H.; ALTHOFF, F.J.; DALL'AGNOL, R. (1990) Geologia do terreno granito-"Greenstone" arqueano da região de Rio Maria, Sudeste do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36., Natal, 1990. *Anais*. Natal, SBG- Núcleo Nordeste. p.2913-2928.
- WESTERCAMP, D. (1988) Magma generation in the lesser antilles: geological constraints. *Tectonophysics*, v.149, n.1-2, p.145-163.
- WILSON, M. (1989) *Igneous petrogenesis*. London, Academic Press. 466p.