

Uso do diagrama binário Zr/Nb-Zr/Y na distinção de fontes mantélicas de enxames de diques máficos no sul do Cráton São Francisco

Discrimination of mantle sources of mafic dyke swarms in the southern São Francisco Craton by using Zr/Nb-Zr/Y binary diagram

Alexandre de Oliveira Chaves

Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

Resumo: As concentrações de elementos incompatíveis são sensíveis aos processos de fusão parcial do manto, e as razões entre esses elementos, em não havendo intensa contaminação crustal, são particularmente úteis na distinção das fontes das rochas basálticas produzidas nesses processos de fusão parcial, já que minimizam efeitos de fracionamento dos magmas. Usando-se elementos adicionalmente imóveis, essas razões minimizam inclusive processos metamórficos eventualmente impostos a essas rochas. Quando as razões Zr/Nb e Zr/Y são lançadas em diagrama binário, diferentes fontes mantélicas de enxames de diques máficos submetidas a diferentes graus de fusão parcial surgem como linhas de correlação individualizadas que correspondem a uma assinatura de cada uma delas. Desse modo, o diagrama Zr/Nb *versus* Zr/Y se torna uma importante ferramenta de discriminação de enxames de diques máficos de uma dada região continental, como exemplificado aqui para a região sul do Cráton São Francisco.

Palavras-chave: Elementos incompatíveis. Zr/Nb. Zr/Y. Enxames de diques máficos.

Abstract: Concentrations of incompatible elements are sensitive to the mantle partial melting processes and the ratios of these elements, with no intense crustal contamination, are particularly useful in distinguishing sources of basaltic rocks crystallized from such partial melting processes, as they minimize the effects of magma fractionation. By using additional immobile elements, ratios also minimize metamorphic processes eventually imposed on these rocks. When Zr/Nb and Zr/Y ratios are plotted in binary diagram, different mantle sources of mafic dyke swarms subjected to different degrees of partial melting appear as individual correlation lines that match a signature of each. Thus, the Zr/Nb versus Zr/Y diagram becomes an important tool for discrimination of mafic dyke swarms of a given continental region, as exemplified here for the southern portion of the São Francisco Craton.

Keywords: Incompatible elements. Zr/Nb. Zr/Y. Mafic dyke swarms.

CHAVES, A. O., 2014. Uso do diagrama binário Zr/Nb-Zr/Y na distinção de fontes mantélicas de enxames de diques máficos no sul do Cráton São Francisco. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais** 9(3): 661-666.

Autor para correspondência: Alexandre de Oliveira Chaves. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. Departamento de Geologia. Centro de Pesquisas Manoel Teixeira da Costa. Av. Antonio Carlos, n. 6627. Belo Horizonte, MG, Brasil. CEP 31270-901 (alex2010@ufmg.br).

Recebido em 10/06/2014

Aprovado em 08/12/2014

Responsabilidade editorial: Hilton Tulio Costi



INTRODUÇÃO

Não só os derrames basálticos como também enxames de diques máficos (condutos tabulares verticalizados de passagem do magma mantélico – Halls & Fahrig, 1987) guardam uma complexa história desde a extração do magma da área fonte, por meio de processos de fusão parcial do manto, até seu local de posicionamento e cristalização final. Seus magmas podem, inclusive, passar por processos de assimilação e contaminação da rocha encaixante e, eventualmente depois de solidificados, podem submeter-se a eventos metamórficos/deformacionais. Segundo Rollinson (1993), as concentrações de elementos incompatíveis são particularmente sensíveis a processos de fusão parcial do manto, sejam eles de fusão em equilíbrio ou fusão fracionada. Quanto mais incompatível é o elemento, mais sensível ele é diante de diferentes graus (intensidades) de fusão parcial. As concentrações de elementos incompatíveis também variam durante os processos de cristalização fracionada do magma basáltico, principalmente quando há contaminação por assimilação de rochas encaixantes.

Uma maneira de minimizar os efeitos do fracionamento e identificar diferentes grupos (enxames) de diques máficos de uma determinada região é utilizar as concentrações de elementos incompatíveis em diagrama binário no qual essas concentrações aparecem como razões na abscissa (eixo x) e na ordenada (eixo y). Ou seja, o uso de diagrama razão-razão de elementos incompatíveis pode auxiliar na caracterização e distinção da fonte mantélica dos diques. Diferentes fontes mantélicas, submetidas a diferentes processos e intensidades de fusão parcial, são representadas como diferentes linhas de correlação que passam pela origem desse tipo de diagrama, segundo Eissen *et al.* (1989), que conseguiram distinguir três diferentes fontes mantélicas para os basaltos do rifte do Mar Vermelho, ao usarem as razões Th/Tb-Th/Ta. Condie (2003, 2005) também demonstra que razões entre elementos incompatíveis são úteis na distinção de fontes mantélicas de komatiitos e basaltos oceânicos.

O objetivo deste estudo é utilizar os elementos-traço *High Field Strength* ou elementos de alto potencial iônico (HFS)

incompatíveis Zr, Nb e Y, relativamente imóveis diante de processos pós-magmáticos em sistemas basálticos, no diagrama binário que relaciona as razões Zr/Nb *versus* Zr/Y para a distinção de fontes mantélicas de enxames de diques máficos. A escolha desses três elementos se justifica inicialmente por eles não substituírem outros cátions nas principais fases silicatadas em cristalização, permanecendo concentrados na fase *liquidus* ($K_D < 1$) do magma gerador dos diques. O Nb é habitualmente incorporado em óxidos de Fe-Ti, como a ilmenita e a ilmenomagnetita, envolvidos na fusão parcial do manto e no decurso da evolução magmática. O elemento Y, que é incompatível na ilmenita, tem a característica de ser fortemente fracionado pela granada, mineral que pode ocorrer em quantidades variáveis nos peridotitos mantélicos, os quais normalmente representam as áreas-fonte afetadas por diferentes graus de fusão parcial na geração dos magmas de diferentes enxames de diques (Klemme *et al.*, 2006). Ainda quanto ao comportamento geoquímico desses elementos-traço, diferentes graus de fusão de uma mesma fonte mantélica podem produzir magmas com diferentes razões Zr/Y e Zr/Nb, sendo que as taxas menores de fusão serão representadas por valores altos de Zr/Y e baixos de Zr/Nb, enquanto taxas maiores serão representadas por razões Zr/Y baixas e Zr/Nb elevadas (Floyd, 1989).

O diagrama (Zr/Nb)/(Zr/Y) a ser aqui utilizado pressupõe, de fato, a aplicação da razão Y/Nb (ou Nb/Y). Há tempos se sabe que essa razão é diferente para distintas fontes mantélicas de basaltos oceânicos. Em basaltos normais de cadeia meso-oceânica (N-MORB), a razão Y/Nb é alta; em basaltos transicionais de cadeia meso-oceânica (T-MORB), ela é média; e em basaltos de ilhas oceânicas (OIB) ela é muito baixa. Variações nessa razão também podem representar mistura de fontes mantélicas (Floyd, 1989; Fitton *et al.*, 1997; Natland, 2007).

MATERIAL E MÉTODOS

Um total de 121 amostras, provenientes de quatro diferentes enxames de diques máficos, nomeados

Transminas (~130 Ma), Formiga (~900-1000 Ma), Pará de Minas (~1700-1750 Ma) e Paraopeba (~2100 Ma) por Chaves (2013), foi coletado no setor sul do Cráton São Francisco (Figura 1). A totalidade dos diques Paraopeba é constituída por anfibolitos que guardam textura metamórfica (grano)nematoblástica, já que sua gênese esteve vinculada à dinâmica de zonas de cisalhamento transcorrentes, onde estão inseridos. Os diques dos demais enxames estão relacionados a processos crustais extensionais e preservam texturas ígneas. Muitos dos diques Pará de Minas são porfíricos, com fenocristais de plagioclásio, o que aponta para a atuação da cristalização fracionada neste enxame (Chaves, 2013).

Após a pulverização em moinho de panela, as amostras foram enviadas ao Laboratório SGS-Geosol. Ali, os elementos-traço Nb e Y foram analisados por espectrometria de massas com plasma acoplado indutivamente (ICP-MS) e o Zr por espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES).

RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O resultado das análises químicas encontra-se na Tabela 1, onde estão apresentadas também as razões Zr/Nb e Zr/Y de cada amostra.

Dentro da proposição do artigo e suportadas por um vigoroso número de amostras analisadas (cento e vinte e uma amostras), as razões Zr/Nb (A) e Zr/Y (B) dos diques foram lançadas no diagrama binário da Figura 2, com o auxílio do programa Excel (Microsoft®). O mesmo que foi notado por Eissen *et al.* (1989), para os basaltos de diferentes fontes mantélicas do Mar Vermelho, é percebido para os diferentes enxames de diques do setor sul do Cráton São Francisco, ou seja, são verificadas linhas de correlação individualizadas para cada um dos quatro enxames: Transminas (A/B = 1,9), Formiga (A/B = 0,8), Pará de Minas (A/B = 3,0) e Paraopeba (A/B = 5,3). Mesmo este último enxame, composto por diques que passaram por processos metamórficos/deformacionais, e o enxame Pará de Minas, com registro de processos de cristalização

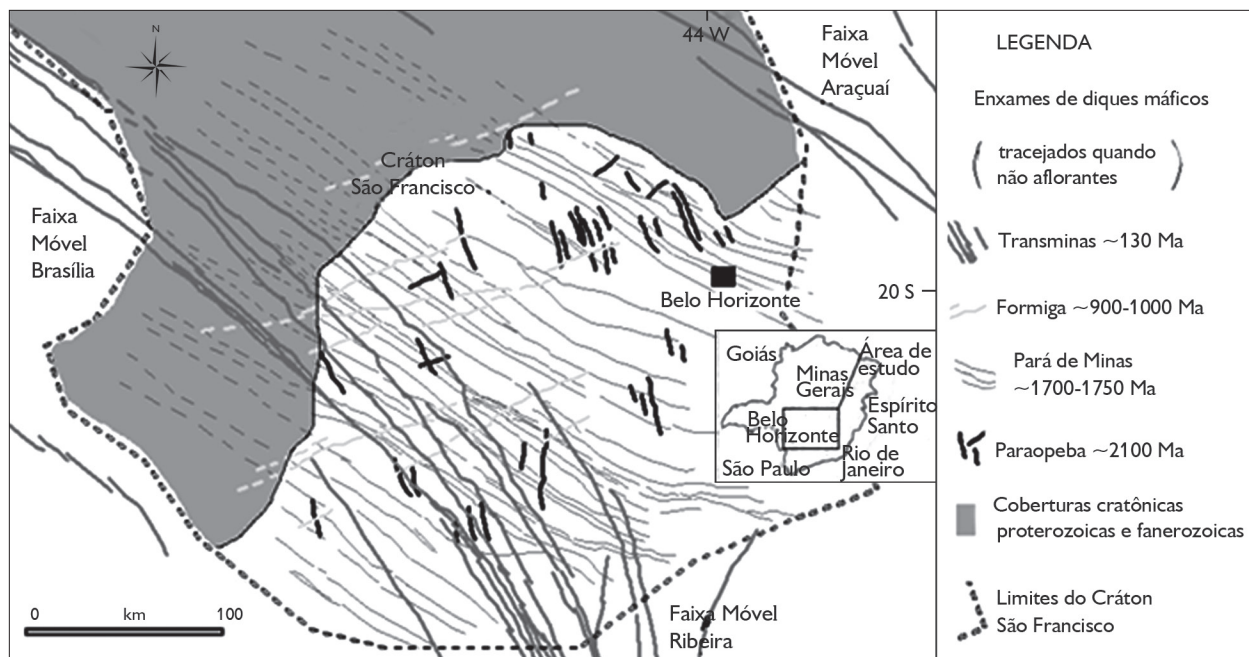


Figura 1. Principais enxames de diques máficos do setor sul do Cráton São Francisco em Minas Gerais, local de coleta das amostras investigadas (modificado de Chaves, 2013). As faixas móveis que circundam o cráton são Brasilianas.

fracionada, apresentaram suas amostras alinhadas ao longo, respectivamente, das correlações $A/B = 5,3$ e $A/B = 3,0$. Isso leva a entender que a assinatura das fontes mantélicas desses enxames, guardadas nas razões dos elementos incompatíveis propostos, é essencialmente mantida mesmo sob a atuação desses processos.

Tabela 1. Concentrações de Zr, Nb e Y (ppm) e razões Zr/Nb e Zr/Y das amostras de diques máficos dos quatro principais enxames do setor sul do Cráton São Francisco, em Minas Gerais. (Continua)

Enxame Transminas													
Amostra	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	
Nb	16	18	12	20	17	11	15	12	17	14	15	11	
Zr	137	247	184	284	251	194	184	181	198	189	191	160	
Y	30	32	22	29	30	22	27	21	32	27	27	20	
Zr/Nb	8,56	13,7	15,3	14,2	14,8	17,6	12,3	15,1	11,6	13,5	12,7	14,5	
Zr/Y	4,57	7,72	8,36	9,79	8,37	8,82	6,81	8,62	6,19	7,00	7,07	8,00	
Enxame Formiga													
Amostra	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13
Nb	32	44	60	34	39	35	35	39	30	28	32	27	36
Zr	305	489	691	295	330	301	277	290	340	343	237	288	235
Y	31	45	49	18	26	25	25	22	20	22	20	20	22
Zr/Nb	9,53	11,1	11,5	8,68	8,46	8,60	7,91	7,44	11,3	12,3	7,41	10,7	6,53
Zr/Y	9,84	10,9	14,1	16,4	12,7	12,0	11,1	13,2	17,0	15,6	11,9	14,4	10,7
Enxame Pará de Minas													
Amostra	PM1	PM2	PM3	PM4	PM5	PM6	PM7	PM8	PM9	PM10	PM11	PM12	
Nb	12	15	13	13	19	20	12	12	12	19	17	11	
Zr	182	250	222	209	261	316	190	185	194	262	275	189	
Y	34	46	38	35	46	45	35	36	36	46	38	28	
Zr/Nb	15,2	16,7	17,1	16,1	13,7	15,8	15,8	15,4	16,2	13,8	16,2	17,2	
Zr/Y	5,35	5,43	5,84	5,97	5,67	7,02	5,43	5,14	5,39	5,70	7,24	6,75	
Amostra	PM13	PM14	PM15	PM16	PM17	PM18	PM19	PM20	PM21	PM22	PM23	PM24	
Nb	17	11	18	13	15	20	15	14	14	13	16	12	
Zr	341	202	328	253	298	250	284	284	261	269	281	215	
Y	47	34	48	38	42	43	38	38	36	38	38	31	
Zr/Nb	20,1	18,4	18,2	19,5	19,9	12,5	18,9	20,3	18,6	20,7	17,6	17,9	
Zr/Y	7,26	5,94	6,83	6,66	7,10	5,81	7,47	7,47	7,25	7,08	7,39	6,94	
Amostra	PM25	PM26	PM27	PM28	PM29	PM30	PM31	PM32	PM33	PM34	PM35	PM36	
Nb	15	16	16	17	16	13	17	13	13	16	10	9	
Zr	311	247	303	319	305	215	305	249	157	304	183	150	
Y	41	46	41	44	45	33	46	34	33	42	25	26	
Zr/Nb	20,7	15,4	18,9	18,8	19,1	16,5	17,9	19,2	12,1	19,0	18,3	16,7	
Zr/Y	7,59	5,37	7,39	7,25	6,78	6,52	6,63	7,32	4,76	7,24	7,32	5,77	



Tabela 1.

(Conclusão)

Enxame Pará de Minas												
Amostra	PM37	PM38	PM39	PM40	PM41	PM42	PM43	PM44	PM45	PM46	Pm47	PM48
Nb	20	19	14	13	11	16	12	12	13	12	12	15
Zr	253	261	219	202	185	228	182	185	191	189	190	215
Y	42	44	40	39	36	36	36	37	35	35	36	41
Zr/Nb	12,7	13,7	15,6	15,5	16,8	14,3	15,2	15,4	14,7	15,8	15,8	14,3
Zr/Y	6,02	5,93	5,48	5,18	5,14	6,33	5,06	5,00	5,46	5,40	5,28	5,24
Amostra	PM49	PM50	PM51	PM52	PM53	PM54	PM55					
Nb	13	14	11	11	13	13	20					
Zr	201	215	176	165	187	216	251					
Y	36	37	33	35	37	42	48					
Zr/Nb	15,5	15,4	16,0	15,0	14,4	16,6	12,6					
Zr/Y	5,58	5,81	5,33	4,71	5,05	5,14	5,23					
Enxame Paraopeba												
Amostra	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
Nb	6	6	5	6	5	8	8	9	6	8	8	5
Zr	97	85	87	92	94	124	131	140	98	107	126	84
Y	29	27	29	31	33	31	39	43	32	24	28	21
Zr/Nb	16,2	14,2	17,4	15,3	18,8	15,5	16,4	15,6	16,3	13,4	15,8	16,8
Zr/Y	3,34	3,15	3,00	2,97	2,85	4,00	3,36	3,26	3,06	4,46	4,50	4,00
Amostra	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24
Nb	7	6	6	14	6	8	3	8	7	11	14	10
Zr	88	113	90	157	125	120	60	151	133	195	215	193
Y	25	25	26	80	31	28	14	41	37	40	55	46
Zr/Nb	12,6	18,8	15,0	11,2	20,8	15,0	20,0	18,9	19,0	17,7	15,4	19,3
Zr/Y	3,52	4,52	3,46	1,96	4,03	4,29	4,29	3,68	3,59	4,88	3,91	4,20
Amostra	P25	P26	P27	P28	P29	P30	P31	P32	P33	P34	P35	P36
Nb	5	7	8	8	6	9	4	6	6	7	6	8
Zr	68	124	127	127	88	108	65	79	93	90	83	114
Y	23	33	35	36	26	43	29	40	33	34	33	43
Zr/Nb	13,6	17,7	15,9	15,9	14,7	12,0	16,3	13,2	15,5	12,9	13,8	14,3
Zr/Y	2,96	3,76	3,63	3,53	3,38	2,51	2,24	1,98	2,82	2,65	2,52	2,65
Amostra	P37	P38	P39	P40	P41							
Nb	8	6	12	8	7							
Zr	90	85	197	129	137							
Y	40	33	41	36	39							
Zr/Nb	11,3	14,2	16,4	16,1	19,6							
Zr/Y	2,25	2,58	4,80	3,58	3,51							



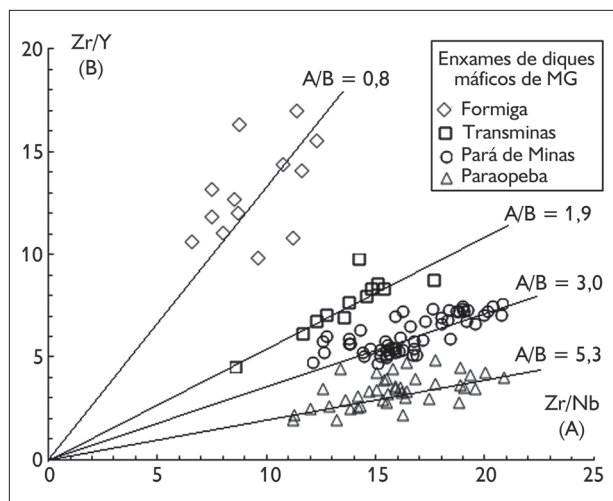


Figura 2: Diagrama binário Zr/Nb (A) versus Zr/Y (B) para os diferentes enxames de diques do setor sul do Cráton São Francisco, em Minas Gerais (MG).

As razões Zr/Y mais elevadas (acima de 10) dos diques do enxame Formiga, em relação às dos demais enxames, parecem refletir a retenção de granada (ou a inexistência deste mineral) na sua fonte mantélica durante os processos de fusão parcial. As maiores e crescentes razões Zr/Nb dos diques dos demais enxames (geralmente acima de 12) em relação ao enxame Formiga parecem indicar que seus magmas tendem a ficar mais pobres em ilmenita/ilmenomagnetita no decurso da evolução magmática, já que o Nb deve ficar retido nesses minerais opacos que vão precocemente cristalizando no magma basáltico, logo após a fusão parcial de suas fontes mantélicas. A maior dispersão das amostras dos diques do enxame Formiga em torno da linha de correlação sugere a atuação de processos de contaminação crustal dos mesmos, processos estes que parecem menos intensos nos diques Pará de Minas e Paraopeba, e menos intensos ainda nos diques Transminas, cujas amostras se alinham quase perfeitamente ao longo da correlação A/B = 1,9.

Em adição aos critérios de orientação geográfica, petrografia, litoquímica, química isotópica, cronoestratigrafia e geocronologia dos enxames de diques máficos, uma vez garantido um representativo número de amostras

analisadas na elaboração do diagrama binário Zr/Nb versus Zr/Y, este demonstra ser uma importante ferramenta complementar na distinção das fontes mantélicas de diferentes enxames de diques máficos.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de produtividade em pesquisa concedida ao autor.

REFERÊNCIAS

- CHAVES, A. O., 2013. Enxames de diques máficos de Minas Gerais – o estado da arte. **Geonomos** 21(1): 29-33.
- CONDIE, K. C., 2003. Incompatible element ratios in oceanic basalts and komatiites: tracking deep mantle sources and continental growth rates with time. **Geochemistry, Geophysics, Geosystems** 4(1): 1-28.
- CONDIE, K. C., 2005. High field strength ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? **Lithos** 79(3-4): 491-504.
- EISSEN, J.-P., T. JUTEAU, J.-L. JORON, B. DUPRÉ, E. HUMLER & A. AL'MUKHAMEDOV, 1989. Petrology and geochemistry of basalts from the Red Sea axial rift at 18° North. **Journal of Petrology** 30(4): 791-839.
- FITTON, J. G., A. D. SAUNDERS, M. J. NORRY, B. S. HARDARSON & R. N. TAYLOR, 1997. Thermal and chemical structure of the Iceland plume. **Earth and Planetary Science Letters** 153(3-4): 197-208.
- FLOYD, P. A., 1989. Geochemical features of intraplate oceanic plateau basalts. In: A. D. SAUNDERS & M. J. NORRY (Eds.): **Magmatism in the ocean basins**: 215-230. Geological Society (Special Publications, 42), London.
- HALLS, H. C. & W. F. FAHRIG (Eds.), 1987. Mafic dyke swarms. **Geological Association of Canada. Special Paper** 34: 1-503.
- KLEMME, S., D. GÜNTHER, K. HAMETNER, S. PROWATKE & T. ZACK, 2006. The partitioning of trace elements between ilmenite, ulvöspinel, armalcolite and silicate melts with implications for the early differentiation of the moon. **Chemical Geology** 234(3-4): 251-263.
- NATLAND, J. H., 2007. Δ Nb and the role of magma mixing at the East Pacific Rise and Iceland. In: G. R. FOULGER & D. M. JURDY (Eds.): **Plates, plumes, and planetary processes**: 413-449. Geological Society of America (Special Paper, 430), Boulder.
- ROLLINSON, H. R., 1993. **Using geochemical data**: evaluation, presentation, interpretation: 1-384. Routledge (Longman Geochemistry Series), New York.