

CAPÍTULO 3: LITOGEOQUÍMICA

3.1 Discriminação de séries, suítes e classificações de rocha

Vinte e três amostras de rochas basálticas provenientes do Arquipélago de Abrolhos foram analisadas neste trabalho. Dezoito amostras foram coletadas na Ilha de Santa Bárbara, três amostras foram coletadas na Ilha Siriba e duas amostras são da Ilha Sueste. Os dados litogeoquímicos são apresentados no Apêndice B.

O *software* NEWPET foi utilizado para a construção de diagramas de discriminação de séries, classificação de rochas e cálculo da norma CIPW. Os métodos analíticos e valores de precisão e exatidão são apresentados no Apêndice C.

Os dados geoquímicos incluem: a) elementos maiores (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{t}}$, MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5) e a perda ao fogo (PF); b) elementos traços incompatíveis móveis (Ba, Rb, Sr, U e Th), incompatíveis imóveis (Zr, Y, Nb, Hf e Ta), compatíveis (Ni, Cr, V, Co) e elementos terras raras (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb e Lu). Os elementos maiores foram expressos em percentagem de peso (%peso), enquanto que os elementos traços foram expressos em partes por milhão (ppm). O ferro de todas as amostras estudadas nesta dissertação de mestrado foi analisado como ferro total expresso sob a forma de ferro férrico ($\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{t}}$).

Os valores de PF das amostras analisadas são, em geral, superiores a 2% peso (mínimo: 0,03% peso; máximo: 3,88% peso; média: 2,58% peso). Valores elevados de PF indicam, em geral, que as rochas estão mais alteradas do que aquelas com menores valores de PF (IRVINE & BARAGAR, 1971). Os valores de PF indicam o estado de alteração das rochas, que pode ter tido origem subsólida ou intempérica.

As somas dos óxidos das amostras analisadas estão dentro do intervalo considerado satisfatória, entre 99% e 101% peso. As amostras FA-GE-13a, FA-CV-03b, FA-CV-11 e FA-CV-20 apresentaram totais de óxidos 98,61% peso, 98,84% peso, 98,65% peso e 98,61% peso, respectivamente (Apêndice B). Mesmo estando fora do intervalo considerado satisfatório nesta dissertação, estas amostras foram utilizadas neste trabalho, muito embora atenção especial tenha sido dispensada às mesmas, em função do surgimento de discrepâncias durante as interpretações.

O cálculo de coeficientes de variação, que consiste no valor do desvio padrão dividido pela média, foi feito para se ter uma estimativa da qualidade das análises utilizadas (Tabela 5). Valores elevados de coeficientes de variação podem indicar: a) erro analítico (que pode ser testado com dados de precisão e exatidão (Apêndice C); b) alteração (que pode ser testada pela checagem dos valores de PF e pelas variações dos elementos traços incompatíveis imóveis (p. ex.: Y, Zr e Nb); ou c) existência de mais de uma suíte magmática, o que pode ser verificado pelos coeficientes de variação para elementos incompatíveis imóveis com valores satisfatórios de precisão e exatidão.

Os valores do coeficiente de variação são baixos para 91% das amostras analisadas. Valores relativamente elevados de coeficiente de variação, encontrados para K_2O (0,69), Ba (1,25) e Rb (0,91) (Tabela 5), podem ser decorrentes da atuação de processos *subsolidus* e/ou intempéricos, uma vez que estes elementos são móveis.

Tabela 5: Valores máximos, mínimos, médias, desvios-padrão e coeficientes de variação de óxidos e elementos das rochas estudadas (Fe_2O_3^t é ferro total sob a forma de ferro férrico e PF é a perda ao fogo).

Nº de amostras	Elemento	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação
23	MgO	4,67	7,90	6,11	1,00	0,16
23	SiO₂	42,38	49,23	44,82	2,00	0,04
23	TiO₂	4,23	6,80	5,32	0,82	0,15
23	Al₂O₃	11,41	16,06	13,02	1,18	0,09
23	Fe₂O₃	9,86	15,91	14,02	1,42	0,10
23	MnO	0,10	0,27	0,16	0,04	0,22
23	CaO	6,46	11,91	9,583	1,26	0,13
23	Na₂O	1,70	4,42	2,997	0,65	0,22
23	K₂O	0,32	4,04	1,069	0,74	0,69
23	P₂O₅	0,25	0,56	0,385	0,10	0,26
23	PF	0,03	3,88	2,579	1,01	0,39
23	Total	98,61	100,66	99,72	0,62	0,01
23	Ni	60,00	180,00	110,4	35,35	0,32
23	Cr	50,00	200,00	102,9	56,43	0,55
23	Sc	25,00	38,00	30,7	4,25	0,14
23	Co	31,00	73,00	51,35	10,23	0,20
23	V	391,00	525,00	450,6	35,68	0,08
23	Ba	99,00	2477,00	390,6	488,11	1,25
23	Rb	9,00	128,00	26,26	23,97	0,91
23	Sr	385,00	816,00	577	118,02	0,20
23	Y	19,00	41,00	26,39	6,00	0,23
23	Zr	160,00	303,00	216,7	44,76	0,21
23	Nb	33,00	53,00	43,83	7,07	0,16
23	La	15,00	33,90	23,86	6,04	0,25
23	Ce	39,00	79,50	57,13	14,02	0,25
23	Pr	5,03	9,71	6,976	1,63	0,23
23	Nd	22,60	44,00	31,55	7,05	0,22
23	Sm	5,40	10,30	7,265	1,52	0,21
23	Eu	1,97	4,03	2,736	0,57	0,21
23	Gd	5,50	10,50	7,196	1,46	0,20
23	Tb	0,90	1,70	1,165	0,24	0,20
23	Dy	4,70	8,80	6,217	1,23	0,20
23	Ho	0,80	1,50	1,065	0,22	0,21
23	Er	2,10	3,90	2,809	0,56	0,20
23	Tm	0,28	0,52	0,372	0,07	0,20
23	Yb	1,60	3,00	2,161	0,43	0,20
23	Lu	0,22	0,41	0,293	0,06	0,21
23	Hf	4,50	7,60	5,704	1,01	0,18
23	Ta	2,30	3,70	2,917	0,43	0,15
23	Th	1,70	3,70	2,513	0,62	0,24
23	U	0,30	1,00	0,67	0,21	0,31

O cálculo da norma CIPW (Tabela 6) das rochas estudadas foi feito utilizando-se uma razão $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ de 0,85 (MIDDLEMOST, 1989). Os resultados revelaram que 57% das amostras analisadas são insaturadas em sílica (com nefelina normativa), indicando a afinidade alcalina da série. Sete amostras, que correspondem a 30% do total das amostras analisadas, são saturadas em sílica e três amostras (13% do total das amostras analisadas) são supersaturadas em sílica. Cinco das amostras saturadas em sílica correspondem a um grupo de quatro amostras da Unidade Piroxênio-Plagioclásio Basalto e são restritas à porção oriental da Ilha de Santa Bárbara. Duas das amostras saturadas correspondem à Unidade Piroxênio-Plagioclásio-Olivina Basalto da Ilha Siriba. Duas das amostras supersaturadas correspondem à Unidade Olivina-Plagioclásio Basalto da Ilha Sueste. A terceira amostra supersaturada corresponde à Unidade Piroxênio-Plagioclásio-Olivina Basalto da Ilha Siriba.

A saturação em sílica nas amostras da Ilha de Santa Bárbara pode ser resultante de processos de alteração secundária, uma vez que os valores de perda ao fogo são elevados. A mesma justificativa, no entanto, não pode ser atribuída às amostras saturadas e supersaturadas da Ilha de Siriba e da Ilha Sueste, uma vez que as mesmas exibem restritos produtos de alteração e baixos valores de perda ao fogo (p.ex.: 0,03% peso).

As rochas estudadas caracterizam uma série transicional (Figura 39). Os dados geoquímicos e petrográficos indicam que a série basáltica de Abrolhos é, pelo menos, predominantemente alcalina. Os valores de índice alcaítico mostram que a série é miaskítica ($0,65 < (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 < 0,99$; SØRENSEN, 1974) e o *trend* é metaluminoso (Figuras 40). O caráter miaskítico da série é corroborado pela ausência de acmita na norma CIPW (Tabela 6).

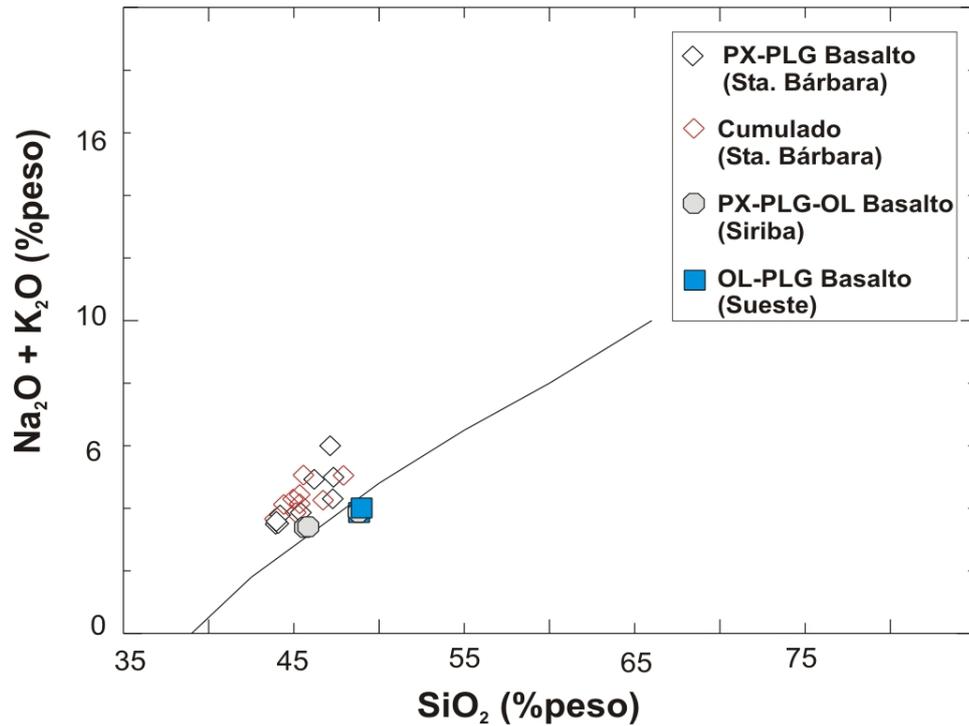


Figura 39: Diagrama TAS (Total de Álcalis versus Sílica) de discriminação de séries (IRVINE & BARAGAR, 1971) para as rochas estudadas. Dados recalculados para 100% em base anídrica. PX = piroxênio, PLG = Plagioclásio, OL = olivina.

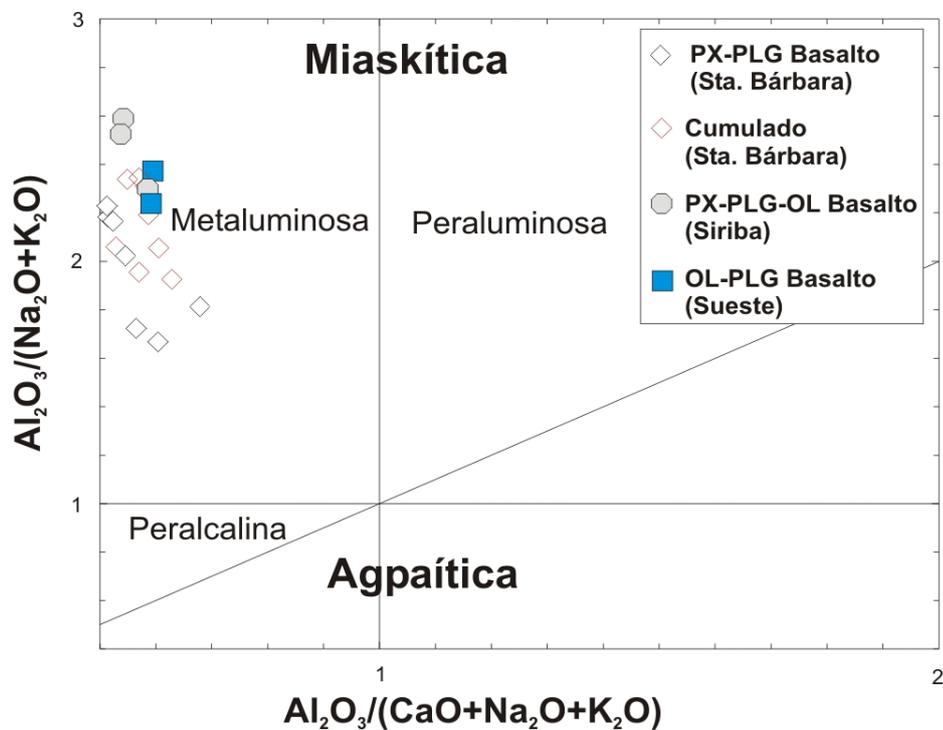


Figura 40: Diagrama de razões de óxidos (em proporção molecular) utilizados na discriminação de série magmática (MANIAR & PICCOLI, 1989) para as rochas estudadas. Dados recalculados para 100% em base anídrica. Os valores são calculados em proporção molecular. PX = piroxênio, PLG = Plagioclásio, OL = olivina.

Tabela 6: Valores da norma CIPW, incluindo mínimos, máximos, médias e desvios-padrão. Todos os valores são expressos em %peso. Os minerais normativos são os seguintes: Q = quartzo, Or = ortoclásio, Ab = albita, An = anortita, Ne = nefelina, Ac = acmita, Di = diopsídio, Hy = hiperstênio, Ol = olivina, Mt = magnetita, Il = ilmenita e Ap = apatita.

Unidade	Amostras	Q	Or	Ab	An	Ne	Ac	Di	Hy	Ol	Mt	Il	Ap	Total
Cumulado (b ₄)	FA-CV-03a	0	3,63	24,04	22,15	4,10	0	22,07	0	9,81	3,11	10,54	0,67	100,12
Cumulado (b ₄)	FA-CV-03b	0	3,23	23,63	23,61	3,95	0	23,11	0	9,25	2,96	9,68	0,70	100,12
Cumulado (b ₄)	FA-CV-05	0	6,48	22,41	21,33	0,82	0	23,43	0	11,40	3,36	10,08	0,79	100,10
Cumulado (b ₄)	FA-GE-07	0	6,88	18,74	18,61	1,54	0	25,91	0	11,81	3,26	12,76	0,62	100,13
Cumulado (b ₄)	FA-GE-09a	0	5,09	24,12	24,22	2,71	0	24,34	0	7,52	2,64	8,71	0,81	100,16
Cumulado (b ₄)	FA-GE-09b	0	3,07	29,54	23,35	4,99	0	22,39	0	4,99	2,22	8,79	0,79	100,13
Cumulado (b ₄)	FA-GE-09c	0	1,98	28,94	18,82	3,41	0	21,97	0	9,18	3,08	11,91	0,82	100,11
Cumulado (b ₄)	FA-GE-13a	0	6,13	23,24	18,23	1,84	0	24,01	0	9,51	3,29	13,08	0,78	100,11
Cumulado (b ₄)	FA-GE-13b	0	7,18	26,32	19,64	3,71	0	17,87	0	11,31	3,39	9,71	1,02	100,15
Piroxênio-Plagioclásio Basalto (b ₃)	FA-CV-01c	0	4,31	30,09	15,40	3,22	0	20,63	0	12,07	3,31	9,88	1,21	100,12
Piroxênio-Plagioclásio Basalto (b ₃)	FA-CV-02	0	2,84	18,35	17,81	4,13	0	33,15	0	6,81	2,80	13,49	0,72	100,10
Piroxênio-Plagioclásio Basalto (b ₃)	FA-CV-07	0	3,01	22,83	19,10	1,95	0	25,19	0	11,33	3,25	12,77	0,69	100,12
Piroxênio-Plagioclásio Basalto (b ₃)	FA-CV-16	0	10,57	27,82	16,33	0	0	11,98	11,16	7,77	3,61	9,84	1,15	100,23
Piroxênio-Plagioclásio Basalto (b ₃)	FA-CV-18	0	9,40	19,05	17,53	0	0	23,14	1,55	12,95	3,54	12,14	0,81	100,11
Piroxênio-Plagioclásio Basalto (b ₃)	FA-CV-19b	0	7,74	22,11	18,18	0	0	23,13	1,88	12,55	3,42	10,16	0,93	100,10
Piroxênio-Plagioclásio Basalto (b ₃)	FA-CV-19b1	0	25,34	15,24	13,91	0	0	16,85	4,08	10,57	3,34	9,94	1,15	100,42
Piroxênio-Plagioclásio Basalto (b ₃)	FA-CV-20	0	7,23	26,55	18,13	0	0	21,79	5,99	6,86	3,27	9,02	1,33	100,17
Piroxênio-Plagioclásio Basalto (b ₃)	FA-GE-04	0	4,47	15,61	19,76	4,27	0	32,30	0	7,49	2,76	12,74	0,75	100,15
Piroxênio-Plagioclásio-Olivina Basalto (b ₂)	FA-CV-10a	0	5,90	20,90	21,41	0,00	0	22,58	12,10	1,85	3,45	10,75	1,18	100,12
Piroxênio-Plagioclásio-Olivina Basalto (b ₂)	FA-CV-10b	1,56	6,75	23,61	20,67	0	0	18,51	16,17	0	3,16	8,38	1,31	100,12
Piroxênio-Plagioclásio-Olivina Basalto (b ₂)	FA-CV-11	0	5,96	20,60	22,11	0	0	22,70	10,36	3,18	3,39	10,73	1,07	100,10
Olivina-Plagioclásio Basalto (b ₁)	FA-CV-13	1,25	6,97	23,17	21,67	0	0	18,37	16,27	0	3,05	8,15	1,20	100,10
Olivina-Plagioclásio Basalto (b ₁)	FA-CV-12b	1,74	7,27	24,03	20,30	0	0	18,03	15,78	0	3,14	8,47	1,34	100,10
	Mínimo	0	1,98	15,24	13,91	0	0	11,98	0	0	2,22	8,15	0,62	100,10
	Máximo	1,74	25,34	30,09	24,22	4,99	0	33,15	16,27	12,95	3,61	13,49	1,34	100,42
	Média	0,20	6,58	23,08	19,66	1,77	0	22,32	4,15	7,75	3,17	10,51	0,95	100,14
	Desvio padrão	0,53	4,63	4,05	2,63	1,84	0	4,56	6,09	4,20	0,32	1,66	0,24	0,07

Com base na sua composição química as rochas estudadas nesta dissertação foram classificadas (LE MAITRE *ET AL.*, 1989). As amostras classificaram como basaltos, traqui-basaltos, basanitos e tefritos (Unidade Piroxênio-Plagioclásio Basalto e Cumulado, coletadas na Ilha de Santa Bárbara); e basaltos (amostras coletadas nas ilhas de Siriba e Sueste, correspondentes, respectivamente, às Unidades Piroxênio-Plagioclásio-Olivina Basalto e Olivina-Plagioclásio Basalto) (Figura 42).

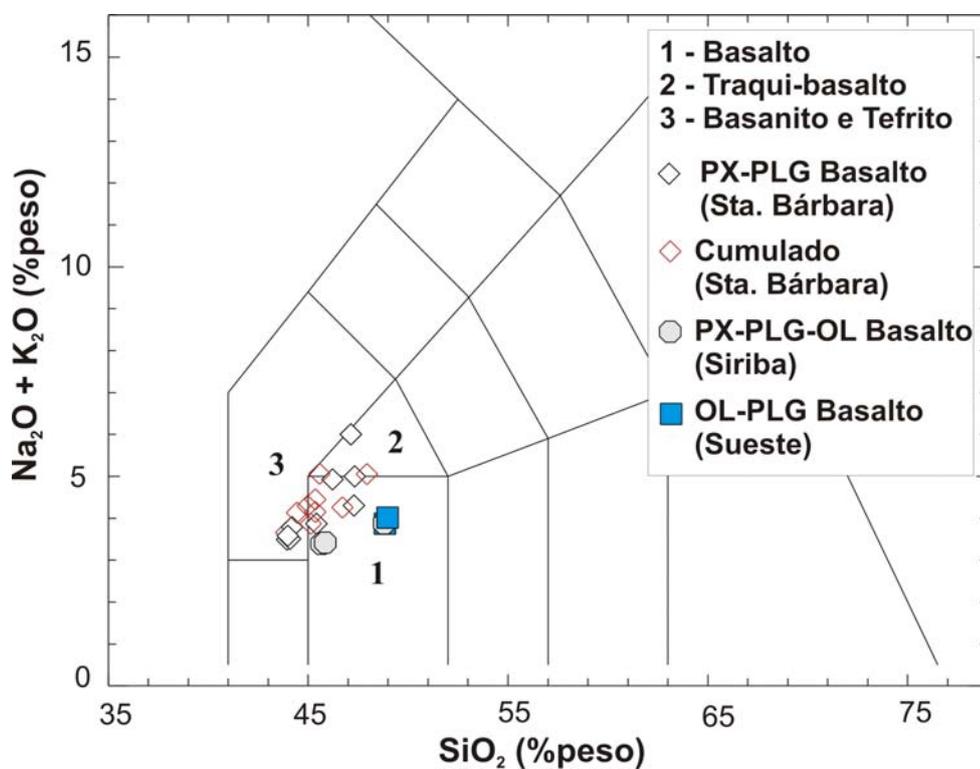


Figura 41: Diagrama TAS (Total de Álcalis *versus* Sílica) de classificação química para as rochas estudadas (LEMAITRE *ET AL.*, 1989). Dados recalculados para 100% em base anídrica. PX = piroxênio, PLG = Plagioclásio, OL = olivina.

Os álcalis têm alta mobilidade diante de processos secundários intempéricos e/ou hidrotermais. Sendo assim, as amostras também foram plotadas em diagrama de classificação química que se baseiam em elementos considerados imóveis, tais como, zircônio (Zr), nióbio (Nb), ítrio (Y) e óxido de titânio (TiO₂) (WINCHESTER & FLOYD, 1977). No diagrama Nb/Y *versus* Zr/TiO₂ (Figura 43), as amostras também foram projetadas no campo dos basaltos. É interessante notar que mesmo as

amostras saturadas e supersaturadas em sílica apresentaram afinidade alcalina quando consideradas as razões de Nb/Y, uma vez que estas amostras têm razão $Nb/Y > 1$. Esta razão foi considerada, por alguns autores, como um índice de alcalinidade em estudos de províncias basálticas em outras partes do mundo (p.ex.: PEARCE & CANN, 1973).

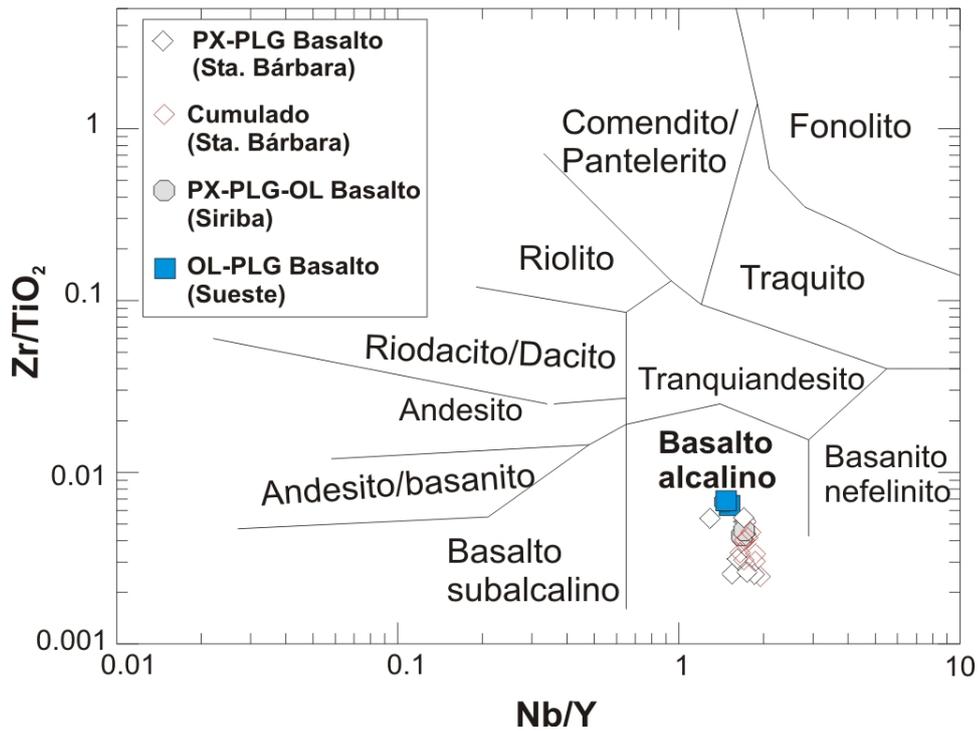


Figura 42: Diagrama de classificação de rocha para as amostras estudadas (WINCHESTER & FLOYD, 1977). PX = piroxênio, PLG = Plagioclásio, OL = olivina.

3.2 Discriminação de possíveis processos petrogenéticos evolutivos

As Unidades Magmáticas mapeadas no Arquipélago de Arolhos são formadas por rochas basálticas com características mineralógicas, texturais e estruturais distintas, como já discutidas no capítulo 2 desta dissertação. Desta forma, faz-se necessário averiguar se há co-geneticidade entre as unidades estudadas. Com esta finalidade, a discriminação dos processos petrogenéticos evolutivos foi feita com base em diagramas de variação construídos para elementos maiores (Figura 43) e elementos traços incompatíveis móveis (Ba, Rb, Sr) e elementos traços incompatíveis imóveis (Zr, Y, Nb e Eu) (Figura 44) de quatorze amostras oriundas das Unidades Piroxênio-Plagioclásio Basalto (b_3), Piroxênio-Plagioclásio-Olivina Basalto (b_2) e Olivina-Plagioclásio Basalto (b_1).

As amostras da Unidade Cumulado (b_4) não foram utilizadas para discriminação de processos evolutivos da série transicional estudada. Este procedimento requer a análise da matriz da rocha estudada. A matriz representa a composição do líquido magmático que pode ter sofrido diferenciação magmática por meio de algum processo evolutivo, por exemplo, cristalização fracionada. No caso da Unidade Cumulado a matriz é intersticial e está em menor volume que os fenocristais, tornando-se, portanto, difícil a separação apenas da matriz para análise química. Para demonstrar o efeito da análise da rocha cumulática, nove amostras da Unidade Cumulado foram inseridas no diagrama de variação, no entanto não foram consideradas nos estudos quantitativos e qualitativos. Pode-se notar que a análise do Cumulado, se considerada, inseriria erros analíticos nos diagramas, como, por exemplo, o incremento de CaO e Al_2O_3 . Este incremento ocorre devido à influência dos fenocristais de clinopiroxênios, que perfazem 60% do volume da rocha desta unidade.

Curvas lineares e polinomiais foram inseridas nos diagramas de variação e os respectivos valores dos quadrados dos coeficientes de correlação de Pearson ($(R^2)_L$ e $(R^2)_P$) e níveis de significância associados (NS_L e NS_P) são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Valores dos quadrados dos coeficientes de correlação (R^2) e níveis de significância (NS) para as amostras das unidades Piroxênio-Plagioclásio Basalto, Piroxênio-Plagioclásio Olivina Basalto e Olivina-Plagioclásio Basalto. N = número de amostras, $(R^2)_L$ = coeficiente de correlação linear, $(R^2)_P$ = coeficiente de correlação polinomial, NS_L = nível de significância para a correlação linear e NS_P = nível de significância para a correlação polinomial. $Fe_2O_{3(t)}$ é ferro total.

Nº de amostras	Elemento	$(R^2)_L$	NS_L	$(R^2)_P$	NS_P
14	SiO ₂	0,7374	>99,9%	0,8574	>99,9%
14	TiO ₂	0,7643	>99,9%	0,7645	>99,9%
14	Al ₂ O ₃	0,6908	>99,9%	0,7661	>99,9%
14	Fe ₂ O _{3(t)}	0,1662	80-90%	0,3551	95-99%
14	Cão	0,3272	95-99%	0,4136	95-99%
14	Na ₂ O	0,0103	<80%	0,0107	<80%
14	K ₂ O	0,0929	<80%	0,1272	<80%
14	P ₂ O ₅	0,9261	>99,9%	0,9407	>99,9%
14	Ba	0,0535	<80%	0,3259	<80%
14	Rb	0,066	<80%	0,3323	<80%
14	Sr	0,002	<80%	0,1838	<80%
14	Nb	0,8566	>99,9%	0,9311	>99,9%
14	Y	0,7215	>99,9%	0,8607	>99,9%
14	Zr	0,9006	>99,9%	0,9524	>99,9%
14	Eu	0,764	>99,9%	0,7645	>99,9%

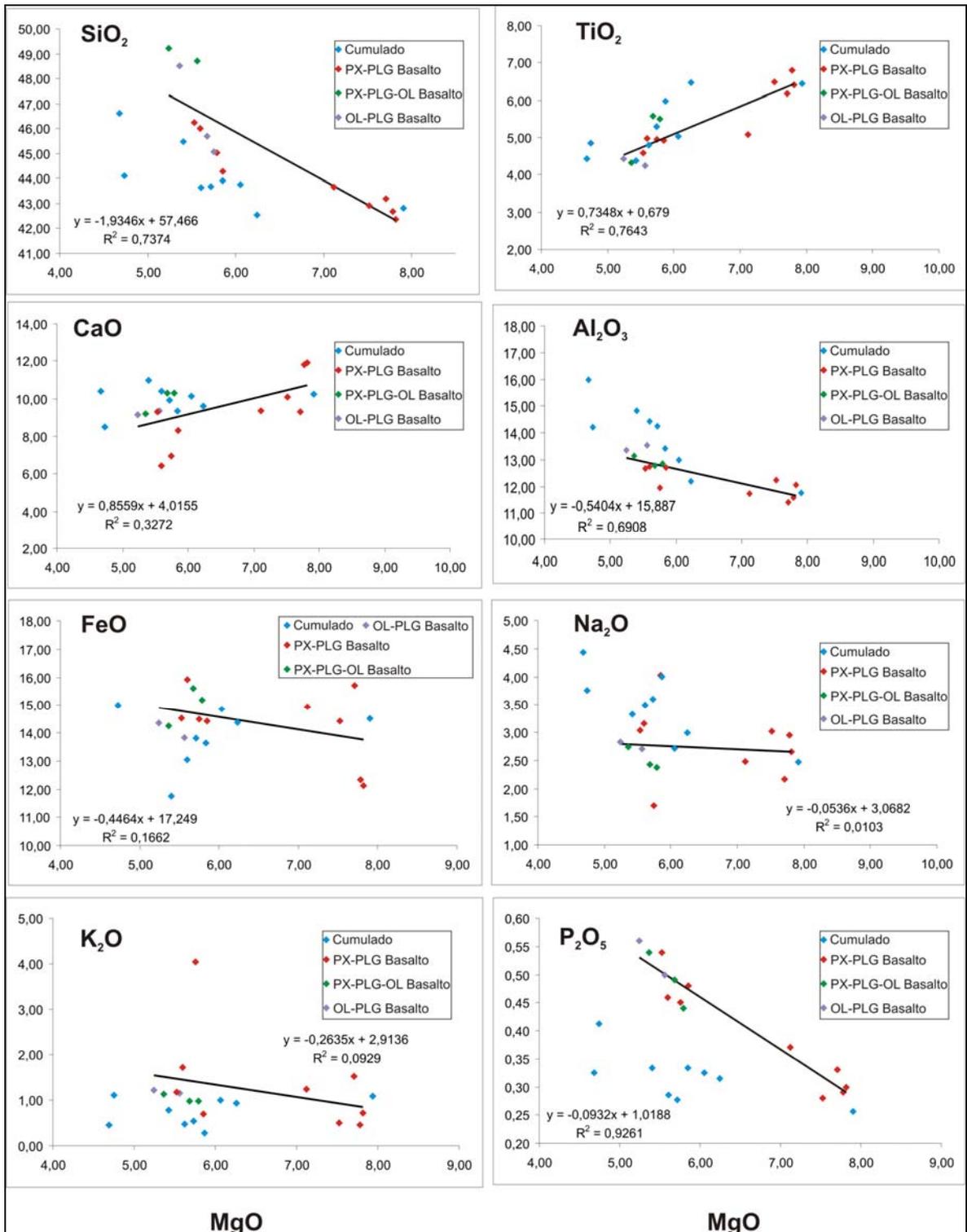


Figura 43: Diagramas de variação para elementos maiores discriminantes de processos evolutivos para a série transicional de afinidade alcalina da área de estudo. As curvas lineares, suas respectivas equações e os quadrados dos coeficientes de correlação (R^2) são mostrados no diagrama. PX = piroxênio, PLG = Plagioclásio, OL = olivina.

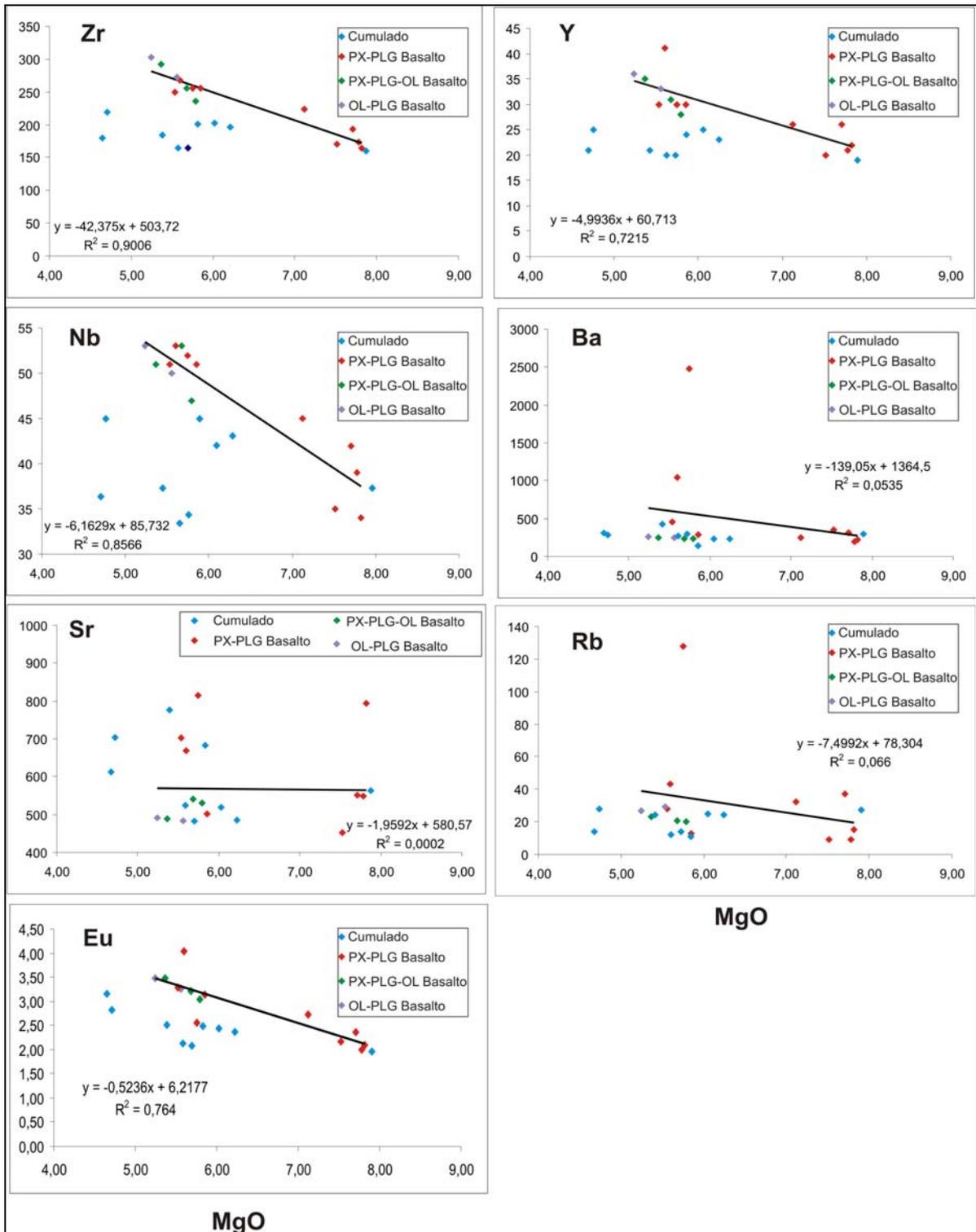


Figura 44: Diagramas de variação para elementos traços discriminantes de processos evolutivos para série transicional de afinidade alcalina da área de estudo. As curvas lineares, suas respectivas equações e os quadrados dos coeficientes de correlação (R^2) são mostrados no diagrama. PX = piroxênio, PLG = Plagioclásio, OL = olivina.

Os diagramas de variação (Figura 43 e 44) apresentam um hiato composicional de 1,2% peso de MgO (entre 5,9 e 7,1 %peso). Este hiato pode ser atribuído à deficiência de amostragem, uma vez que a área de exposição de afloramentos é restrita. A ausência de hiato composicional significativo nos diagramas de variação é indicativa de processos de evolução magmática por cristalização fracionada ou AFC (*Assimilation and Fractional Crystallisation*). Considerando-se a amostra FA-GE-04 como representativa de um líquido parental, ou seja, aquele menos evoluído de uma suíte, e a amostra FA-CV-12b como a amostra representativa do líquido mais evoluído, a variação das razões de elementos traços incompatíveis imóveis é inferior a 50% (Tabela 8). Esta variação caracteriza a evolução por cristalização fracionada sem assimilação concomitante. Os valores similares dos níveis de significância associados aos coeficientes de correlação lineares e polinomiais indicam que possíveis processos evolutivos por cristalização fracionada não teriam envolvido mudança na assembléia fracionante (Tabela 7).

Tabela 8: Variação das razões de elementos traços incompatíveis imóveis e terras raras dentro da série estudada.

Razões	Amostra parental (FA-GE-04)	Amostra mais evoluída (FA-CV-12b)	Varição
Zr/Y	7,4	8,4	1,0 (~14%)
La/Yb	9,1	11,0	1,9 (~21%)

Os diagramas de variação (Figuras 43 e 44), os valores de R^2 e os níveis de significância (Tabela 7) mostram dispersão para Fe_2O_3 (t), Na_2O , K_2O , Ba, Rb e Sr. Estes elementos são considerados móveis e, portanto, suscetíveis a alterações durante a atuação de processos intempéricos e/ou hidrotermais. Entretanto, os níveis de significância lineares e polinomiais observados para a maioria dos óxidos são todos superiores a 99,9%.

A análise dos diagramas de variação mostra o enriquecimento de sílica (SiO_2) com o decréscimo no teor de MgO (Figura 43). Este efeito é indicativo de cristalização de olivina. O decréscimo do TiO_2 poderia indicar a cristalização de Ti-

Augita, fase fracionante típica de basaltos alcalinos, ou ainda de algum óxido de titânio. A cristalização do piroxênio titano-augita deveria também resultar no decréscimo do CaO, Eu e Al_2O_3 . No entanto, apesar dos valores de CaO mostrarem uma tendência decrescente com o progresso da diferenciação (Figura 43), o Al_2O_3 tem seus teores progressivamente aumentados e o Eu se comporta claramente como um elemento incompatível. Considerando-se a hipótese de evolução por cristalização fracionada sem assimilação concomitante, este processo evolutivo teria que descartar não só a participação de clinopiroxênio como também de plagioclásio, fases fracionantes típicas em basaltos com teores de MgO como aqueles observados na área de estudo. Vale salientar, no entanto, que algumas das rochas estudadas (Ilha Sueste) de fato têm fenocristais deste mineral.

A considerar-se uma evolução por processos de cristalização fracionada, os dados químicos apontam para olivina como a única fase fracionante, o que é parcialmente corroborado pelas análises petrográficas das rochas estudadas. A olivina é, de fato, um fenocristal observado nas ilhas Sueste e Siriba. Os dados petrográficos (tópico 3.4) indicam que os fenocristais de plagioclásio e piroxênio das unidades das ilhas Santa Bárbara e Siriba apresentam feições de desequilíbrio cristal-líquido, ou seja, devem ter sido cristalizados a partir de outro líquido que não o coexistente (ou seja, representado pela matriz da rocha). O processo evolutivo de cristalização fracionada implica em fracionamento de fases minerais em equilíbrio cristal-líquido. Portanto, os basaltos das Unidades Olivina-Plagioclásio Basalto (b_1), Piroxênio-Plagioclásio-Olivina Basalto (b_2) e Piroxênio-Plagioclásio Basalto (b_3) não podem ser co-genéticos por processo evolutivo. Sendo assim, processos mais complexos que simplesmente cristalização fracionada devem ser considerados na proposição de modelos evolutivos para os basaltos de Abrolhos.

Diagramas de variação de elementos maiores (Figura 45) e elementos traços (Figura 46) foram construídos apenas para a Unidade Piroxênio-Plagioclásio Basalto (b_3) da Ilha de Santa Bárbara, na tentativa de discriminar, apenas para esta ilha, o processo evolutivo. O mesmo não pode ser feito para as unidades b_1 e b_2 , pois o número de amostras de cada unidade, respectivamente duas e três, não resulta num intervalo de MgO que permita a análise.

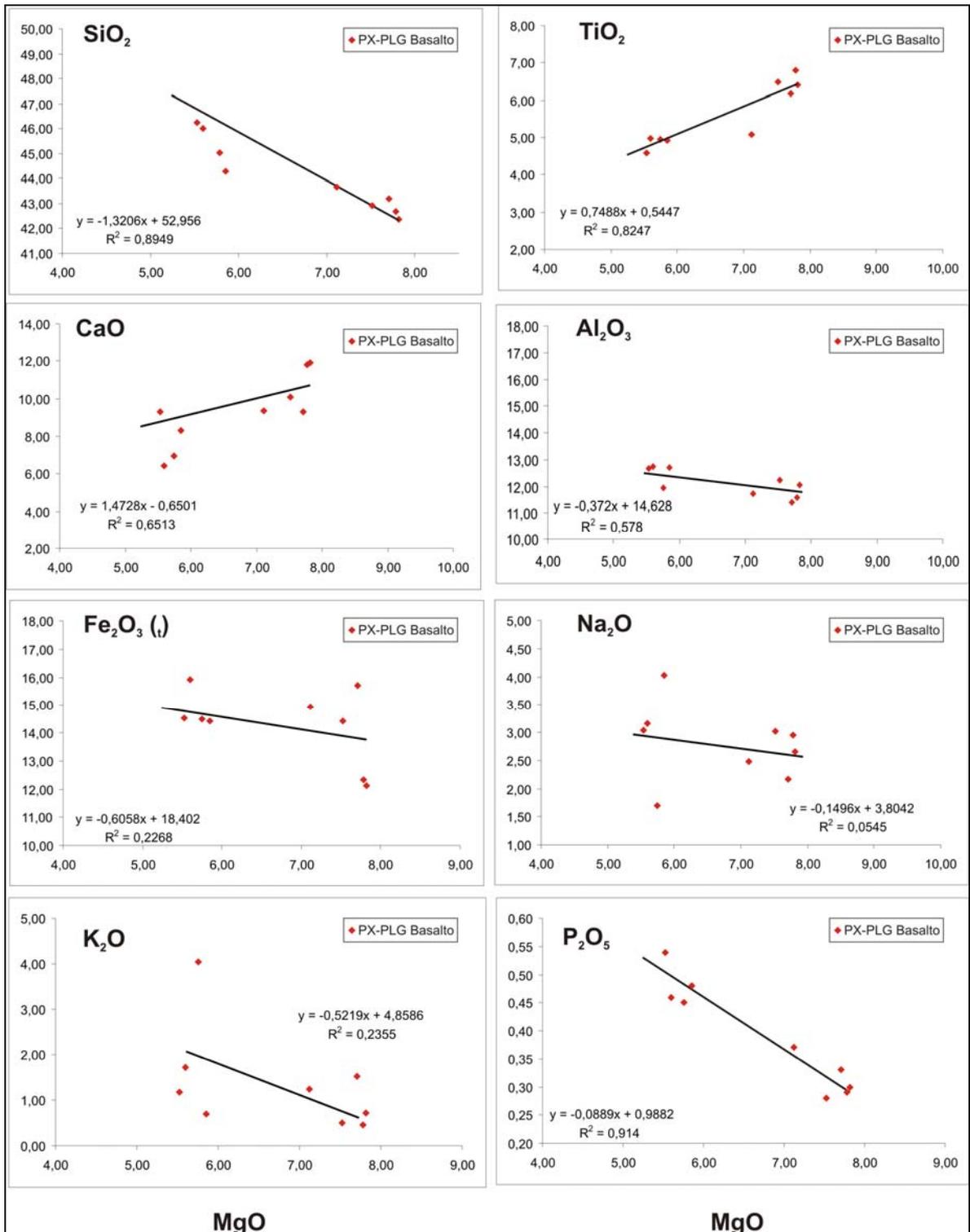


Figura 45: Diagramas de variação para elementos maiores discriminantes de processos evolutivos para Unidade Piroxênio-Plagioclásio Basalto (b_3). As curvas lineares, suas respectivas equações e os quadrados dos coeficientes de correlação (R^2) são mostrados no diagrama. PX = piroxênio, PLG = Plagioclásio.

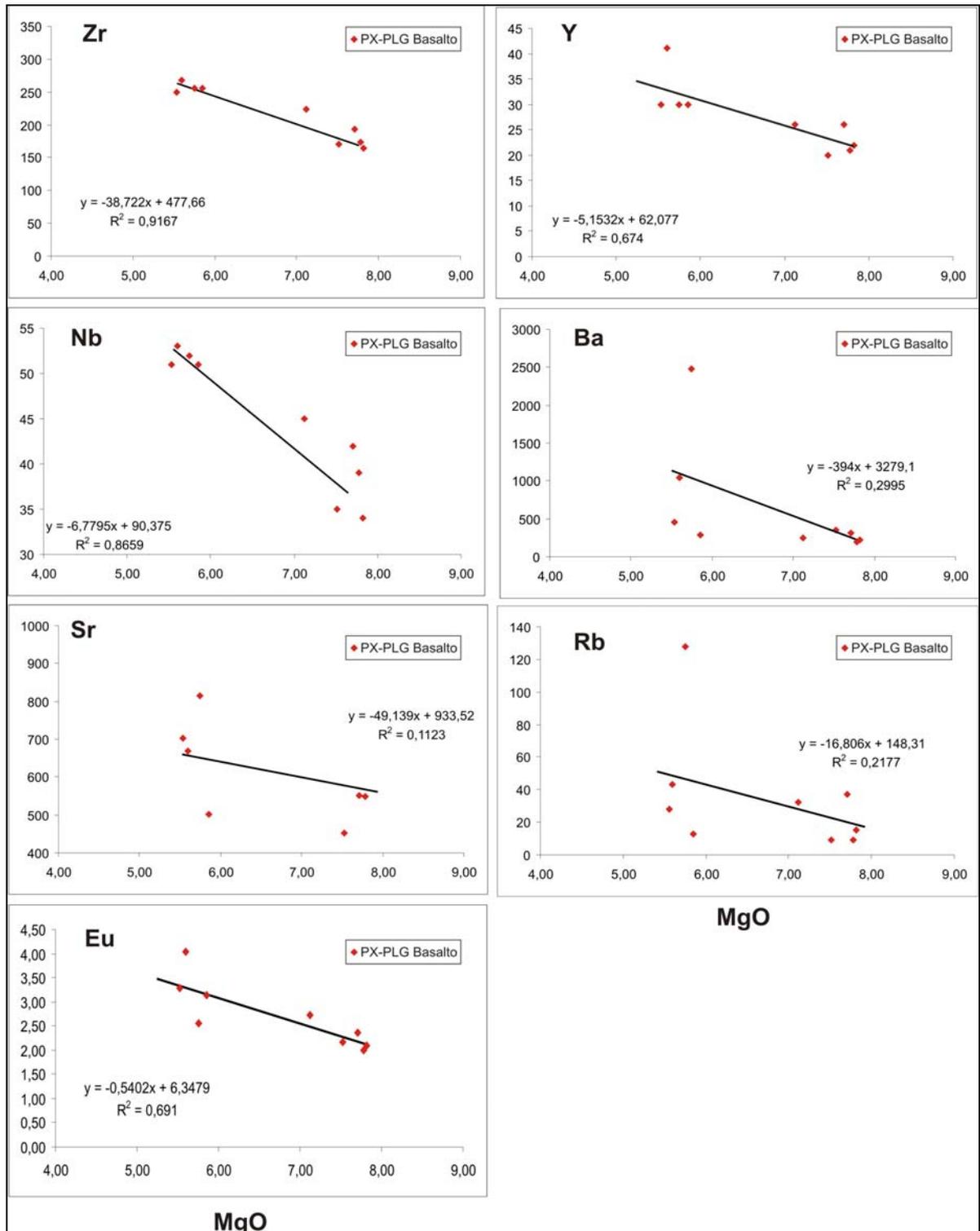


Figura 46: Diagramas de variação para elementos traços discriminantes de processos evolutivos para Unidade Piroxênio-Plagioclásio Basalto (b_3). As curvas lineares, suas respectivas equações e os quadrados dos coeficientes de correlação (R^2) são mostrados no diagrama. PX = piroxênio, PLG = Plagioclásio.

É interessante notar que apenas analisando a Unidade Piroxênio-Plagioclásio Basalto (b_3), as mesmas conclusões são obtidas com relação ao possível processo evolutivo, no caso, cristalização fracionada, e em relação a assembléia fracionante, que neste caso também é apenas olivina. Isto indica que a despeito da não cogeneticidade das unidades magmáticas b_1 , b_2 e b_3 , modelos mais complexos do que cristalização fracionada precisariam ser considerados de modo a explicar as feições de desequilíbrio nos fenocristais de piroxênio e plagioclásio da Unidade Piroxênio-Plagioclásio Basalto (b_3) da Ilha de Santa Bárbara e ao mesmo tempo mostrar o porquê do fracionamento de olivina nos diagramas de variação, uma vez que esta fase não é observada na petrografia das rochas desta unidade.

Uma possibilidade seria um modelo de reabastecimento de câmaras crustais com subseqüentes pulsos de magmas basálticos (*Periodically replenished, periodically tapped, continuously fractionated magma chamber* (RTF); O'HARA & MATHEWS, 1981). Neste modelo, uma câmara magmática passaria por diversos ciclos que envolvem processos contínuos de cristalização fracionada, extravazamento, reabastecimento por pulsos novos de magma parental e mistura de magmas (magma residual e parental). Hagen & Neumann (1990) propõem que os processos de RTF não são uma série de ciclos, como proposto por O'Hara & Mathews (1981), mas sim processos contínuos.

Duas propostas acerca da evolução petrogenética dos basaltos do Arquipélago de Abrolhos podem ser, assim, apresentadas:

- 1) Cristalização fracionada e RTF como processos independentes na geração dos basaltos do Arquipélago de Abrolhos.

Nesta hipótese, cada unidade magmática estudada são pulsos distintos que podem ser gerados a partir de uma mesma fonte com quantidades diferentes de fusão parcial ou a partir de fontes diferentes. Cada unidade representaria possivelmente diferentes câmaras magmáticas ou uma mesma câmara magmática com subseqüentes abastecimentos. No entanto, a Unidade

Piroxênio-Plagioclásio Basalto (b_3) de Santa Bárbara e possivelmente a Unidade Piroxênio-Plagioclásio-Olivina Basalto (b_1) representam uma câmara magmática que em algum estágio de sua evolução foi reabastecida gerando desequilíbrio das fases minerais já fracionadas com o líquido existente.

2) Cristalização fracionada e RTF como processos coexistentes na geração dos basaltos do Arquipélago de Abrolhos (Figura 47):

As unidades b_1 , b_2 e b_3 não são co-genéticas por processo evolutivo de cristalização fracionada, pois não foi possível explicar, com base nos diagramas de variação, a geração das Unidades Mágmatas do Arquipélago de Abrolhos a partir da cristalização fracionada de um mesmo líquido parental. Entretanto estas unidades podem estar numa mesma sequência evolutiva. Isto é possível com agregação de mais de um processo, no caso, cristalização fracionada e RTF. Etapa 1) Um líquido parental picrítico (a) fraciona por cristalização em equilíbrio cristal-líquido inicialmente olivina e talvez posteriormente plagioclásio (Unidade b_1). Etapa 2) O líquido residual (b) da cristalização fracionada do líquido parental (a) fraciona piroxênio e plagioclásio (Unidade b_2). Durante o fracionamento, a câmara é realimentada por um novo pulso magmático. Com a entrada de um novo pulso de composições distintas do líquido existente na câmara, as fases minerais fracionantes entrariam em desequilíbrio com o líquido, gerando as feições observadas na petrografia. E se este novo pulso que realimentou a câmara for similar em termos de composição ao primeiro pulso magmático (líquido parental (a)) permitiria um novo fracionamento de olivina. O produto desta mistura de líquidos seria a Unidade Piroxênio-Plagioclásio-Olivina Basalto. Etapa 3) O mesmo processo ocorreria para a Unidade Piroxênio-Plagioclásio Basalto (b_3). O líquido residual da etapa 2 fraciona inicialmente piroxênio e plagioclásio. Após uma nova realimentação da câmara, estas fases entrariam em desequilíbrio. A análise dos diagramas de variação para a Unidade Piroxênio-Plagioclásio Basalto (b_3) acusou o fracionamento de olivina para esta unidade, mas esta fase mineral não foi observada na petrografia da rocha.

Sparks *et al.* (1980) & Huppert & Sparks (1980) mostraram que a alta densidade de magmas parental picrítico pode impedir uma mistura direta do magma picrítico com outro magma. A eventual mistura de magmas após a realimentação da câmara deve ocorrer entre o magma residual e um magma derivado magma picrítico parental por um processo inicial de fracionamento de olivina (O' HARA & MATHEWS, 1981). Portanto, talvez se a taxa de mistura entre os magmas for alta e o volume de magma residual for menor que o derivado do magma picrítico, significa que a análise química tenderá a mostrar apenas o fracionamento de olivina e esta fase não foi observada na petrografia, pois muito provavelmente foi segregada do líquido antes da mistura e depositada na base da câmara.

A inserção do modelo de RTF para geração dos basaltos do Arquipélago de Abrolhos implica num sistema mais dinâmico onde os contínuos processos de fusão parcial, segregação magmática, extravasamento, realimentação da câmara e mistura de magmas devem ter ocorrido em um curto espaço de tempo, proporcionando a preservação do caráter geoquímico destes processos.

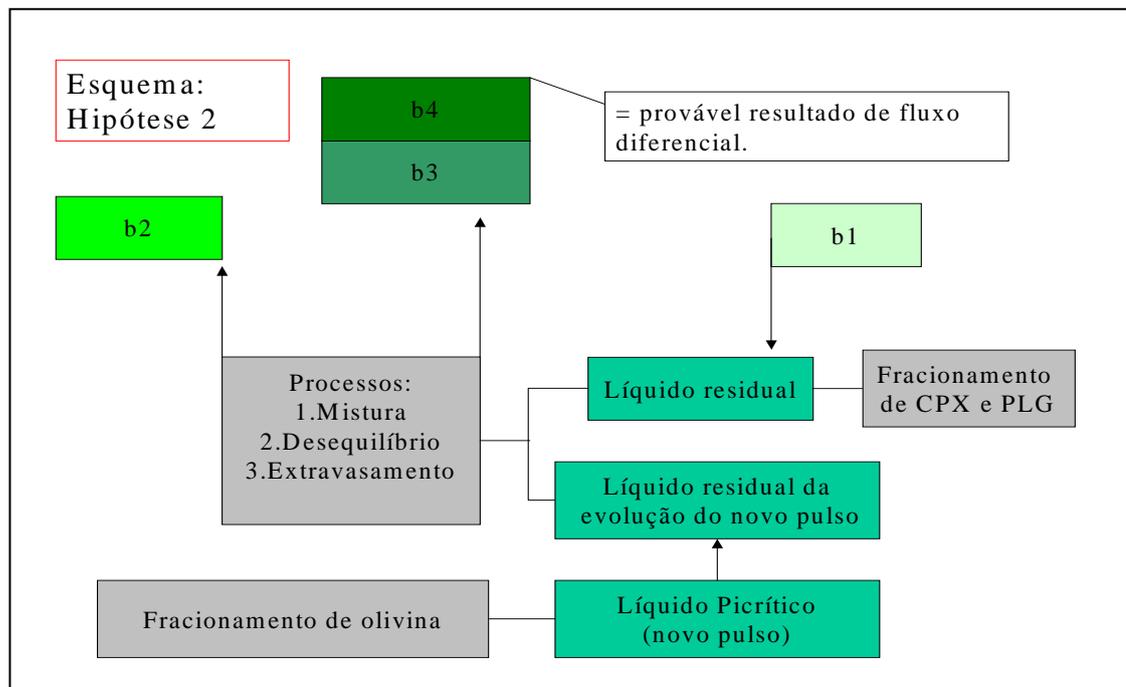


Figura 48: Diagrama esquemático de geração das Unidades da Sucessão Magmática.

3.3 Discriminação de fontes

Em geral, o procedimento adotado para a discriminação de fontes é construir diagramas de variação multi-elementares para a amostra parental da série estudada. A amostra parental representa o magma menos evoluído da série, ou seja, aquele que tem a composição química que mais se assemelha a da fonte. Há dois tipos principais de diagramas multi-elementares, um onde são plotados elementos traços incompatíveis, e outro onde são plotados os elementos terras raras. Nos diagramas de variação multi-elementares, a composição da amostra parental é normalizada, isto é, dividida, pela composição de um padrão determinado. Três padrões são comumente utilizados, quais sejam:

- a) Condritos.
- b) Manto primitivo (isto é, a composição que o manto possuía antes da formação da crosta continental).
- c) MORB

Para os diagramas de variação multi-elementares o padrão utilizado foi o condrito de Thompson (1982), com valores de K, P, Rb de Sun (1980) e Ba = 3,85 (HAWKESWORTH *ET AL.*, 1984). O condrito de Nakamura (1974) foi usado como padrão discriminante nos diagramas de elementos terras raras, com valores de Pr, Tb, Ho e Tm de Haskin *et al.* (1968).

Os dados litogeoquímicos e a discussão feita no item 3.2 indicam fortemente que as Unidades Magmáticas do Arquipélago de Abrolhos não são co-genéticas por um único processo evolutivo. Também foi mostrado no tópico 3.2 que não é possível analisar a evolução de cada unidade separadamente. Portanto, a discriminação das prováveis fontes mantélicas relacionadas à área estudada foi feita com base na composição de três amostras com concentrações MgO semelhantes, ou seja, com mesmo grau de evolução (Figura 48 e 49). Sendo uma amostra (FA-CV-19b1) da Unidade Piroxênio-Plagioclásio Basalto (b_3), uma amostra (FA-CV-10b) da Unidade Piroxênio-Plagioclásio-Olivina Basalto (b_2) e uma amostra (FA-CV-13) da Unidade Olivina-Plagioclásio Basalto (b_1) com a finalidade de se verificar duas hipóteses, quais sejam: 1) os basaltos do Arquipélago de Abrolhos foram gerados por

diferentes fontes astenosféricas (talvez envolvendo misturas de fontes) ou; 2) os basaltos do Arquipélago de Abrolhos foram gerados por diferentes graus de fusão parcial de uma mesma fonte fértil.

As razões normalizadas de La/Yb e La/Nb podem ser utilizadas como critérios de discriminação de fontes empobrecidas, enriquecidas e férteis. Fontes empobrecidas têm razões $La/Yb_{(N)} < 1$ e $La/Nb_{(N)} < 1$. Fontes enriquecidas têm razões $La/Yb_{(N)} > 1$ e $La/Nb_{(N)} > 1$. Finalmente, a fonte fértil tem razões $La/Yb_{(N)} > 1$ e $La/Nb_{(N)} < 1$. Os critérios de discriminação dos três principais tipos de fontes para magmas basálticos, em função das razões de elementos traços normalizados, e as possíveis contribuições mantélicas associadas estão na Tabela 9.

Tabela 9: Critérios para discriminação de fontes geradoras de magmas basálticos.

Tipo de fonte	La/Yb (N)	La/Nb (N)	Tipo de manto
Enriquecida	>1	>1	Litosférico
Empobrecida	<1	<1	Astenosférico (tipo N-MORB)
Fértil	>1	<1	Astenosférico (tipo pluma)

As pequenas variações nas razões $La/Yb_{(N)}$ (Figuras 48 e 49) e $La/Nb_{(N)}$ (Figura 49) para as três amostras não podem ser explicadas por derivação de mais de uma fonte. Mais provavelmente, os diferentes basaltos foram gerados a partir de diferentes quantidades de fusão parcial a partir de uma mesma fonte astenosférica fértil (tipo pluma). Esta conclusão é coerente com as observações de O' Hara & Mathews (1981) que mostraram que os produtos de RTF, dentro das interpretações petrológicas convencionais, exibem o comportamento de seus elementos traços indicativos de variáveis graus de fusão parcial de uma fonte homogênea.

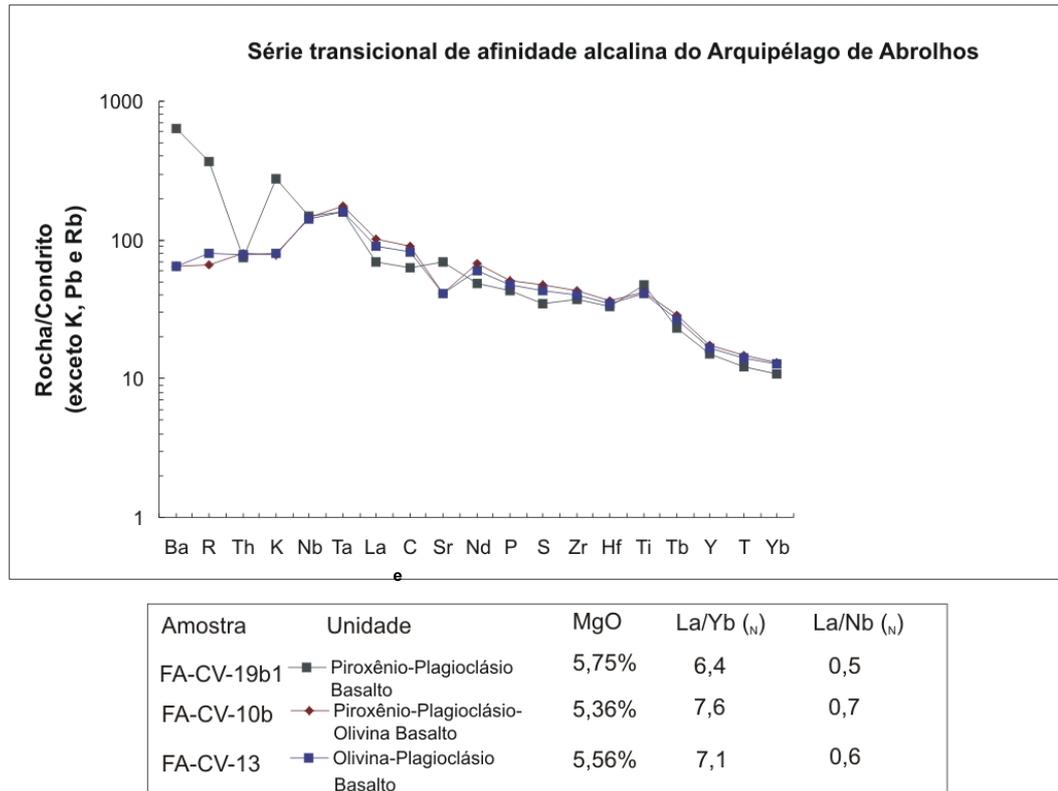


Figura 48: Diagrama de variação multi-elementar normalizado pelo condrito (Thompson, 1982; Sun, 1980 e Hawkesworth *et al.*, 1984) com concentrações de elementos traços de três amostras de rochas basálticas da série transicional de afinidade alcalina estudada com mesmo grau de evolução.

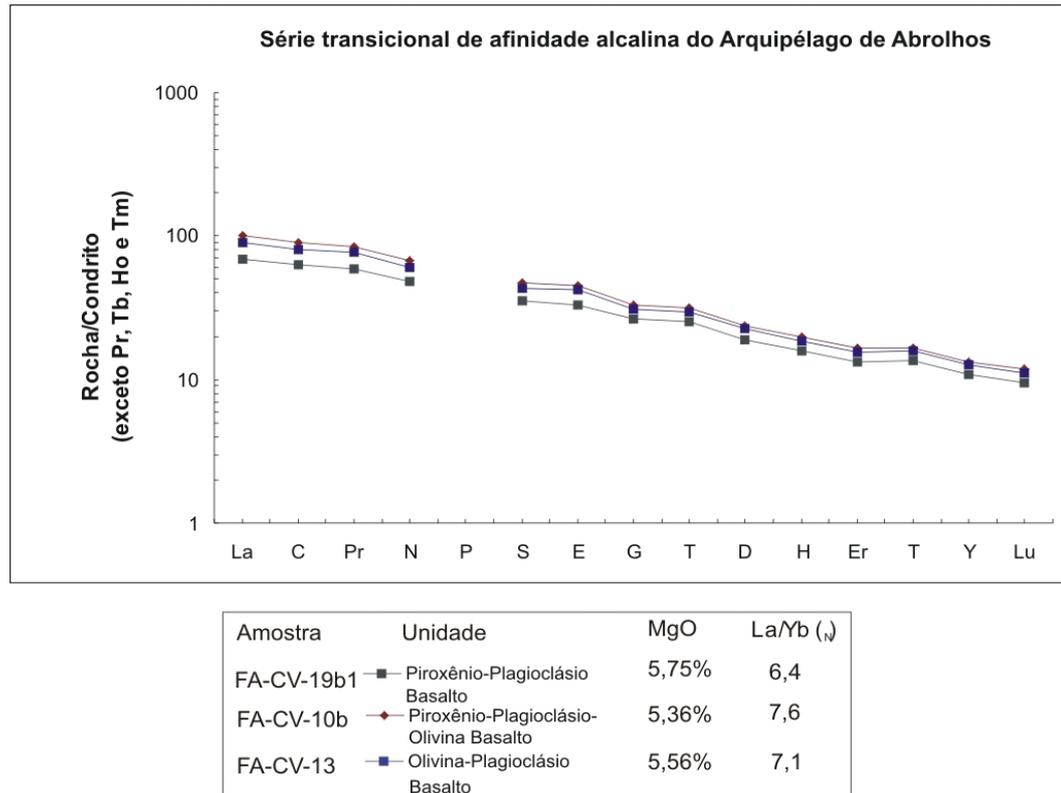


Figura 49: Diagrama de elementos terras raras normalizado pelo condrito (Nakamura, 1974 e Haskin *et al.*, 1968) com concentrações de elementos terras raras das amostras de três amostras de rochas basálticas da série transicional de afinidade alcalina estudada com mesmo grau de evolução.

CAPÍTULO 4: CONCLUSÃO

4.1 Sumário conclusivo do aspecto de campo, petrografia e litogeoquímica das rochas basálticas do Arquipélago de Abrolhos

As unidades da sucessão magmática do Arquipélago de Abrolhos estão empilhadas numa seqüência estratigráfica, da base para o topo, Olivina-Plagioclásio Basalto (b_1), Piroxênio-Plagioclásio-Olivina Basalto (b_2), Piroxênio-Plagioclásio Basalto (b_3) e Cumulado (b_4). As rochas basálticas das unidades b_3 e b_4 são hipocristalinas, enquanto que as rochas basálticas das unidades b_1 e b_2 são holocristalinas. A Unidade b_4 tem alta concentração de fenocristais de piroxênio (65%) e matriz confinada. As demais unidades (b_1 , b_2 e b_3) têm apenas 10% do volume da rocha constituída por fenocristais. A nomenclatura adotada para as unidades corresponde à assembléia de fenocristais observada nos basaltos. Por exemplo, a Unidade Piroxênio-Plagioclásio-Olivina Basalto apresenta fenocristais de piroxênio, plagioclásio e olivina, em ordem decrescente de abundância. À exceção da Unidade b_1 , todos os fenocristais das unidades b_2 e b_3 exibem texturas de desequilíbrio cristal-líquido. A matriz da Unidade Cumulado é composta essencialmente por plagioclásio. A matriz das unidades b_1 e b_2 diferem da matriz da Unidade b_3 (Piroxênio-Plagioclásio Basalto) devido à presença de olivina. A presença de olivina na matriz é típica de basaltos alcalinos. Grãos de piroxênio e plagioclásio são comuns à matriz destas unidades.

A respeito da natureza intrusiva ou extrusiva das Unidades da Sucessão Magmática do Arquipélago de Abrolhos, as características de campo e petrográficas das rochas destas unidades tornam improvável a natureza extrusiva das rochas. Para um magmatismo extrusivo subaquoso é de se esperar, por exemplo, *pillow lavas*, vesículas, amígdalas, texturas vítreas nos basaltos de Abrolhos e isto não ocorre nos mesmos. As rochas das unidades b_1 (Ilha Sueste) e b_2 (Ilha Siriba) são rochas com textura holocristalina, com ausência total de vidro, o que é fortemente indicativo de natureza intrusivas das mesmas. A unidade b_3 de Santa Bárbara é a única das demais unidades que contém vidro e texturas de devitrificação, o que

possibilita uma natureza extrusiva da mesma. No entanto, é importante ressaltar que a presença de vidro não é exclusiva de rochas extrusivas, uma vez que o vidro é produto de taxas de resfriamento mais rápidas seja em corpo (dique ou *sill*) ou em derrames. Portanto, não se pode descartar a possibilidade de uma natureza intrusiva também para a Unidade b_3 .

Os dados litogeoquímicos das rochas basálticas estudadas indicam que as mesmas constituem uma série transicional de afinidade alcalina. A afinidade alcalina da série foi determinada, principalmente, com base nas razões de Nb/Y, considerada como índice de alcalinidade. Todas as razões Nb/Y das rochas estudadas são maiores que a unidade. As rochas foram classificadas com base na composição química no diagrama TAS de LeMaitre (1989) como basaltos, traqui-basaltos, basanitos e tefritos (unidades b_3 e b_4) e basaltos (unidades b_1 e b_2).

Considerando uma primeira hipótese de co-geneticidade entre as unidades b_1 , b_2 e b_3 do Arquipélago de Abrolhos, diagramas de variação para elementos maiores e traços foram construídos para todas as amostras destas unidades. A variação inferior a 50% dos elementos traços incompatíveis imóveis de duas amostras FA-GE-04 e FA-CV-12b, representantes respectivamente, do líquido parental e líquido mais evoluído potenciais, discriminou cristalização fracionada sem assimilação concomitante como o provável processo evolutivo das rochas basálticas do Arquipélago de Abrolhos. Os diagramas de variação mostraram que a assembléia fracionante seria composta apenas por olivina. A assembléia fracionante não corresponde à assembléia de fenocristais de todas as unidades analisadas. Isto mostra que as unidades b_1 , b_2 e b_3 não são co-genéticas por processo evolutivo de cristalização fracionada. As características de desequilíbrio-cristal líquido nos fenocristais de piroxênio e plagioclásio também indicam que outros processos capazes de gerar estas feições devem ser considerados na proposição de um modelo petrogenético evolutivo para as unidades magmáticas do Arquipélago de Abrolhos. Análises de diagramas de variação apenas para a Unidade Piroxênio-Plagioclásio basalto mostraram que ainda mais difícil é explicar por processo de cristalização fracionada a sua evolução, uma vez que a assembléia fracionante é olivina e a assembléia de fenocristais observada é piroxênio e plagioclásio.

A Unidade Cumulado não foi utilizada para a análise da evolução da série, pois o procedimento deste tipo de análise requer o estudo apenas da matriz das rochas. Devido ao fato desta unidade ser formada predominantemente por fenocristais, a separação tão somente da matriz torna-se um processo demasiadamente difícil. A Unidade Cumulado é finamente acamadada. Estas camadas têm espessuras centimétricas. Estes acamamentos podem ser produtos de fluxo diferencial durante a cristalização do corpo ígneo. No modelo de geração das Unidades da Sucessão Magmática do Arquipélago de Abrolhos a Unidade Cumulado seria o produto de um fluxo diferencial, onde a concentração de fenocristais ocorre no centro do corpo intrusivo (?) devido menor velocidade de fluxo no centro do que nas bordas do *sill* (?).

O modelo de RTF (O'HARA & MATHEWS, 1981) foi proposto para explicar a geração das texturas de desequilíbrio observados nos fenocristais das unidades b_1 , b_2 e b_3 do Arquipélago de Abrolhos e o fracionamento de apenas olivina nos diagramas de variação. A associação do modelo de RTF ao processo de cristalização fracionada mostra que as unidades b_1 , b_2 e b_3 podem pertencer a uma mesma sequência evolutiva e não serem necessariamente pulsos independentes. Nesta hipótese, a Unidade b_1 é a primeira a ser gerada. O líquido residual da evolução por cristalização fracionada da Unidade b_1 fraciona, pelo mesmo processo evolutivo, piroxênio e plagioclásio (líquido residual 1). A câmara magmática sofreria uma realimentação por um pulso picrítico. Este novo pulso fraciona inicialmente olivina (líquido residual 2). A mistura do líquido residual 1 e 2 corresponderia a Unidade b_2 . Estes mesmos processos de fracionamento inicial de líquido residual, realimentação da câmara, fracionamento do novo pulso, e mistura de líquidos residuais gerariam também a Unidade b_3 .

As idades K-Ar e Ar-Ar para as rochas do Arquipélago de Abrolhos ora publicadas na literatura (p.ex.: SOBREIRA & SZATMARI, 2000, 2001, 2002, 2003; SOBREIRA *ET AL.*, 2004) mostram variação em torno de 5 a 8 Ma, sendo as idades mais jovens encontradas em rochas basálticas da Ilha de Santa Bárbara, o que corrobora a seqüência proposta para a geração das unidades magmáticas.

As razões $La/Yb_{(N)} > 1$ e $La/Nb_{(N)} < 1$ de amostras das unidades b_1 , b_2 e b_3 com mesmo grau evolutivo indicam que os basaltos destas unidades foram gerados por diferentes graus de fusão parcial de uma mesma fonte mantélica fértil (do tipo pluma).

5.2 Implicações geodinâmicas

A geração de magmas basálticos alcalinos é associada a menores quantidades de fusões a altas pressões comparativamente a basaltos toleíticos. A quantidade de fusão parcial e a profundidade em que esta ocorre estão diretamente associadas à espessura litosférica. Maiores afinamentos litosféricos proporcionam maiores quantidades de fusão parcial a menores profundidades, ou seja, a menores pressões. Segundo Guazelli & Carvalho (1981), a plataforma continental na qual o Complexo Vulcânico de Abrolhos está inserido é anormalmente extensa (240 km). Chang & Kowsmann (1984) atribuíram um fator de estiramento β de 2,80 o que significa que esta plataforma é bastante estirada. O alto fator de estiramento implica num maior afinamento litosférico. Sobreira & Szatmari (2002) afirmaram que o magmatismo do Complexo Vulcânico de Abrolhos é de caráter alcalino a toleítico. O estiramento litosférico na região do Complexo Vulcânico de Abrolhos, portanto, deve ser heterogêneo para permitir a variação na natureza do magmatismo. A afinidade alcalina do magmatismo do Arquipélago de Abrolhos indica que, provavelmente, a região do Arquipélago é menos estirada comparativamente a regiões onde o magmatismo é tipicamente toleítico.

A contribuição de uma fonte fértil (tipo pluma) é coerente com os dados de Fodor *et al.* (1989) que plotaram as razões de Zr/Y e Zr/Nb das rochas do Arquipélago de Abrolhos em diagrama de mistura binária e concluíram que as rochas do Arquipélago de Abrolhos poderiam representar produtos de uma fonte mantélica fértil com uma pequena contribuição de um componente empobrecido (N-MORB). Entretanto, o modelo de geração dos basaltos do Arquipélago de Abrolhos proposto por Fodor *et al.* (1989) implica em líquidos menos densos gerados em tempos diferentes a partir da cristalização de um líquido picrítico. Este modelo é contestado pelos resultados mostrados nesta dissertação de mestrado. Com base nos dados litogeoquímicos apresentados, é improvável a geração dos líquidos que

originaram as unidades da Sucessão Magmática do Arquipélago de Abrolhos a partir de mesmo líquido parental por processos de cristalização fracionada.

Um dos modelos de geração do magmatismo alcalino do Cretáceo Superior é atribuído ao impacto da pluma de Trindade-Martim Vaz na base da litosfera continental que teria originado as províncias ígneas continentais de Alto Paranaíba, Poxoréu e Iporá (GIBSON *ET AL.*, 1995). A Cadeia Vitória-Trindade também tem sua geração atribuída ao traço de *hotspot* desta mesma pluma (GIBSON *ET AL.*, 1995). O Arquipélago de Abrolhos está a norte do lineamento de rochas alcalinas da Cadeia Vitória-Trindade. Portanto, o Arquipélago de Abrolhos poderia ser originado a partir do mesmo traço de *hotspot*? O Complexo Vulcânico de Abrolhos, que inclui o Arquipélago de Abrolhos poderia, também, ser produto da fusão de uma pluma mantélica que teria pelo menos duas fases de fusão. Uma fusão efetiva gerando o Complexo Vulcânico de Abrolhos e fusões remanescentes por concentração de calor na base da litosfera continental gerando o magmatismo do Arquipélago de Abrolhos. De um modo geral, a análise petrogenética apresentada nesta dissertação indica fortemente que a área do Arquipélago de Abrolhos esteve situada por período prolongado (possivelmente da ordem de 5 a 8 Ma) sobre uma anomalia térmica de origem sublitosférica e fértil, tipicamente do tipo pluma. Com base em dados da literatura (p.ex.: THOMPSON *ET AL.*, 1998), a melhor candidata para representar esta pluma seria Trindade-Martins Vaz. A residência prolongada desta anomalia térmica deve ter possibilitado a fusão contínua da fonte mantélica, com conseqüente geração de magmas, segregação primária e realimentação de câmaras em processo de fracionamento contínuo. Estes processos são esperados se o mecanismo evolutivo for do tipo RTF. Em conclusão, a área de estudo deve ter estado sob forte influência térmica, tanto a nível sub-crustal quanto a nível crustal. Este fato deve ter tido algum tipo de influência nos processos de geração e maturação de hidrocarbonetos na Bacia do Espírito Santo, um tema, aliás, ainda pouco abordado tanto nos meios técnico quanto científico.

5.3 Trabalhos futuros

Esta seção da presente dissertação de mestrado tem por fim sugerir e propor trabalhos futuros envolvendo a área estudada, visando à elaboração de modelos petrogenéticos e geodinâmicos.

Conforme citado no item anterior, muitos questionamentos podem ser levantados à cerca da geração e evolução do magmatismo do Arquipélago de Abrolhos e da associação com o Complexo Vulcânico de Abrolhos. A produção e interpretação de dados geocronológicos para cada unidade da sucessão magmática identificada no Arquipélago de Abrolhos são de suma importância para a construção de modelos geodinâmicos robustos associados ao magmatismo alcalino no Cretáceo Superior. A interpretação de análises isotópicas é outra ferramenta indispensável na proposição e refinamento de modelos petrogenéticos e geodinâmicos. Com base em resultados de análises isotópicas, seria possível a discriminação de quantas fontes realmente estariam envolvidas no processo de geração das rochas basálticas do Arquipélago de Abrolhos. Análises por Microsonda para química mineral seria interessante para verificar os modelos de fracionamento propostos. De igual modo, é importante estender a metodologia de estudo aplicada nesta dissertação de mestrado para o Complexo Vulcânico de Abrolhos a fim de se obter uma melhor correlação entre as duas fases de magmatismo e construir modelos geodinâmicos robustos para a área de estudo.

Em conclusão, a presente dissertação de mestrado visa fornecer novos dados e interpretações geoquímicas para a série transicional de afinidade alcalina do Arquipélago de Abrolhos, colaborando nos esforços de se construir e refinar modelos geodinâmicos para o magmatismo alcalino do Cretáceo Superior no SE do Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

ALMEIDA, F. F. M. As ilhas oceânicas brasileiras e uma hipótese sobre a Origem do Atlântico. In: SIMPÓSIO SOBRE A OCEANOGRAFIA DO ATLÂNTICO SUL OCIDENTAL. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 37, supl., 1965.

ASMUS, H. E. Espírito Santo: Pattern of the eastern Brazilian marginal basins. Presented at the 57 th Annu. Meet., Am. Assoc. Pet. Geol., Denver, Colo., 34 p. (unpubl.) 1972.

ASMUS, H. E. & GUAZELLI, W. Descrição sumária das estruturas da margem continental brasileira e das áreas oceânicas adjacentes: Hipótese sobre o tectonismo causador e implicações para os prognósticos do potencial de recursos minerais. In: ASMUS, H.E.; ed.; *Estruturas e tectonismo da margem continental brasileira e suas implicações nos processos sedimentares e na avaliação do potencial de recursos minerais*. Rio de Janeiro. PETROBRAS/ CENPES/ DINTEP. P. 187-269 (Projeto REMAC, 9).

BURROWS, J. A. Relatório de poço Sbst-1-Ba. Petróleo Brasileiro S/A. 1961.

CHANG, H. K. & KOWSMANN, R. O. Subsidiência térmica e espessura crustal na Bacia de Santos. In: XXXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Rio de Janeiro, RJ, **Anais...**, v. 1, p. 110-121, 1984.

CONCEIÇÃO, J. C. J.; MIZUSAKI, A. M. P.; ALVES, D. B., SZATMARI, P. *Controle tectônico do magmatismo meso-cenozóico no sul e sudeste do Brasil e seu papel na evolução das bacias sedimentares*. Fase I: bacias do Espírito Santo, Mucuri e Cumuruxatiba. Rio de Janeiro: PETROBRAS. CENPES. SUPEP. DIVEX. SETEC, 1994. 96 p. Relatório interno.

CORDANI, U.G. Idade do vulcanismo no Oceano Atlântico Sul. *Boletim do Instituto de Geociências e Astronomia*, Univ. São Paulo, v.1, p. 1-80, 1970.

CORDANI, U. G. & BLAZEKOVIĆ, A. Idades radiométricas das rochas vulcânicas dos Abrolhos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 24., 1970, Brasília. *Anais...* São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1970.

FAINSTEIN, R. & SUMMERHAYES, C.P. Structure and origin of marginal banks off eastern Brazil. *Marine Geology*, v. 46, p. 199-215, 1982.

FAINSTEIN, R. & SUMMERHAYES, C.P. Structure and origin of marginal banks off eastern Brazil. *Mar. Geol.*, v. 46, p. 199-215, 1982.

FODOR, R. V.; MCKEE, E. H.; ASMUS, H. E. K-Ar ages and the opening of the South Atlantic Ocean: basaltic rocks from the Brazilian margin. *Marine Geology*, Amsterdam, v. 54, n. 1-2, p. M1-M8, Dec. 1983.

FODOR, R. V. & VETTER, S. K. Rift-zone magmatism: petrology of basaltic rocks transicional from CFB to MORB, southeastern Brazil margin. *Contr. Miner. Petrol.*, v. 88, p. 21-307. 1984.

FODOR, R. V.; CORWIN, C. & ROISENBERG, A. Petrology of Serra Geral (Paraná) continental flood basalts, southern Brazil: crustal contamination, source material and South Atlantic magmatism. *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 91, p. 54-65, 1985.

FODOR, R. V.; MUKASA, S. B.; GOMES, C. B. & CORDANI, U. G. Ti-rich Eocene Basaltic Rocks, Abrolhos Platform, Offshore Brazil, 18 ° S: Petrology with Respect to South Atlantic Magmatism. *Journal of Petrology*, Oxford, v. 30, n. 3, p. 763-786, 1989.

FRANÇA, R. L. Bacia do Mucuri. In: *Bacias sedimentares brasileiras*. Aracajú: Fundação Paleontológica Phoenix, v. 6, n. 62, 2004. 4 p.

GOMES, N. S.; BORBA, R. P.; CUNHA, E. M. Alteração hidrotermal em diabásios do Banco de Abrolhos, Bacia do Espírito Santo, Brasil: Resultados preliminares. In: XXXVII CONGRESSO DE GEOLOGIA. Sociedade Brasileira de Geologia, São Paulo, SP, 1992, p. 60-61.

GOMES, N. S. Diagênese das Rochas Vulcanoclásticas do Banco de Abrolhos, Bacia do Espírito Santo, Brasil. In: XXXVII CONGRESSO DE GEOLOGIA. Sociedade Brasileira de Geologia, São Paulo, SP, 1992, p. 102-103.

GUAZELLI, W. & CARVALHO, J. C. Estruturas da margem Continental Leste Brasileira e das áreas oceânicas e continentais adjacentes. In: Asmus, H. E. editor. Estruturas e tectonismo da margem continental brasileira e suas implicações nos processos sedimentares e na avaliação do potencial de recursos minerais. Rio de Janeiro, PETROBRÁS/ CENPES/ DINTEP, Série PROJETO REMAC, 9, p. 70-145, 1981.

GIBSON, S.A.; THOMPSON, R.N.; LEONARDOS O.H.; DICKIN, A.P.; MITCHELL, J.G. The Late Cretaceous impact of the Trindade mantle plume: evidence from large-volume, mafic potassic magmatism in SE Brazil. *Journal of Petrology*, v. 36, p. 189-229, 1995.

GIBSON, S.A., THOMPSON, R.N., WESKA, R.K., DICKIN, A.P. & LEONARDOS, O.H. Late Cretaceous rift-related upwelling and melting of the Trindade starting mantle plume head beneath western Brazil. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 126, p. 303-314, 1997.

HARTT, C. F. Geology and Physical Geography of Brazil. Ed: Fiels Osgood e Co., Boston, 1870.

HASKIN, L.A., HASKIN, M.A., FREY, F.A. & WILDMAN, T.R. Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths. In: AHRENS L.H. (ed). 1968. *Origin and distribution of the elements*, Pergamon, Oxford, v. 1, p. 889-911, 1968.

HAWKESWORT, C.J.; MARSH, J.S.; DUNCAN, A.R.; ERLANK, A.J. & NORRY, M.J. *The role of continental lithosphere in the generation of the Karoo volcanic rocks: evidence from combined Nd- and Sr-isotope studies*. Special Publication of the Geological Society of South Africa, v. 13, p. 341-354, 1984.

HUMPHRIS, S. E.; THOMPSON, G.; SCHILLING, J. G. & KINGSLEY, R. H. Petrological and geochemical variations along the Mid-Atlantic ridge between 46 ° S and 32 ° S: influence of the Tristan da Cunha mantle plume. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 49, p. 64-1445. 1985.

LEMAITRE, R.W. *A classification of igneous rocks and glossary of terms. (Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks)*. Oxford: Blackwell, 1989. 193pp.

LE ROEX, A. P.; DICK, D. J. B.; ERLANK, A. H.; REID, A. M.; FREY, F. A. & HART, S. R. Geochemistry, mineralogy and petrogenesis of lavas erupted along the southeast Indian ridge between the Bouvet triple junction and 11 degrees east. *J. Petrology*, v. 24, p. 267-318. 1983.

MACKENZIE, W.S.; DONALDSON, C.H. & GUILFORD, C. Atlas of igneous rocks and their textures. Longman, London, 1982. 148p.

MANIAR, P.D. & PICCOLI, P.M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101:635-643.

MELO, U.; SUMMERHAYES, C.P. & ELLIS, J. P. Upper continental margin sedimentation off Brazil, n. 4, Salvador to Vitória, Southeastern Brazil. *Contrib. Sedimentol.*, v. 4, p. 78-116.

MIDDLEMOST, E.A.K., 1989. Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks. *Chemical Geology*, 77,19-26.

MIZUSAKI, A. M. & SARACCHINI, F. E. PETROBRAS/ CENPES/ DIVEX/ SETEC (Relatório interno), 30 p., 1991.

MOHRIAK, W. U. Interpretação geológica e geofísica da Bacia do Espírito Santo e da região de Abrolhos: petrografia, datação radiométrica e visualização sísmica das rochas vulcânicas. *Bol. Geoc. Petrobras*, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p. 133-142, nov. 2006.

MOHRIAK, W. U.; PAULA, O.; SZATMARI, P.; SOBREIRA, J. F.; PARSONS, M.; MACQUEEN, J.; UNDLI, T. H.; BERSTAD, S.; WEBER, M.; HORSTAD, I. Volcanic provinces in the Eastern Brazilian margin: geophysical models and alternative geodynamic interpretations. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, V. 8, 003, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2003. 1 CD-ROM, 4f.

NAKAMURA, N. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 38, p. 757-775, 1974.

O'HARA, M. J. & MATHEWS, R. E. Geochemical evolution in a advancing, periodically replenished, periodically tapped, continuously fractionated magma chamber. *J. Geol. Soc. Lond.*, 138, p. 77-237, 1981.

OLIVEIRA, A. I. & LEONARDOS, O. H. Geologia do Brasil. 2^a ed., Rio de Janeiro. Ministério da Agricultura Serv. Inf. Agrícola, 1943, 813 p. (Série didática, 2).

PEARCE, J. A. & CANN, J. R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analysis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 19, p. 290-300, 1973.

SOBREIRA, J. F. F. Complexo Vulcânico de Abrolhos: proposta de modelo tectono-magmático. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39, 1996, Salvador. **Anais...** [São Paulo] : Sociedade Brasileira de Geologia, 1996, v. 5, p. 387-391.

SOBREIRA, J. F. F. Anais do VI Simp. Nac. Est. Tect., Pirenópolis, p. 156-158, 1997.

SOBREIRA, J. F. F. & FRANÇA, R. L. Um modelo tectono-magmático para a região do Complexo Vulcânico de Abrolhos. *Bol. Geoci. Petrobras*, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p. 143-147, 2006.

SOBREIRA, J. F. F. & Szatmari, P. 31st *Int. Geol. Congress (Abstracts Volume)*, Rio de Janeiro (em CD-ROM).

SOBREIRA, J. F.F.; SZATMARI, P. Novas datações Ar-Ar para as rochas vulcânicas de Abrolhos e implicações para a evolução da Margem Continental Leste Brasileira. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 8, 2001, Recife. **Anais...** [Recife]: Sociedade Brasileira de Geologia, [2001]. P.31.

SOBREIRA, J. F.F.; SZATMARI, P. Datações Ar-Ar das rochas vulcânicas de Abrolhos e implicações para evolução da Margem Continental Leste Brasileira no Terciário. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 41., 2002, João Pessoa, Pa. **Anais...** João Pessoa: Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo do Nordeste, 2002. p. 395.

SOBREIRA, J. F. F.; SZATMARI, P. Idades Ar-Ar para as rochas ígneas do Arquipélago de Abrolhos, margem sul da Bahia. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 9, 2003, Búzios. **Boletim de Resumos...** 2003, p. 382-383.

SOBREIRA, J. F.F.; SZATMARI, P.; MOHRIAK, W. U.; VALENTE, S.C., YORK, D. Magmatismo paleogênico no Arquipélago de Abrolhos, Complexo Vulcânico de Abrolhos. In: XLII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 2004, Araxá, MG. **Anais...** Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo de Minas Gerais, 2004. 1 CD-ROM.

SZATMARI, P. & MOHRIAK, W. U. Anais do V Simp. Nac. Est. Tect., Gramado, p. 213-214.

SOBREIRA, J.F.F & SZATMARI, P. Datações Ar-Ar para as rochas vulcânicas de Abrolhos e implicações para a evolução da Margem Continental Leste Brasileira, no Terciário. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 8, 2001, Recife, **Anais...** João Pessoa: Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo do Nordeste, 2002, p. 395.

SOBREIRA, J. F. F.; SZATMARI, P.; MOHRIAK, W. U.; VALENTE, S. C.; YORK, D. Recorrência, em diferentes escalas, do magmatismo paleogênico no Arquipélago de Abrolhos, Complexo Vulcânico de Abrolhos. XLII Congresso Brasileiro de Geologia, 2004. Araxá, MG. **Anais...** Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo de Minas Gerais, 2004. 1 CD-ROM.

SUN, S.S. Lead isotopic study of young volcanic rocks from mid-ocean ridges, ocean islands and island arcs. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A297, p. 409-445. 1980.

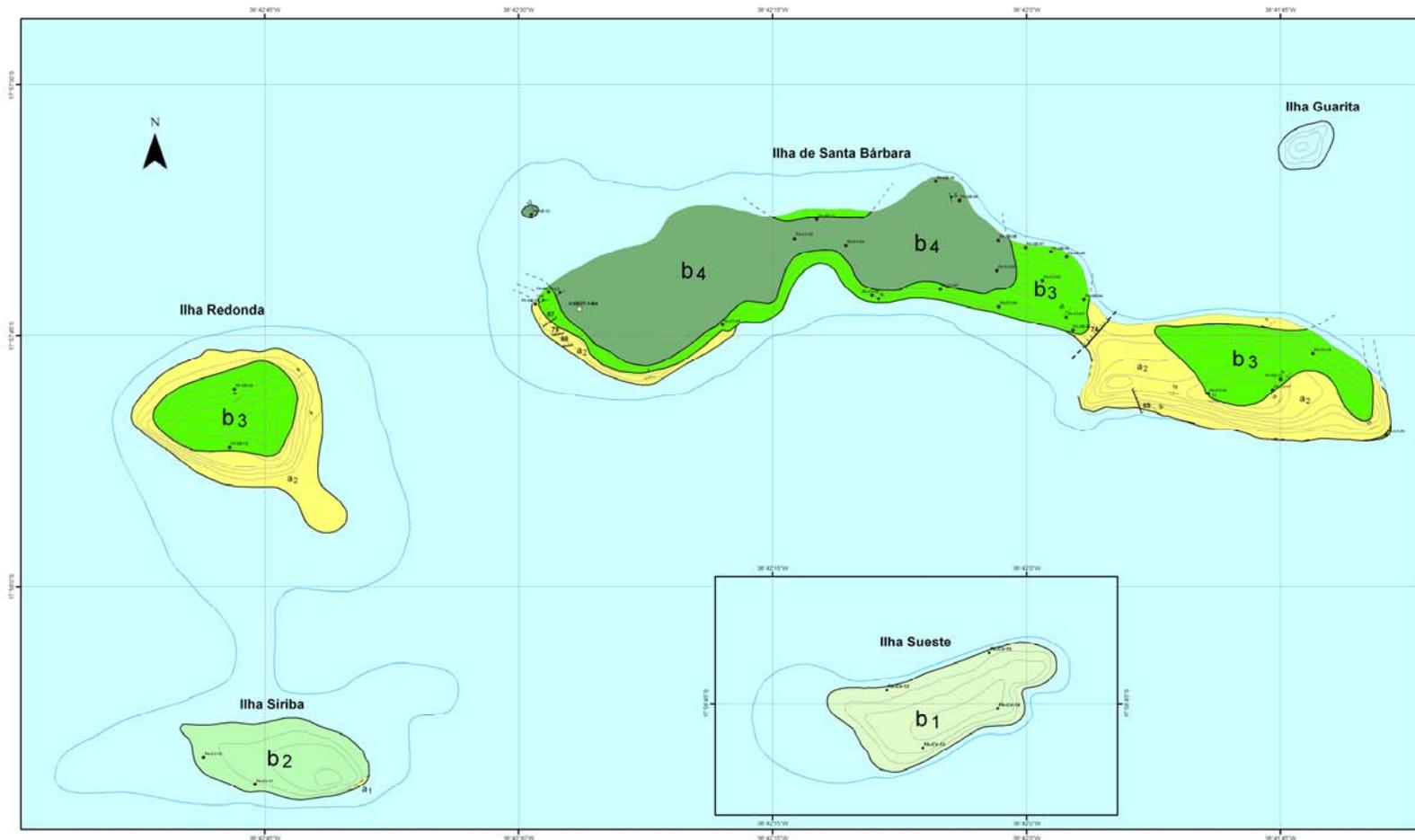
Thompson, R.N. Magmatism of the British Tertiary volcanic province, *Scot. Geol.*, v. 18, p. 49-107, 1982.

VICALVI, M. A.; COSTA, M. P. DE A. & KOWSMANN, R. P. Depressão de Abrolhos: Uma paleolaguna holocênica. *Bol. Téc. Petrobras*, 21 (4), p. 279-297.

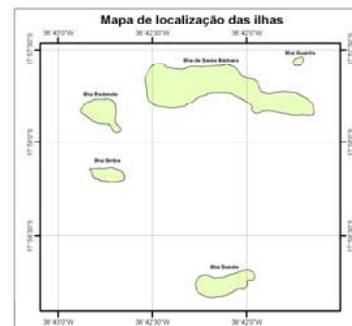
WINCHESTER, J.A. & FLOYD, P.A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, v. 20, 325-343. 1977.

APÊNDICE A: Mapa geológico do Arquipélago de Abrolhos

Mapa Geológico do Arquipélago de Abrolhos



Símbolos	Unidades litológicas
	Unidade sedimentar
	a1 Arenitos grossos e conglomerados em canais, salitos e solivelhos (Molriak, 2006).
	Sucessão magmática
	b4 Cumulado
	b3 Piroxênio-Plagioclásio Basalto
	b2 Piroxênio-Plagioclásio-Olivina Basalto
	b1 Olivina-Plagioclásio Basalto



APÊNDICE B: Dados litogeoquímicos

Apêndice B: Tabela de dados litogeoquímicos das rochas basálticas do Arquipélago de Abrolhos.

Unidade litológica	Ilha	Amostra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PF	Total
Olivina-Plagioclásio Basalto	Sueste	FA-CV-13	48,72	4,23	13,52	13,84	0,18	5,56	9,36	2,70	1,16	0,50	0,71	100,47
Olivina-Plagioclásio Basalto	Sueste	FA-CV-12b	49,23	4,43	13,34	14,35	0,19	5,24	9,13	2,82	1,22	0,56	0	100,50
Piroxênio-Plagioclásio-Olivina Basalto	Siriba	FA-CV-11	45,04	5,50	12,84	15,17	0,19	5,79	10,30	2,37	0,98	0,44	0,03	98,65
Piroxênio-Plagioclásio-Olivina Basalto	Siriba	FA-CV-10a	45,71	5,57	12,77	15,59	0,19	5,68	10,29	2,43	0,98	0,49	0	99,70
Piroxênio-Plagioclásio-Olivina Basalto	Siriba	FA-CV-10b	48,51	4,33	13,15	14,26	0,19	5,36	9,20	2,74	1,12	0,54	0	99,40
Piroxênio-Plagioclásio Basalto	Sta Bárbara	FA-GE-04	42,38	6,40	12,04	12,11	0,12	7,82	11,91	2,65	0,72	0,30	3,68	100,12
Piroxênio-Plagioclásio Basalto	Sta Bárbara	FA-CV-02	42,69	6,80	11,58	12,34	0,13	7,78	11,80	2,94	0,46	0,29	2,77	99,58
Piroxênio-Plagioclásio Basalto	Sta Bárbara	FA-CV-18	43,18	6,16	11,41	15,70	0,18	7,71	9,32	2,17	1,53	0,33	2,71	100,40
Piroxênio-Plagioclásio Basalto	Sta Bárbara	FA-CV-07	42,93	6,48	12,22	14,41	0,16	7,52	10,09	3,01	0,49	0,28	2,67	100,26
Piroxênio-Plagioclásio Basalto	Sta Bárbara	FA-CV-19b	43,67	5,08	11,74	14,94	0,17	7,12	9,35	2,48	1,24	0,37	3,07	99,22
Piroxênio-Plagioclásio Basalto	Sta Bárbara	FA-CV-01c	44,30	4,92	12,71	14,42	0,14	5,85	8,32	4,03	0,69	0,48	3,88	99,74
Piroxênio-Plagioclásio Basalto	Sta Bárbara	FA-CV-19b1	45,08	4,94	11,96	14,50	0,27	5,75	6,95	1,70	4,04	0,45	3,75	99,39
Piroxênio-Plagioclásio Basalto	Sta Bárbara	FA-CV-16	45,99	4,96	12,75	15,91	0,18	5,60	6,46	3,15	1,71	0,46	3,49	100,66
Piroxênio-Plagioclásio Basalto	Sta Bárbara	FA-CV-20	46,25	4,59	12,67	14,53	0,18	5,53	9,32	3,03	1,18	0,54	0,80	98,61
Cumulado	Sta Bárbara	FA-GE-07	42,87	6,48	11,83	14,45	0,15	7,90	10,14	2,46	1,12	0,25	2,46	100,10
Cumulado	Sta Bárbara	FA-GE-13a	42,59	6,52	12,28	14,32	0,16	6,23	9,49	2,98	0,98	0,31	2,76	98,61
Cumulado	Sta Bárbara	FA-CV-05	43,82	5,09	13,08	14,81	0,16	6,04	10,02	2,71	1,05	0,32	2,41	99,51
Cumulado	Sta Bárbara	FA-GE-09c	43,98	6,01	13,51	13,58	0,15	5,84	9,24	3,99	0,32	0,33	3,36	100,30
Cumulado	Sta Bárbara	FA-CV-03a	43,75	5,33	14,34	13,74	0,13	5,71	9,84	3,59	0,59	0,27	2,55	99,84
Cumulado	Sta Bárbara	FA-CV-03b	43,70	4,86	14,52	12,98	0,13	5,60	10,29	3,48	0,52	0,28	2,49	98,84
Cumulado	Sta Bárbara	FA-GE-09a	45,54	4,42	14,91	11,71	0,12	5,40	10,88	3,32	0,83	0,33	2,59	100,05
Cumulado	Sta Bárbara	FA-GE-13b	44,18	4,89	14,30	14,93	0,16	4,73	8,43	3,75	1,16	0,41	2,95	99,89
Cumulado	Sta Bárbara	FA-GE-09b	46,66	4,47	16,06	9,86	0,10	4,67	10,29	4,42	0,50	0,32	2,46	99,80

Apêndice B: Tabela de dados litogeoquímicos das rochas basálticas do Arquipélago de Abrolhos. (continuação).

Unidade litológica	Ilha	Amostra	Ni	Cr	Sc	Co	V	Ba	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	La	Ce	Pr
Olivina-Plagioclásio Basalto	Sueste	FA-CV-13	90	90	27	54	394	247	28	483	33	272	50	29,6	70,3	8,55
Olivina-Plagioclásio Basalto	Sueste	FA-CV-12b	70	70	27	57	397	257	27	491	36	303	53	32,9	78,0	9,42
Piroxênio-Plagioclásio-Olivina Basalto	Siriba	FA-CV-11	80	60	30	48	471	235	20	531	28	236	47	26,9	64,6	7,91
Piroxênio-Plagioclásio-Olivina Basalto	Siriba	FA-CV-10a	80	50	30	49	471	233	21	540	31	255	53	29,5	70,9	8,66
Piroxênio-Plagioclásio-Olivina Basalto	Siriba	FA-CV-10b	60	60	26	41	391	248	23	490	35	292	51	33,1	78,5	9,46
Piroxênio-Plagioclásio Basalto	Sta Bárbara	FA-GE-04	160	200	37	40	470	224	15	795	22	164	34	16,3	39,9	5,16
Piroxênio-Plagioclásio Basalto	Sta Bárbara	FA-CV-02	180	180	37	39	475	198	9	549	21	173	39	15,0	39,0	5,03
Piroxênio-Plagioclásio Basalto	Sta Bárbara	FA-CV-18	160	190	36	73	460	313	37	550	26	193	42	20,2	47,5	5,90
Piroxênio-Plagioclásio Basalto	Sta Bárbara	FA-CV-07	150	150	38	57	455	358	9	452	20	170	35	17,8	42,7	5,31
Piroxênio-Plagioclásio Basalto	Sta Bárbara	FA-CV-19b	130	130	33	67	420	245	32	385	26	223	45	23,7	56,1	6,80
Piroxênio-Plagioclásio Basalto	Sta Bárbara	FA-CV-01c	90	50	28	50	421	290	13	503	30	255	51	30,1	73,8	8,78
Piroxênio-Plagioclásio Basalto	Sta Bárbara	FA-CV-19b1	80	50	27	48	432	2477	128	816	30	256	52	22,9	54,6	6,68
Piroxênio-Plagioclásio Basalto	Sta Bárbara	FA-CV-16	80	50	28	65	430	1037	43	668	41	268	53	33,9	79,5	9,71
Piroxênio-Plagioclásio Basalto	Sta Bárbara	FA-CV-20	110	70	27	46	428	462	29	702	30	250	51	32,1	76,0	9,23
Cumulado	Sta Bárbara	FA-GE-07	180	180	38	53	457	258	26	558	19	160	37	18,0	41,3	5,06
Cumulado	Sta Bárbara	FA-GE-13a	130	60	34	57	474	199	23	482	23	197	43	20,2	48,5	5,90
Cumulado	Sta Bárbara	FA-CV-05	90	-	32	49	499	196	24	515	25	202	42	22,6	53,6	6,51
Cumulado	Sta Bárbara	FA-GE-09c	130	110	31	68	442	99	10	680	24	201	45	22,7	52,3	6,19
Cumulado	Sta Bárbara	FA-CV-03a	110	-	31	49	513	259	13	479	20	165	34	17,2	41,0	5,09
Cumulado	Sta Bárbara	FA-CV-03b	100	-	31	44	470	235	11	520	20	165	33	16,5	41,0	5,26
Cumulado	Sta Bárbara	FA-GE-09a	90	-	28	42	439	397	23	772	21	184	37	19,7	49,1	6,06
Cumulado	Sta Bárbara	FA-GE-13b	100	-	25	54	525	244	27	701	25	219	45	24,2	57,4	6,98
Cumulado	Sta Bárbara	FA-GE-09b	90	-	25	31	430	272	13	609	21	180	36	23,6	58,4	6,79

Apêndice B: Tabela de dados litogeoquímicos das rochas basálticas do Arquipélago de Abrolhos. (continuação).

Unidade litológica	Ilha	Amostra	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Th	U
Olivina-Plagioclásio Basalto	Sueste	FA-CV-13	38,2	8,7	3,26	8,6	1,4	7,7	1,3	3,5	0,48	2,8	0,38	7,0	3,2	3,3	1,0
Olivina-Plagioclásio Basalto	Sueste	FA-CV-12b	42,4	9,6	3,48	9,5	1,5	8,2	1,4	3,8	0,52	3,0	0,41	7,6	3,7	3,7	1,0
Piroxênio-Plagioclásio-Olivina Basalto	Siriba	FA-CV-11	35,4	8,0	3,05	7,7	1,3	6,7	1,2	3,0	0,39	2,3	0,32	6,3	3,1	2,6	0,7
Piroxênio-Plagioclásio-Olivina Basalto	Siriba	FA-CV-10a	38,9	8,9	3,20	8,5	1,4	7,4	1,2	3,2	0,43	2,5	0,33	6,8	3,6	2,9	0,8
Piroxênio-Plagioclásio-Olivina Basalto	Siriba	FA-CV-10b	42,3	9,6	3,47	9,2	1,5	8,1	1,4	3,7	0,50	2,9	0,40	7,3	3,5	3,4	0,9
Piroxênio-Plagioclásio Basalto	Sta Bárbara	FA-GE-04	23,9	5,9	2,09	6,1	1,0	5,4	0,9	2,5	0,32	1,8	0,25	4,5	2,4	1,8	0,3
Piroxênio-Plagioclásio Basalto	Sta Bárbara	FA-CV-02	23,8	5,8	2,00	5,6	0,9	5,0	0,9	2,3	0,30	1,7	0,23	4,8	3,1	1,8	0,3
Piroxênio-Plagioclásio Basalto	Sta Bárbara	FA-CV-18	27,2	6,5	2,36	6,5	1,1	5,6	1,0	2,6	0,34	2,0	0,26	5,3	2,7	2,2	0,7
Piroxênio-Plagioclásio Basalto	Sta Bárbara	FA-CV-07	24,6	5,7	2,17	5,7	0,9	5,0	0,8	2,2	0,29	1,7	0,23	4,7	2,5	1,8	0,5
Piroxênio-Plagioclásio Basalto	Sta Bárbara	FA-CV-19b	30,8	7,2	2,73	7,1	1,2	6,1	1,1	2,8	0,37	2,2	0,30	5,8	2,9	2,6	0,7
Piroxênio-Plagioclásio Basalto	Sta Bárbara	FA-CV-01c	39,3	8,8	3,14	8,5	1,4	7,4	1,3	3,3	0,43	2,5	0,35	6,5	3,4	2,9	0,9
Piroxênio-Plagioclásio Basalto	Sta Bárbara	FA-CV-19b1	30,3	7,1	2,55	7,3	1,2	6,5	1,1	3,0	0,41	2,4	0,32	6,6	3,2	3,1	0,8
Piroxênio-Plagioclásio Basalto	Sta Bárbara	FA-CV-16	44,0	10,3	4,03	10,5	1,7	8,8	1,5	3,9	0,49	2,8	0,39	6,8	3,3	3,2	0,9
Piroxênio-Plagioclásio Basalto	Sta Bárbara	FA-CV-20	41,0	9,1	3,28	9,0	1,4	7,2	1,3	3,3	0,42	2,4	0,33	6,4	3,2	3,4	0,9
Cumulado	Sta Bárbara	FA-GE-07	22,6	5,4	1,97	5,5	0,9	4,7	0,8	2,1	0,28	1,6	0,23	4,6	2,5	1,7	0,5
Cumulado	Sta Bárbara	FA-GE-13a	26,9	6,3	2,38	6,3	1,0	5,5	0,9	2,5	0,33	2,0	0,26	5,2	2,8	2,2	0,6
Cumulado	Sta Bárbara	FA-CV-05	29,9	6,8	2,46	6,7	1,1	5,8	1,0	2,7	0,35	2,0	0,27	5,5	2,8	2,3	0,6
Cumulado	Sta Bárbara	FA-GE-09c	27,6	6,4	2,51	6,5	1,0	5,6	1,0	2,5	0,34	2,0	0,27	5,4	3,0	2,4	0,7
Cumulado	Sta Bárbara	FA-CV-03a	23,5	5,5	2,10	5,5	0,9	4,8	0,8	2,1	0,29	1,7	0,22	4,5	2,3	1,8	0,5
Cumulado	Sta Bárbara	FA-CV-03b	24,5	5,7	2,13	5,7	0,9	5,0	0,8	2,2	0,29	1,7	0,23	4,5	2,4	1,9	0,5
Cumulado	Sta Bárbara	FA-GE-09a	27,4	6,3	2,53	6,2	1,0	5,3	0,9	2,4	0,31	1,8	0,24	4,8	2,4	2,1	0,4
Cumulado	Sta Bárbara	FA-GE-13b	31,4	7,0	2,85	7,1	1,1	6,0	1,0	2,7	0,36	2,1	0,28	5,6	2,8	2,5	0,7
Cumulado	Sta Bárbara	FA-GE-09b	29,8	6,5	3,18	6,2	1,0	5,2	0,9	2,3	0,31	1,8	0,24	4,7	2,3	2,2	0,5

APÊNDICE C: Métodos analíticos

APÊNDICE C: Métodos analíticos

As amostras foram analisadas pelo laboratório ACTLABS no Canadá em novembro de 2006 pelo pacote 4litho. O pacote 4litho envolve a análise de elementos maiores por ICP-AES (plasma) após fusão da amostra com metaborato ou tetraborato de lítio. Os elementos traços são analisados por ICP-MS.

O método analítico ICP-AES (em inglês, Inductively Coupled Plasma – Atomic Emission Spectrometry) é capaz de medir elementos maiores e traços, incluindo a maior parte dos elementos terras raras (muito embora neste último caso os limites de detecção sejam mais elevados que aqueles da ativação neutrônica). A preparação das amostras requer a produção de soluções e demanda mais tempo que a preparação de amostras para a fluorescência de raio-X. Uma vez separadas as soluções, as análises podem ser feitas em questão de minutos e simultaneamente, o que reduz bastante os custos e o tempo das análises. O método é basicamente de “chama”. A solução é passada como um aerosol através de um nebulizador dentro de um plasma de Argônio. O ICP é uma onda aquecida de átomos de Ar que excita os vários elementos que compõem a amostra. A excitação produz linhas espectrais que são detectadas por vários fotomultiplicadores e convertidas em concentrações pela comparação com padrões internacionais.

No método ICP-MS (em inglês, Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry) os íons são extraídos do plasma através de um pequeno orifício em condições de vácuo e colimados em direção a um espectrômetro de massa. O método produz análises com limites de detecção baixíssimos, comparáveis ao método de ativação neutrônica. É utilizado especialmente na análise de elementos traços e especialmente elementos terras raras.

Qualquer método analítico envolve precisão e acurácia. Precisão é a capacidade de repetir resultados; já a acurácia é o mais próximo que se consegue chegar do valor correto.

Os limites de detecção para os elementos maiores foram de 0,01% peso, à exceção de MnO e TiO₂ (0,001% peso). Para os elementos traços, os limites de detecção ficaram abaixo de 4 ppm e para os elementos terras-raras abaixo dos

valores condriticos. Os brancos foram menores que 2 ppm para os elementos traço, à exceção de Ni e Cr (20 ppm).

Os valores de exatidão para os óxidos foram obtidos utilizando-se o padrão internacional BIR-1 (*icelandic basalt, USGS*), ficando abaixo de 2% (à exceção de sódio; 5,7%). Os valores elevados de exatidão para P_2O_5 e K_2O são atribuídos às concentrações destes óxidos no padrão, muito próximas dos limites de detecção. Os valores de exatidão para Rb não puderam ser estimados devido às baixíssimas concentrações deste elemento no padrão. Para outros elementos móveis, os valores de exatidão foram 14% (Ba) e 3% (Sr). Para os elementos compatíveis, foram obtidos os seguintes valores: 7% (V), 0% (Cr), 0% (Sc), 2% (Co) e 6% (Ni). Para os elementos incompatíveis, os valores obtidos foram 16% (Y e Zr) e 0,6% (Nb). Os valores de exatidão para os elementos terras raras variaram de 0% a 17%, com uma média de 2,6%.

Os valores de precisão foram obtidos pela repetição da análise da amostra FA-CV-19b. Os valores para os óxidos ficaram abaixo de 1%, à exceção dos álcalis e P_2O_5 (cerca de 2%). Os valores para elementos compatíveis (V, Co, Sc, Ni, Cr e Co) ficaram abaixo de 7%. Valores para Zr, Y e Nb ficaram abaixo de 4% e valores para Ba, Sr, Rb e elementos terras raras ficaram abaixo de 3%, à exceção do Ho (9%).