

### 3.3 Montes Submarinos

A Cadeia de Montes Submarinos Vitória-Trindade, como é conhecida a sequência linear de montes submarinos no paralelo de Vitória, é uma cadeia de direção geral leste-oeste que segundo Motoki et al., (2012) apresenta em torno de 950 Km de comprimento, apresenta cerca de trinta montes submarinos de forma cônica caracterizados morfologicamente como edifícios vulcânicos.

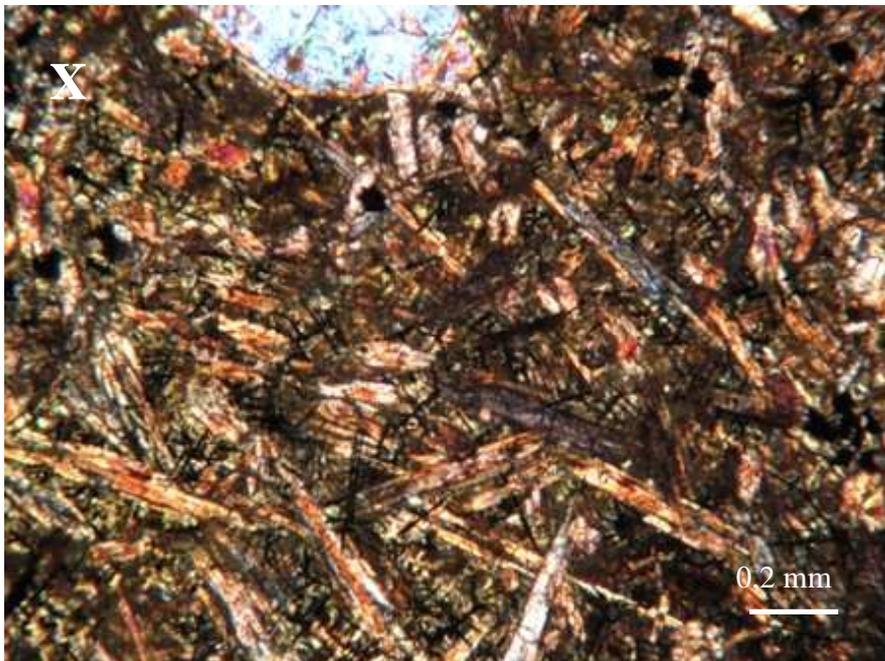
#### 3.3.1 Descrição das amostras

Todas as amostras (figura 31) são parecidas representando rochas ultramáficas vesiculadas, geralmente preenchidas por um material pulverulento amarelado, que segundo Fodor e Hannan (2000) estas vesículas contêm calcita e esmectita e uma fase hídrica clara e fibrosa de  $MgO-Al_2O_3-SO_3$ . Tais montes supracitados são caracterizados segundo Fodor e Hannan (2000) e Skolotnev et al., (2010) como rochas alcalinas ultrabásicas denominadas de ankaramito.

Para este trabalho de mestrado foram obtidas cinco amostras do monte Columbia, duas amostras do monte Dogaressa, quinze amostras do monte Davis, duas amostras do monte Jaseur e dez amostras do monte Montague, totalizando trinta e quatro amostras que foram laminadas para estudos petrográficos. Apresentam clinopiroxênio como o fenocristal mais representativo em meio à matriz microlítica apresentando titano-augita e opacos ripiformes (figura 32) e vesículas milimétricas (2,0 mm) preenchidas por um material fibroso amarelo (figura 34) e fenocristais euédricos à subédricos de olivina (figuras 32, 37, 38 e 39) além de megafenocristais de augita (figura 35) apresentando birrefringência moderada (final da primeira ordem – início da segunda ordem) e megafenocristais de sanidina – ângulo  $2V = 8^\circ$  e extinção =  $3^\circ$  (figura 36). Apresentam em algumas partes fraturas preenchidas por zeólitas (figura 33) e alguns fenocristais de clinopiroxênio (augita-basalto? Diopsídio?) (figura 34), além de opacos que segundo Fodor e Hannan (2000) são magnetita titanífera no monte Colúmbia. Fenocristais milimétricos ( $< 1mm$ ) de olivina subédrica pode ser encontrados, fraturados e envoltos por idiginsita, além de ser possível observar óxidos e vidro.



Figura 32 – Monte Columbia



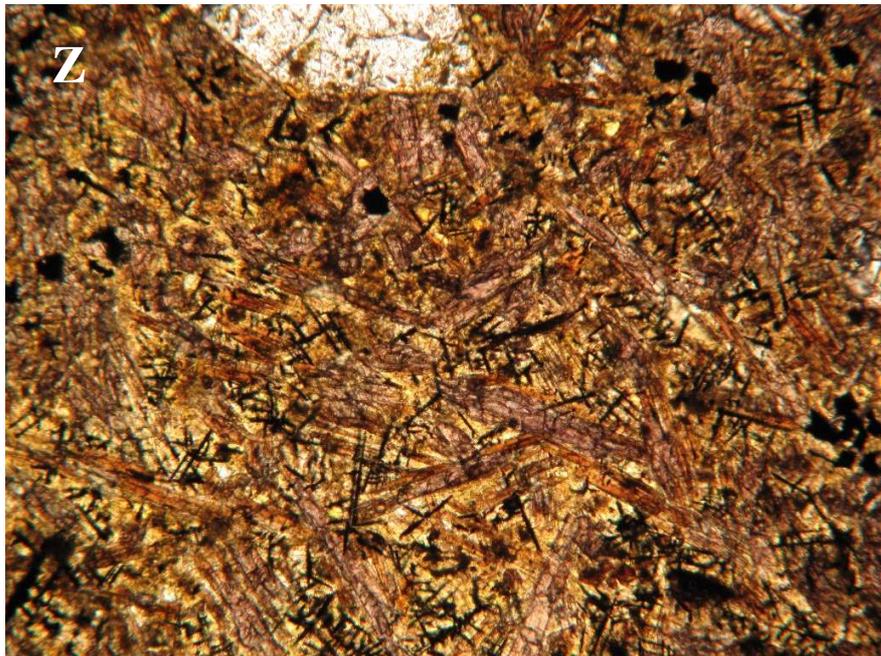


Figura 33 – **Monte Columbia X**: nicóis cruzados e **Z**: nicóis paralelos. Matriz microlítica apresentando titano-augita e opacos ripiformes e uma fenocristal euédrico de olivina. Aumento de 20 X. Esta mesma lâmina apresenta em algumas partes fraturas preenchidas por zeólitas e alguns fenocristais de clinopiroxênio (possivelmente aegirina-augita). Figuras abaixo.



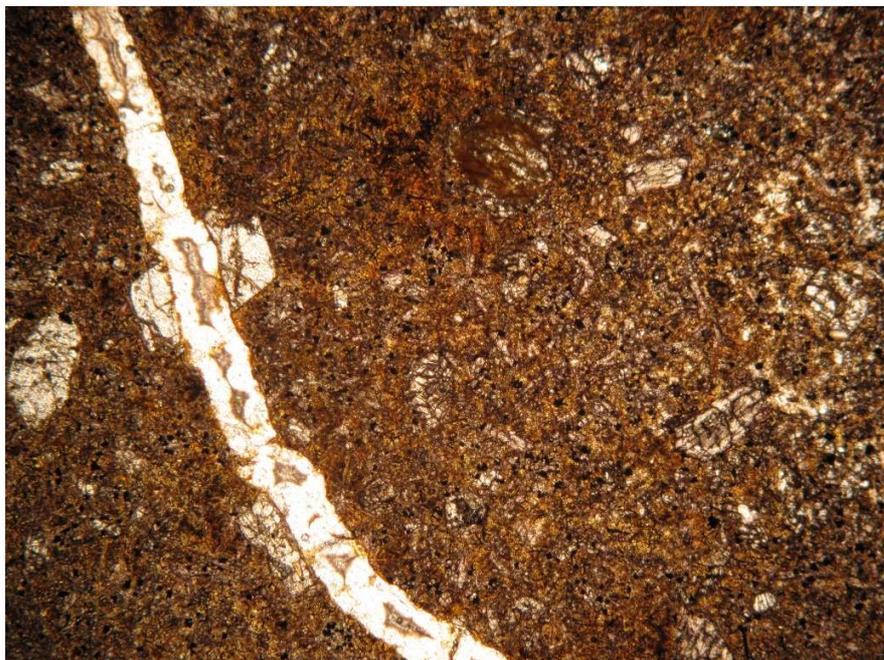
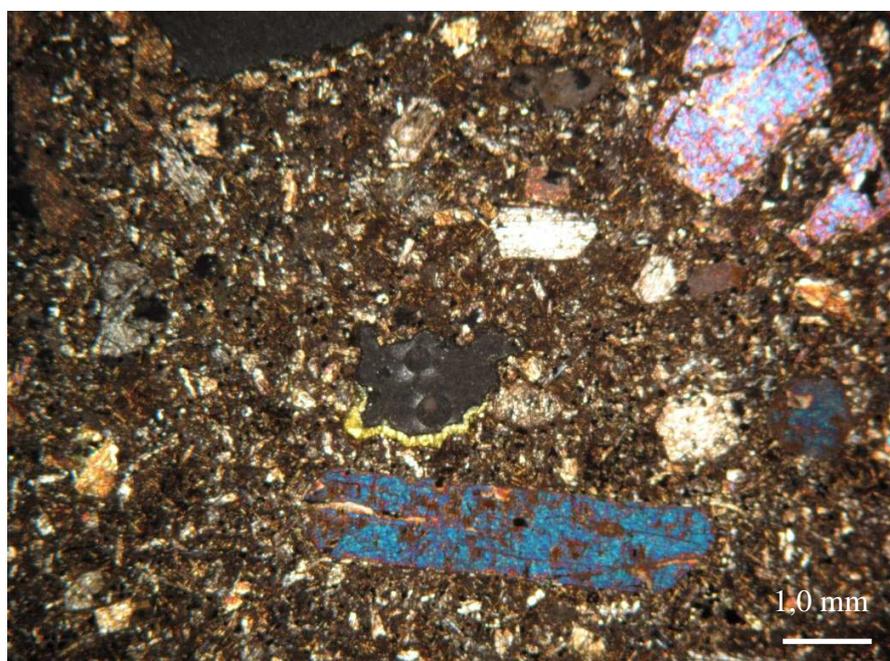


Figura 34 – **Monte Columbia** Imagem superior: nicóis cruzados e Imagem inferior: nicóis paralelos. Matriz microlítica apresentando titano-augita e opacos. Fenocristais subédrico de olivina e clinopiroxênio zonado e fratura preenchida por zeólitas. Aumento de 2,5X.



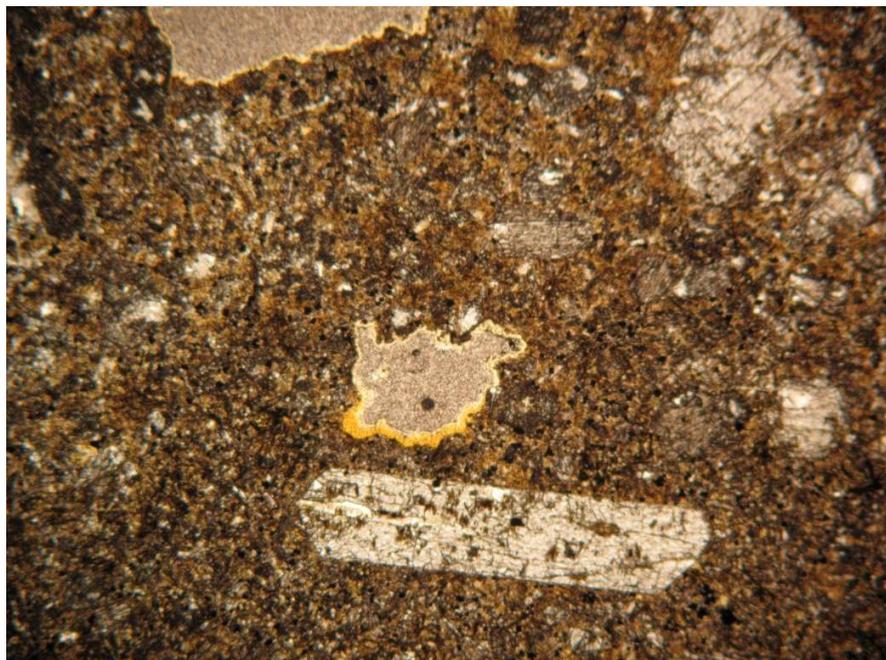


Figura 35 – **Monte Columbia** Imagem superior: nicóis cruzados e Imagem inferior: nicóis paralelos. Matriz apresentando titano-augita e opaco. Fenocristais de clinopiroxênio e vesícula preenchida por um material fibroso amarelo. Aumento de 2,5X.

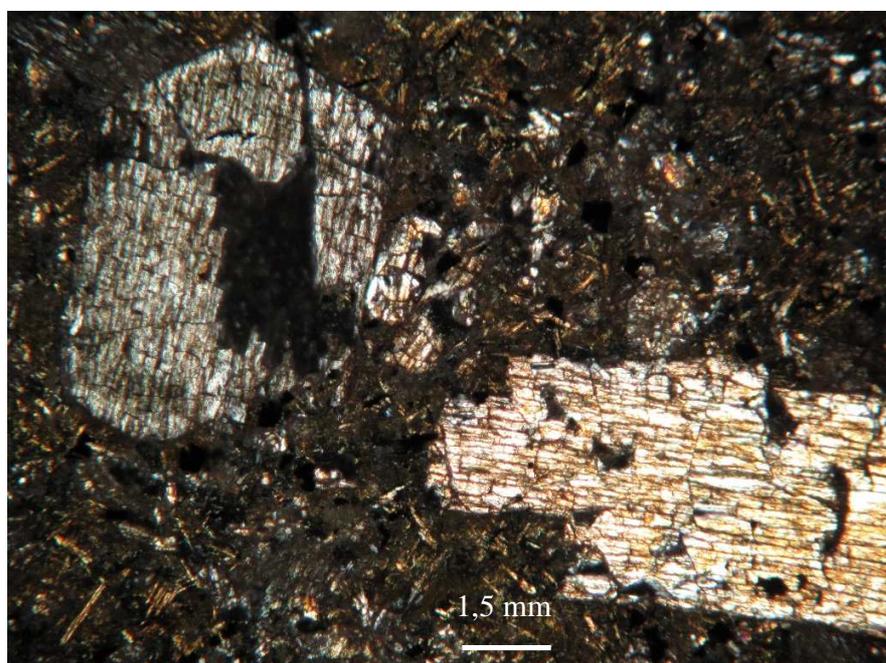


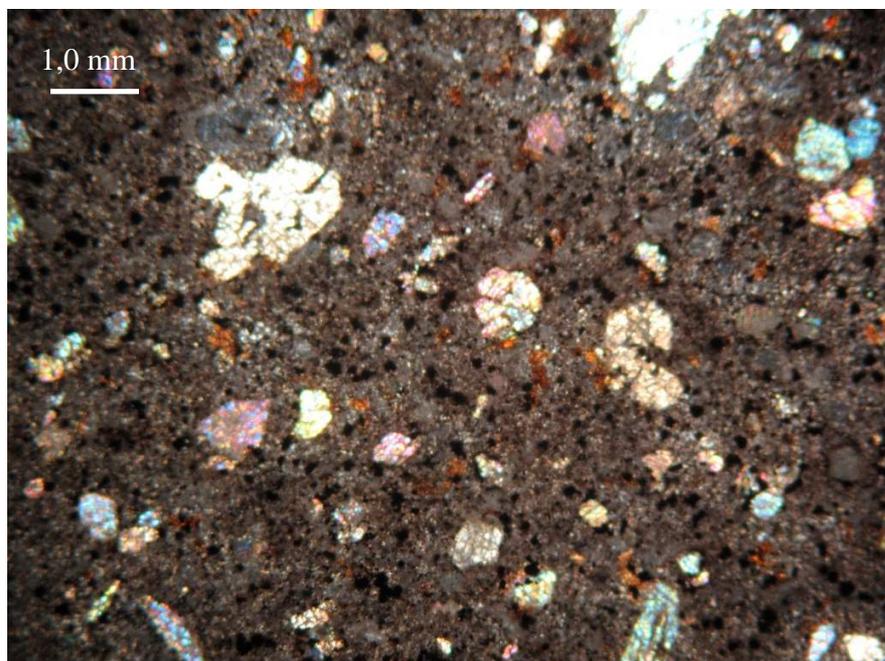


Figura 36 – **Monte Columbia** Imagem superior: nicóis cruzados e Imagem inferior: nicóis paralelos. Matriz microlítica apresentando opacos e titano-augita e macrofenocristais (>5,0 mm) de augita. Aumento de 10X.





Figura 37 – **Monte Davis** Imagem superior: nicóis cruzados e Imagem inferior: nicóis paralelos. Matriz microlítica apresentando titano-augita, feldspatos e opacos além de um macrofenocristal (>5,0 mm) de sanidina – ângulo  $2V = 8^\circ$  e extinção =  $3^\circ$ . Aumento de 10X.



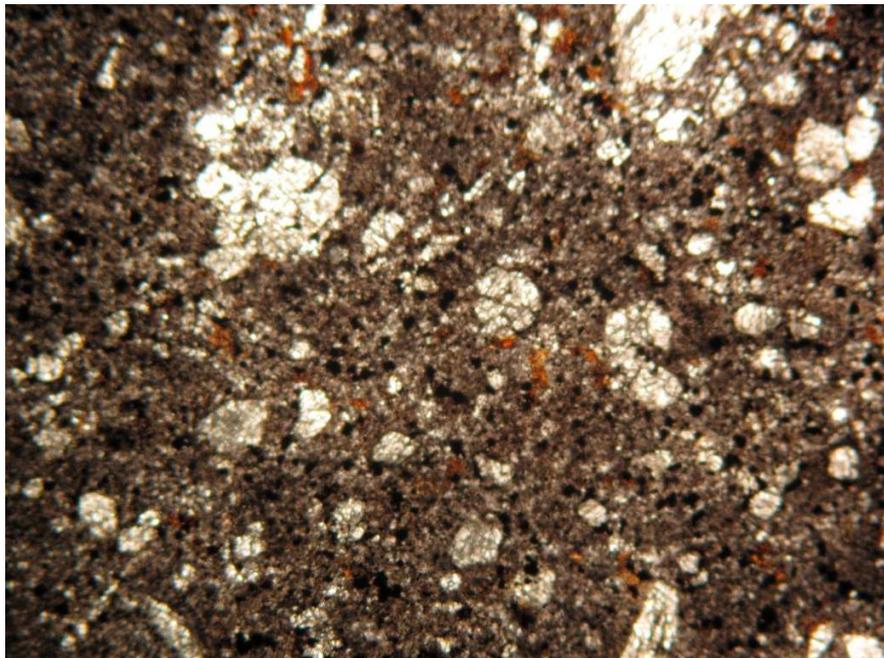
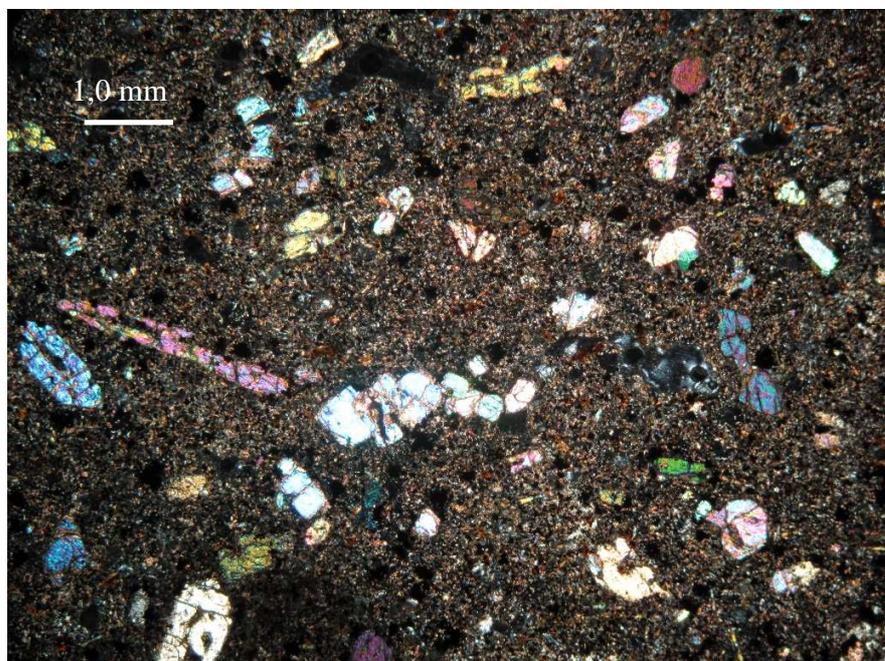


Figura 38 – **Monte Dogaressa** Imagem superior: nicóis cruzados e Imagem inferior: nicóis paralelos. Matriz alterada apresentando opacos e vidro. Fenocristais de olivina. Aumento de 2,5X.



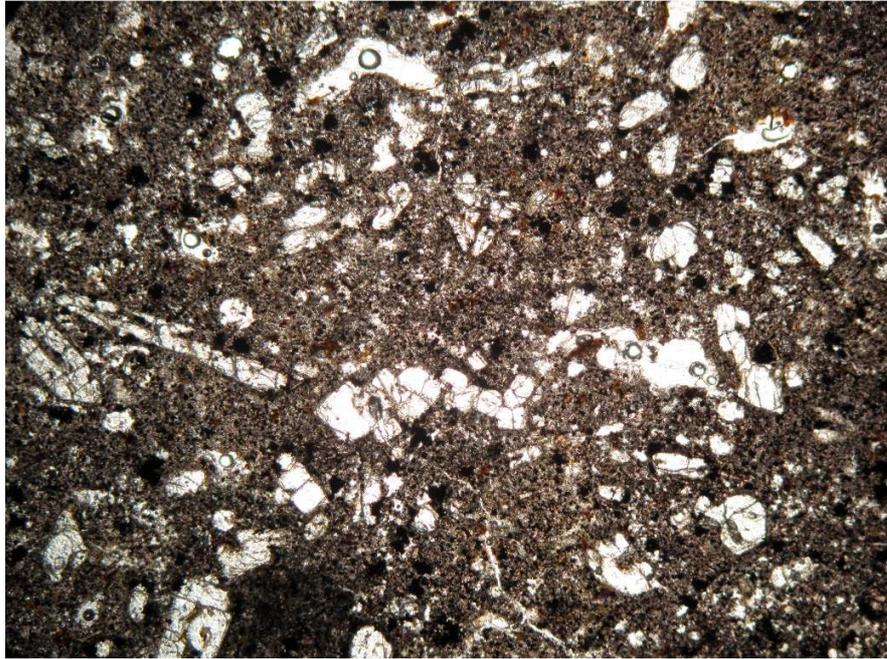


Figura 39 – **Monte Jaseur** Imagem superior: nicóis cruzados e imagem inferior: nicóis paralelos. Matriz alterada apresentando titano-augita, opacos e vidro. Fenocristais de olivina. Aumento de 2,5X.



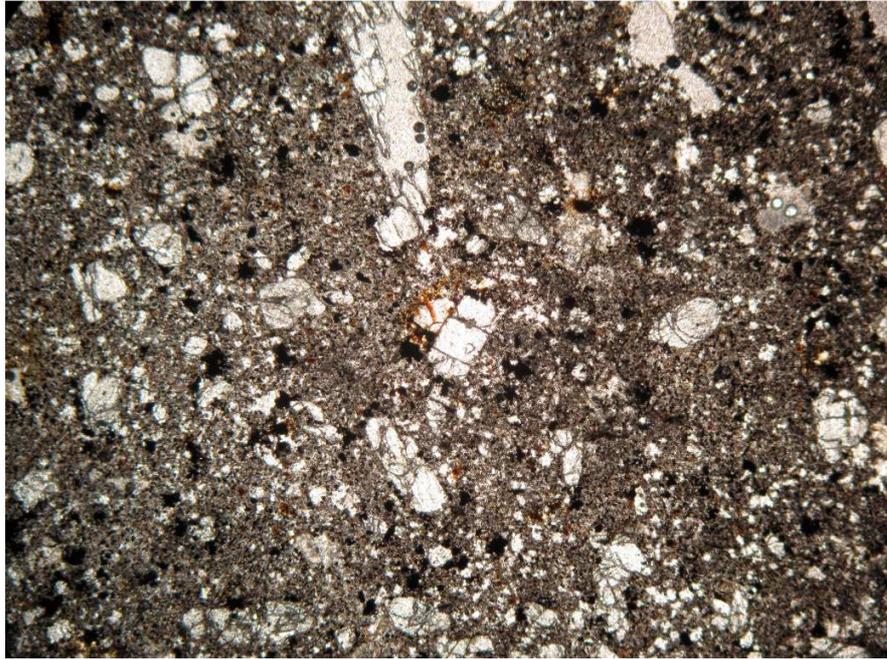


Figura 40 – **Monte Montague U**: nicóis cruzados e V: nicóis paralelos. Matriz apresentando titano-augita, uma enorme quantidade de opacos, vidro e fenocristais fraturados de olivina/idginsita e piroxênio. Aumento de 2,5X.

## 4 DATAÇÃO Ar-Ar

### 4.1 Introdução

Foi utilizada a técnica do *step-heating* para datação  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ . Caso o mineral tenha permanecido inalterado durante o tempo geológico, ou seja, não tenha havido a abertura do sistema cristalino, serão obtidas para cada etapa de aquecimento idades iguais gerando um espectro de idades contínuo e constante chamado de idade *plateau*.

Os dados analíticos para as três amostras (02 basanitos e 01 dique de fonólito) da ilha principal de Martin Vaz são apresentados a seguir: Os montes submarinos não foram datados devido ao estado de alteração avançado das amostras coletadas.

#### **AMOSTRA 01: MVA-04 (figuras 40 e 41; tabela 1)**

A amostra MVA-04 observada na figura 40 é de basanito com 1,25%  $\text{K}_2\text{O}$ . Os resultados estão apresentados na tabela 1, onde vê-se que o aquecimento inicial foi de  $580^\circ\text{C}$  e a temperatura foi aumentando progressivamente até  $1400^\circ\text{C}$ . A figura 41 apresenta o diagrama de idade *plateau* para a amostra, revelando um valor integrado de  $623 \pm 127\text{Ka}$ .



Figura 41 - Grãos da amostra MVA-04 contendo 1,25% em peso de  $\text{K}_2\text{O}$ .

Tabela 1 - Valores discriminados para cada isótopo de argônio liberado durante cada etapa de aquecimento gradual a uma taxa média de  $J = 0.00069610 \pm 0.00000299$ .

T (°C)	<sup>36</sup> Ar	<sup>37</sup> Ar	<sup>38</sup> Ar	<sup>39</sup> Ar	<sup>40</sup> Ar	Idade ± 2σ
580 °C	0,0000809	0,0163759	0,0000965	0,0071812	0,0253491	34,5 ± 891,8
650 °C	0,0003199	0,0133405	0,0003928	0,0271606	0,1055363	514,0 ± 239,8
720 °C	0,0004143	0,0091186	0,0005260	0,0374848	0,1428856	666,6 ± 223,6
800 °C	0,0001412	0,0139455	0,0004623	0,0335956	0,0591286	676,4 ± 222,7
850 °C	0,0000858	0,0136802	0,0001433	0,0104923	0,0309275	772,5 ± 596,2
925 °C	0,0001911	0,0203713	0,0001090	0,0058435	0,0594889	891,6 ± 1182,1
1000 °C	0,0004090	0,0515161	0,0001307	0,0034651	0,1204509	980,3 ± 2472,0
1020 °C	0,0006776	0,0938756	0,0001551	0,0015431	0,1945334	107,6 ± 6918,4
1040 °C	0,0016065	0,2819370	0,0003613	0,0025987	0,4628152	3616,8 ± 7322,2
1060 °C	0,0016029	0,2875366	0,0003386	0,0014236	0,4611151	6982,6 ± 13404,2
1080 °C	0,0012133	0,4128916	0,0002461	0,0016238	0,3290585	1492,2 ± 11508,4
1250 °C	0,0038046	0,8024637	0,0007809	0,0034851	1,1158469	20437,2 ± 11018,7
1400 °C	0,0001704	0,0078491	0,0000224	0,0000241	0,0491781	101724,1 ± 314472,8

Verifica-se na tabela 1 que o aquecimento inicial foi de 580 °C e aumentando progressivamente até atingir a temperatura final de 1400 °C.

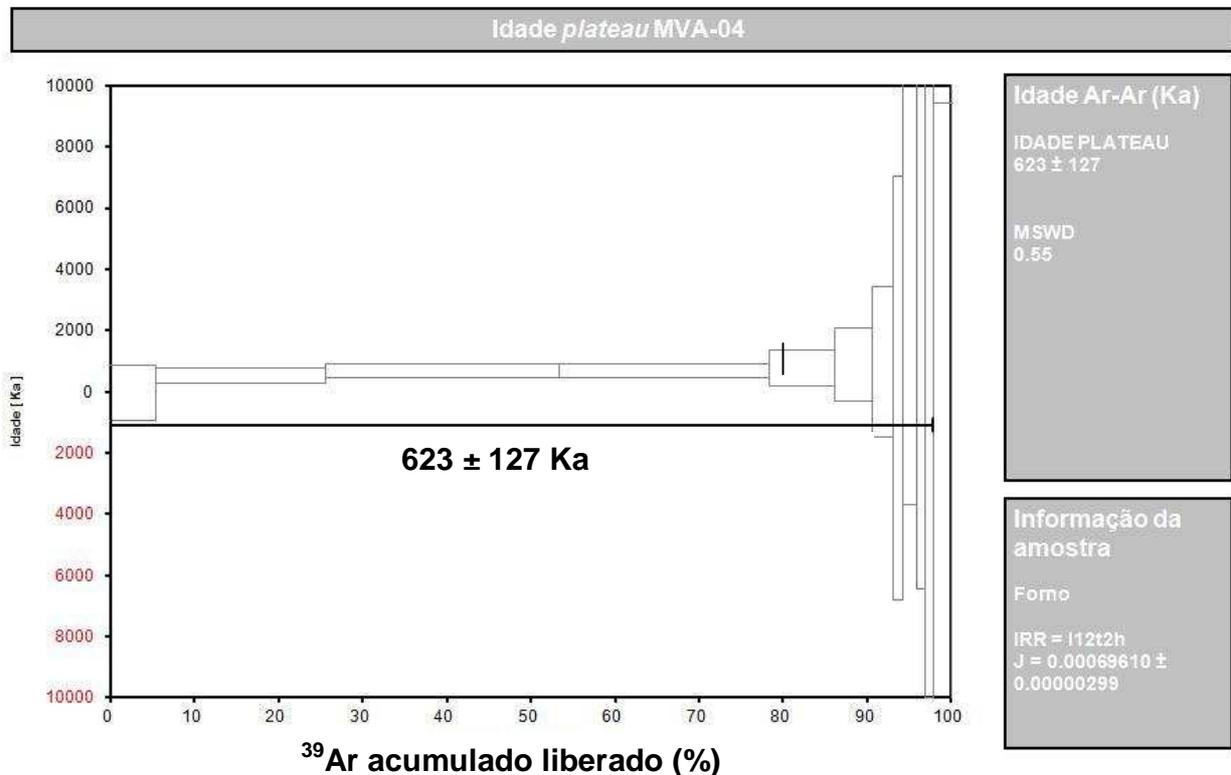


Figura 42 - Diagrama de idade *plateau* para a amostra MVA-04.

Uma das condições para se obter uma idade *plateau* é que pelo menos 60% do gás liberado pelo grão tenham idades aproximadas, e como é observado no diagrama acima, 80% do gás liberado apresenta uma variação aceitável, porém, as idades *plateau* obtidas geraram uma idade integrada de  $623 \pm 127$  Ka (MSWD = 0.55 e probabilidade de 0.85).

**AMOSTRA 02: MVA-05B (figuras 42 e 43; tabela 2)**

A amostra MVA-05B observada na figura 42 é de dique de fonólito com 5,14% K<sub>2</sub>O. Os resultados dos isótopos de argônio estão apresentados na tabela 2, onde vê-se que o aquecimento inicial foi de 580°C e a temperatura foi aumentando progressivamente até 1400°C. A figura 43 apresenta o diagrama de idade *plateau* para a amostra, revelando um valor integrado de  $649 \pm 84$ Ka.

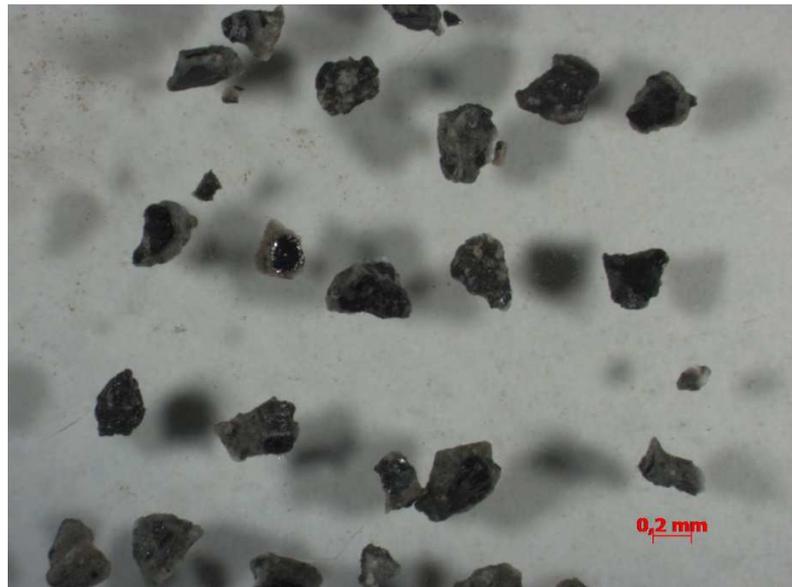


Figura 43 - Grãos da amostra MVA-05B contendo 5,14% em peso de K<sub>2</sub>O.

Tabela 2 - Valores discriminados para cada isótopo de argônio liberado durante cada etapa de aquecimento gradual a uma taxa média de  $J = 0.00070000 \pm 0.00000203$ .

T (°C)	<sup>36</sup> Ar	<sup>37</sup> Ar	<sup>38</sup> Ar	<sup>39</sup> Ar	<sup>40</sup> Ar	Idade ± 2σ
580 °C	0,0000369	0,0053084	0,0001091	0,0074701	0,0151026	613,5 ± 868,7
650 °C	0,0001627	0,0102096	0,0004131	0,0282042	0,0648744	689,5 ± 257,9
720 °C	0,0003211	0,0025236	0,0005349	0,0352350	0,1137698	648,1 ± 245,0
800 °C	0,0003101	0,0079607	0,0006734	0,0455315	0,1157340	659,4 ± 197,0
900 °C	0,0002903	0,0131998	0,0012289	0,0858380	0,1260389	594,1 ± 130,3

1000 °C	0,0007760	0,0921769	0,0009941	0,0594389	0,2551466	662,7 ± 262,1
1050 °C	0,0010767	0,2890866	0,0009664	0,0568657	0,3362043	869,3 ± 317,8
1100 °C	0,0002553	0,2265266	0,0000577	0,0008858	0,0593941	3915,3 ± 12154,3
1250 °C	0,0003022	0,0226514	0,0000523	0,0001068	0,0869934	18817,0 ± 1050488
1400 °C	0,0002886	0,0042436	0,0000411	0,0000139	0,0849218	122339,9 ± 5588674

O aquecimento inicial foi de 580 °C aumentando progressivamente até atingir a temperatura final de 1400 °C.

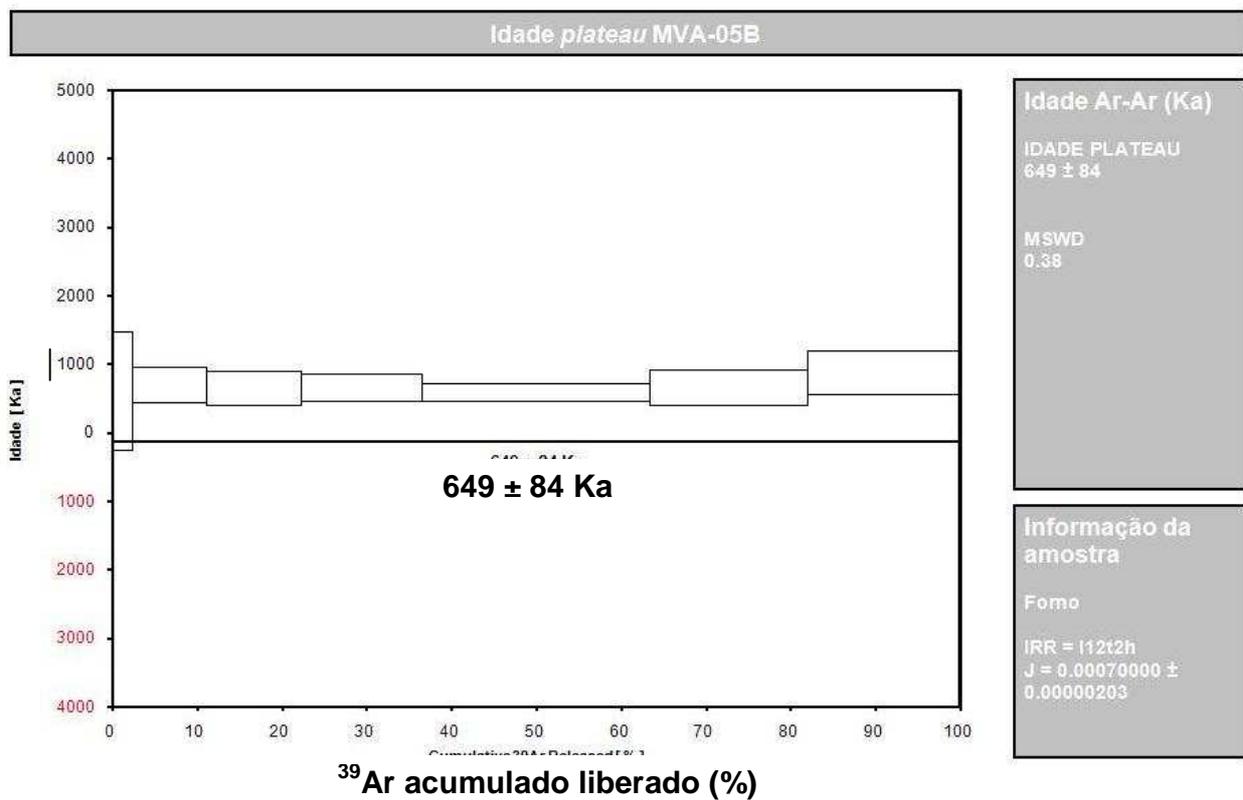


Figura 44 - Diagrama de idade *plateau* para a amostra MVA-05B.

100% do gás liberado foram utilizados e as idades *plateau* obtidas geraram uma idade integrada de 649 ± 84Ka (MSWD = 0.38 e probabilidade = 0.95).

**AMOSTRA 03: MVA-07 (figuras 44 e 45; tabela 3)**

A amostra MVA-07 observada na figura 44 é de basanita com 1,48%  $K_2O$ . Os resultados dos isótopos de argônio estão apresentados na tabela 3, onde vê-se que o aquecimento inicial foi de 580°C e a temperatura foi aumentando progressivamente até 1400°C. A figura 45 apresenta o diagrama de idade *plateau* para a amostra, revelando um valor integrado de  $492 \pm 87$  Ka.



Figura 45 - Grãos da amostra MVA-07 contendo 1,48% em peso de  $K_2O$ .

Tabela 3 - Valores discriminados para cada isótopo de argônio liberado durante cada etapa de aquecimento gradual a uma taxa média de  $J = 0.00069840 \pm 0.00000175$ .

T (°C)	$^{36}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}$	$^{38}\text{Ar}$	$^{39}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}$	Idade $\pm 2\sigma$
580 °C	0,0000721	0,0122884	0,0001796	0,0104053	0,0230981	315,8 $\pm$ 563,2
650 °C	0,0000947	0,0222330	0,0005140	0,0347876	0,0440064	637,1 $\pm$ 208,8
720 °C	0,0001698	0,0261353	0,0006792	0,0494666	0,0631902	373,2 $\pm$ 121,2
800 °C	0,0000910	0,0276684	0,0006320	0,0462498	0,0454494	560,2 $\pm$ 158,4
900 °C	0,0000891	0,0408692	0,0005166	0,0385895	0,0385629	501,7 $\pm$ 177,0
1000 °C	0,0001481	0,0607559	0,0002862	0,0208127	0,0486659	578,0 $\pm$ 321,0
1050 °C	0,0004143	0,4004862	0,0003772	0,0220308	0,1043126	828,8 $\pm$ 496,2
1100 °C	0,0008798	0,9696166	0,0002677	0,0074441	0,1895241	1583,3 $\pm$ 2947,9
1250 °C	0,0009090	0,3760363	0,0002338	0,0025986	0,2732023	18039,4 $\pm$ 5813,0
1400 °C	0,0001053	0,0104534	0,0000135	0,0000169	0,0286743	275079,2 $\pm$ 848281,4

A análise desta amostra obteve idades integradas de quase todos os *plateaus* obtidos. Porém, apresenta valor elevado de MSWD (1.37) e probabilidade baixa (0.21), provavelmente devido ao baixo teor de  $K_2O$  (1,48% peso). As idades *plateau* obtidas geraram uma idade integrada de  $623 \pm 127$  Ka.

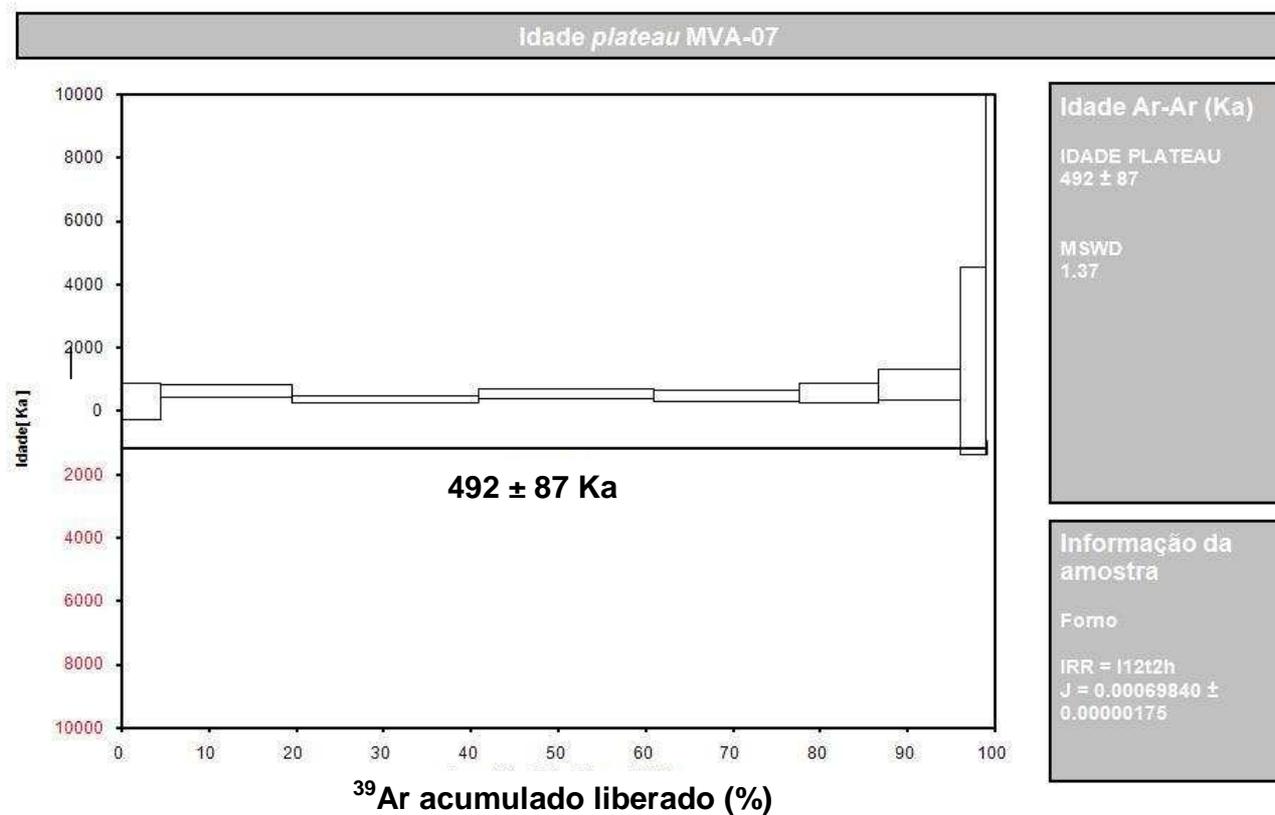


Figura 46 - Diagrama de idade *plateau* para a amostra MVA-07.

## 5 LITOGEOQUÍMICA

### 5.1 Introdução

A análise litogeoquímica é de grande importância para a geologia, pois permite entender os processos geológicos. A litogeoquímica convencional é subdividida em quatro categorias: elementos maiores, elementos traços, geoquímica isotópica e isótopos estáveis. Neste capítulo será abordada a análise química de elementos maiores e traços com o intuito de caracterizar os litotipos presentes na ilha principal de Martin Vaz e aqueles existentes nos cinco montes submarinos estudados além de definir a natureza química do magmatismo envolvido e assim compreender os processos petrogenéticos, possíveis fontes e ambientes geodinâmicos de geração para os litotipos analisados.

Como mostrado no capítulo 2 (Metodologia), foram analisadas 48 amostras sendo 16 de Martin Vaz e 32 dos montes submarinos. Foi levado em conta para a seleção das amostras as menos alteradas tanto do ponto de vista macroscópico quanto microscópico sendo realizada, anteriormente, uma análise petrográfica. Salvo as amostras de Martin Vaz, àquelas inerentes aos montes submarinos apresentaram certa alteração, o que era esperado devido ao ambiente que as mesmas se encontrava. As análises foram realizadas no *Activation Laboratories Ltda.* (ACTLABS, no Canadá), e todas as etapas do processamento das amostras podem ser encontradas no capítulo supracitado.

A maior parte das amostras analisadas é representada por rochas menos evoluídas, ultramáficas a máficas de matriz afanítica, contendo fenocristais de olivina. O anexo C e D contém as tabelas com os resultados das análises de litogeoquímica e inclui a análise de elementos maiores em % peso, ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3^T$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), perda ao fogo (PF) e a soma de todos os óxidos (TOTAL), elementos traços em ppm: incompatíveis móveis (Ba, Rb, Sr, U e Th) e os imóveis (Zr, Y, Nb, Hf), os elementos compatíveis (Ni, Cr, V e Co) e os elementos terras raras (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb e Lu). A partir destes dados foram gerados os gráficos litogeoquímicos com o

auxílio do software *GCDkit 2.3 (Geochemical Data Toolkit)* do programa *Microsoft Excel* e o uso do programa *CorelDRAW Graphics Suite X5* para edição dos gráficos. Vale ressaltar que esse programa de geoquímica fornece os resultados com os valores recalculados para a base anidra.

## 5.2 Cálculo normativo (CIPW), classificação e nomenclatura

Elementos maiores, no que tange os 10 óxidos dispostos nas tabelas de dados litogeoquímicos (vide anexos C e D), são utilizados de três maneiras principais: classificação de rocha, na construção de diagramas de variação e como parâmetro de comparação com composições de rochas determinadas experimentalmente, cujas condições de formação são conhecidas. Além disso, quando estudados juntos com os elementos traços, servem para identificação do contexto tectônico original de rochas ígneas e por vezes, sedimentares. Sobre as rochas ígneas deste trabalho, o objetivo principal do uso destes elementos foi para classificação de rocha e nomenclatura e a construção de diagramas bivariantes que através da inter-relação entre os elementos, permitem inferir os processos geoquímicos.

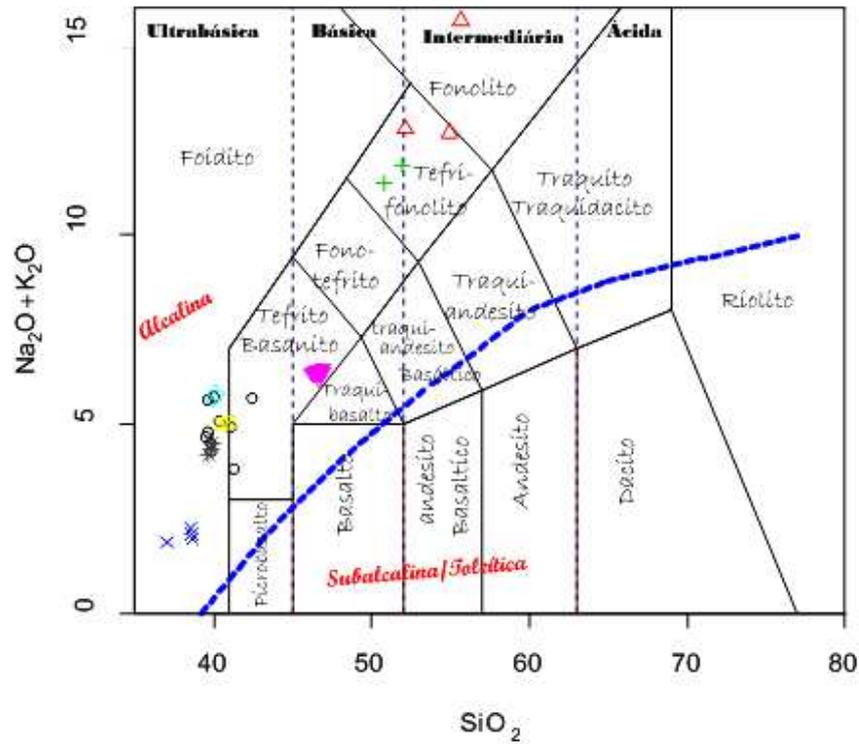
Outro uso dos valores em % em peso dos óxidos é para o cálculo normativo, um método bastante aplicado com a finalidade de caracterizar quimicamente as rochas ígneas. Seu cálculo baseia-se na composição química de rocha total e a partir dela, calcula um total de trinta e quatro minerais normativos que não necessariamente são presentes na rocha. O software *GCDkit 2.3 (Geochemical Data Toolkit)* calcula 12 minerais normativos para as amostras da ilha principal de Martin Vaz (tabela 4) e 14 minerais normativos para as amostras dos montes submarinos (tabela 5).

As amostras utilizadas neste trabalho de mestrado possuem valor mínimo de 33,91 % SiO<sub>2</sub> (TRIM-01D) e máximo de 52,2 (MVA-01) variando de ultrabásicas a básicas. Nos anexos 2 e 3 é possível observar os valores de mínimo, máximo, média, desvio padrão e coeficiente de variação para todos os elementos analisados. A perda ao fogo (PF) da maioria das amostras ultrapassa 2% peso indicando grau de alteração, uma vez que rochas que apresentam valores maiores que este, geralmente, são mais alteradas que aquelas que apresentam valores mais baixos

(IRVINE e BARAGAR, 1971). Dez das dezesseis amostras de Martin Vaz apresentam valor de perda ao fogo maior que 2%: MVA-01, MVA-02, MVA-05A, MVA-05B, MVA-06, MVA-08, MVA-10, MVA-12, MVA-13, MVA-14. (mínimo de 2,51 – MVA-10 e máximo de 9,87 – MVA-06). Os basanitos de Martin Vaz (MVA-03, MVA-04, MVA-07, MVA-09A, MVA-09B, MVA-10, MVA-11, MVA-12, MVA-13 e MVA-14) apresentam teor de MgO variando de 7,58 a 14,80 % peso, Na<sub>2</sub>O de 2,90 a 4,29 e K<sub>2</sub>O de 0,59 a 1,82. Os diques de fonólitos (MVA-05A, MVA-05B) apresentam teor de MgO de 2,04 e 2,12% peso, Na<sub>2</sub>O 5,15 e 6,02% peso e K<sub>2</sub>O 4,74 e 5,14 % peso. Os necks fonolíticos (MVA-01, MVA-02, MVA-06 e MVA-08) apresentam teor de MgO variando de 0,23 a 1,56% peso, Na<sub>2</sub>O 6,38 a 9,83 % peso e K<sub>2</sub>O variando de 3,84 a 6,38% peso. Vale citar os elevados teores de Ba (540-1680ppm), Rb (9-180ppm), Sr (1132-2997ppm) e Nb (83-272ppm) para todas as amostras de Martin Vaz, atestando seu caráter alcalino. Vinte e três das trinta e duas amostras dos montes submarinos apresentam valor de PF maior que 2% peso (mínimo de 0,2% peso – TRIM-03B e máximo de 24,32 – TRIM-08F). dessas 32 amostras, seis apresentaram valor de PF maior que 15,0% peso e foram descartadas das análises - TRIM-08E, TRIM-08F, TRIM-08G, TRIM-08H, TRIM-08I, TRIM-08J. Os montes submarinos apresentam valores de Ba, Rb, Sr e Nb bastante distintos quando comparados com os teores de Martin Vaz: BA variando de 11-33ppm, Rb de 253 a 377ppm, Sr de 636 a 1161ppm com exceção das amostras do monte Colúmbia (TRIM-01A, TRIM-01C, TRIM-01D, TRIM-01E) que apresentam valores mais altos, variando de 907 a 8903ppm e teores de Nd variando de 52 a 110ppm.

A figura 46 revela a classificação das rochas de Martin Vaz e dos montes submarinos segundo o diagrama TAS (Total de álcalis *versus* sílica) seguindo um *trend* alcalino que vai das menos evoluídas (basaltos alcalinos) até mais evoluídas (fonólitos).

## TAS, Le Bas et al., 1986



### Legenda

- *Martin Vaz - basanitos*
- + *Martin Vaz - fonólitos (diques)*
- △ *Martin Vaz - fonólitos (intrusões)*
- × *Columbia*
- ◇ *Dogaressa*
- ▽ *Davis*
- ⊠ *Jaseur*
- \* *Montague*

Figura 47 - Diagrama TAS (Total de Álcalis versus Sílica) – Le Bas et al. 1986. Discriminação de séries (Irvine e Baragar, 1971) para as amostras estudadas. Dados recalculados para 100% em base anídrica.

Tabela 4 - Valores obtidos com o uso da norma CIPW para as amostras de Martin Vaz. Valores em % peso.

Minerais normativos	MVA-01	MVA-02	MVA-03	MVA-04	MVA-05A	MVA-05B	MVA-06	MVA-07
	Neck fonolítico	Neck fonolítico	Basanitos	Basanitos	Dique Fonolítico	Dique Fonolítico	Neck fonolítico	Basanitos
<b>ortoclásio</b>	35,044	32,681	0	0	28,012	30,376	22,693	0
<b>albita</b>	17,57	6,54	0	0	14,764	7,938	22,045	0
<b>anortita</b>	0	4,034	3,462	7,739	8,638	7,924	4,574	4,955
<b>leucita</b>	0	0	28,843	27,644	0	0	0	26,573
<b>nefelina</b>	28,715	25,703	18,244	13,294	19,598	19,307	21,933	14,44
<b>kaliófilita</b>	0	0	15,462	15,836	0	0	0	14,287
<b>metassilicato de sódio</b>	2,933	0	0	0	0	0	0	0
<b>diopsídio</b>	6,086	18,32	0	0	9,15	14,319	13,589	0
<b>olivina</b>	2,783	2,912	37,868	39,261	6,591	5,925	2,109	40,661
<b>silicato de cálcio</b>	0	0	16,648	15,895	0	0	0	15,837
<b>ilmenita</b>	0,756	2,079	6,468	6,002	2,846	3	0,988	5,636
<b>apatita</b>	0,189	0,829	3,15	2,913	1,397	1,848	0,497	3,055
<b>soma</b>	94,077	93,097	99,222	96,913	90,997	90,637	88,428	96,869
Minerais normativos	MVA-08	MVA-09A	MVA-09B	MVA-10	MVA-11	MVA-12	MVA-13	MVA-14
	Neck fonolítico	Basanitos	Basanitos	Basanitos	Basanitos	Basanitos	Basanitos	Basanitos
<b>ortoclásio</b>	37,704	0	0	3,487	0	4,61	5,673	0
<b>albita</b>	16,013	0	0	8,092	0	4,047	5,296	0
<b>anortita</b>	0	8,033	7,245	15,764	4,695	11,855	11,196	4,497
<b>leucita</b>	0	28,018	27,21	0	28,274	0	0	29,122
<b>nefelina</b>	28,09	13,889	14,302	9,644	17,19	16,006	16,796	15,265
<b>kaliófilita</b>	0	15,771	14,749	0	14,378	0	0	16,067
<b>metassilicato de sódio</b>	0,098	0	0	0	0	0	0	0
<b>diopsídio</b>	6,097	0	0	23,638	0	30,743	26,9	0
<b>olivina</b>	2,931	37,7	37,806	22,805	37,5	17,07	16,013	38,196
<b>silicato de cálcio</b>	0	17,25	17,462	0	15,629	0	0	15,735
<b>ilmenita</b>	0,954	6,162	6,259	8,408	6,299	9,168	8,421	5,81
<b>apatita</b>	0,332	2,605	2,984	4,003	2,369	3,671	1,99	2,298



<b>Diopsídio</b>	3,39	3,679	3,458	3,812	3,79	3,785	4,632	4,454
<b>Hyperstênio</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Olivina</b>	6,01	5,891	5,876	6,721	6,222	6,258	5,704	6,338
<b>ilmenita</b>	0,411	0,37	0,411	0,447	0,413	0,387	0,383	0,434
<b>Hematita</b>	10,82	11,72	10,3	10,72	11,02	11,2	11,67	10,88
<b>Titanita</b>	3,399	3,474	2,545	1,09	3,962	3,097	3,887	2,618
<b>Perovskita</b>	3,502	3,364	3,974	5,078	3,141	3,66	3,109	4,027
<b>Apatita</b>	2,511	2,582	2,511	2,534	2,653	2,558	2,534	2,511
<b>Soma</b>	97,969	97,889	96,358	98,711	98,651	98,424	98,099	98,572
	<b>TRIM-04K</b>	<b>TRIM-04L</b>	<b>TRIM-04M</b>	<b>TRIM-04N</b>	<b>TRIM-04O</b>	<b>TRIM-05A</b>	<b>TRIM-05B</b>	<b>TRIM-08A</b>
	Davis	Davis	Davis	Davis	Davis	Jaseur	Jaseur	Montague
<b>Ortoclásio</b>	16,724	16,784	17,374	17,434	17,197	4,225	4,669	3,132
<b>Albita</b>	28,939	28,513	28,262	28,347	25,978	23,535	23,156	23,134
<b>Anortita</b>	22,239	21,754	21,234	21,762	22,046	7,197	8,181	8,306
<b>Leucita</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Nefelina</b>	0	0	0	0	0	6,457	6,617	5,391
<b>Kaliófilita</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Diopsídio</b>	3,396	4,39	4,867	4,586	3,524	16,288	15,532	16,27
<b>Hyperstênio</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Olivina</b>	6,276	6,027	5,593	6,225	5,628	13,717	14,957	15,555
<b>ilmenita</b>	0,411	0,421	0,379	0,415	0,368	0,368	0,372	0,377
<b>Hematita</b>	10,72	10,39	11,26	11,19	11,3	15,22	15,88	16,35
<b>Titanita</b>	1,404	2,2881	2,665	1,862	6,965	0	0	0
<b>Perovskita</b>	4,839	3,821	3,957	4,48	0,952	8,425	8,687	8,954
<b>Apatita</b>	2,605	2,605	2,463	2,511	2,534	1,397	1,469	1,421
<b>Soma</b>	98,103	97,588	98,084	98,811	96,491	96,86	99,519	98,889
	<b>TRIM-08B</b>	<b>TRIM-08C</b>						
	Montague	Montague						
<b>Ortoclásio</b>	2,955	2,778						
<b>Albita</b>	22,817	21,93						
<b>Anortita</b>	8,358	8,894						
<b>Leucita</b>	0	0						

<b>Nefelina</b>	4,875	4,76						
<b>Kaliófilita</b>	0	0						
<b>Diopsídio</b>	16,3	16,634						
<b>Hyperstênio</b>	0	0						
<b>Olivina</b>	16,052	15,996						
<b>ilmenita</b>	0,379	0,377						
<b>Hematita</b>	16,41	16,23						
<b>Titanita</b>	0	0						
<b>Perovskita</b>	8,901	8,85						
<b>Apatita</b>	1,374	1,421						
<b>Soma</b>	98,419	97,868						

Baseado no cálculo normativo da tabela 4 pode-se analisar dois grupos litológicos distintos para as amostras da ilha principal de Martin Vaz: um primeiro representado pelas amostras MVA-01, MVA-02, MVA-05A, MVA-05B, MVA-06 e MVA-08 que apresentam valores elevados de ortoclásio normativo (mínimo de 22,263 e máximo de 37,704), albita normativa (mínimo de 6,54 e máximo de 22,045) e nefelina normativa (mínimo de 19,307 e máximo de 28,715), que segundo a análise de campo e petrográfica são fonólitos (diques e domos) e outro grupo representado pelas amostras MVA-03, MVA-04, MVA-07, MVA-09, MVA-10, MVA-11, MVA-12, MVA-13 e MVA-14, representativas do derrame ultramáfico (<42% sílica) que recobre a ilhota em uma espessura de aproximadamente 4,0 metros, que apresenta valores nulos ou muito baixos para ortoclásio normativo (mínimo de 3,487 e máximo de 5,673) e albita normativa (mínimo de 4,047 e máximo de 8,092) e valores moderados de nefelina normativa (mínimo de 9,644 e máximo de 18,244). Para este derrame ultramáfico temos um litotipo definido pela porcentagem de nefelina normativa: basanitos com valores de nefelina normativa variando de 10-16% (MVA-03, MVA-04, MVA-07, MVA-09, MVA-11, MVA-12, MVA-13 e MVA-14; MVA-10: nefelina normativa 9,644). As amostras dos montes submarinos (tabela 5), em sua maioria, não apresentam nefelina normativa, mas apresentam teores consideráveis dos minerais normativos ortoclásio, albita, anortita, diopsídio, olivina, ilmenita, hematita, perovskita e apatita. As amostras, considerando apenas os seguintes minerais normativos ortoclásio, albita e anortita variam por montes e são detalhadas a seguinte indicando valores mínimos e máximos em % peso:

**TRIM\_01 (Monte Columbia)**

Or (4,078 – 5,082)

Al (8,631 – 10,493)

An (26,779 – 28,719)

**TRIM\_03 (Monte Dogressa)**

Or (13,947 – 14,361)

Al (8,324 – 8,536)

An (5,719 – 5,952)

**TRIM\_04 (Monte Davis)**

Or (17,197 – 17,434)

Al (27,416 – 28,939)

An (21,272 – 22,239)

**TRIM\_05 (Monte Jaseur)**

Or (4,225 – 4,669)

Al (23,156 – 23,535)

An (7,197 – 8,181)

**TRIM\_08 (Monte Montague)**

Or (2,778 – 4,669)

Al (21,93 – 23,134)

An (8,306 – 8,894)

Analisando conjuntamente a classificação das amostras dada pelo diagrama TAS, LE BAS et al., 1986 (figura 46) e as análises dos minerais normativos é possível classificar as amostras ultramáficas de Martin Vaz (MVA-03, MVA-04, MVA-07, MVA-09, MVA-10, MVA-11, MVA-12, MVA-13 e MVA-14), baseadas no conteúdo de nefelina normativa (>10% peso), em **basanitos** (ne-normativa >10% peso). As amostras ultramáficas (Monte Columbia - TRIM-01; Monte Dogaressa - TRIM-03; Monte Jaseur – TRIM-05 e Monte Montague – TRIM-08) e as amostras máficas (Monte Davis – TRIM-04) dos montes submarinos, segundo o diagrama TAS (figura 29) são classificadas como foiditos (TRIM-01; TRIM-03; TRIM-05 e TRIM-08) e tefritos/basanitos (TRIM-04) e apresentam teores variados dos minerais normativos comparadas entre si e com as ultramáficas de Martin Vaz e a grande maioria não apresenta nefelina normativa, tornando difícil a classificação das mesmas. Segundo Fodor et al., (2000) as amostras do Monte Columbia são classificadas como **ankaramitos**, um basanito melanocrático porfirítico, e que segundo os mesmos autores e Le Maitre (2002), definem esta rocha como aquela contendo abundantes fenocristais de piroxênio e de olivina, o que foi comprovado em todos os montes submarinos deste trabalho pela análise petrográfica, sendo desta maneira, adotada a mesma classificação para esta dissertação de mestrado.

A classificação geoquímica de magmas basálticos por meio de minerais normativos (YODER e TILLEY, 1962) e a análise dos minerais normativos nas tabelas 4 e 5 permitem inserir as amostras de Martin Vaz e dos cinco montes submarinos em um *trend* subsaturado em sílica.

### 5.3 Geoquímica Multielementar

Uma tabela de dados geoquímicos por si só não nos diz nada quanto aos processos geoquímicos, mas uma vez que os elementos químicos sejam analisados em conjunto é possível determinar processos geológicos. Um exemplo de avaliação de dados são os diagramas bivariantes onde duas variáveis selecionadas são plotadas, exprimindo uma correlação (seja ela positiva ou negativa) entre cada um dos elementos maiores ou traços e a  $\text{SiO}_2$  ou  $\text{MgO}$  (índices de diferenciação). Os diagramas bivariantes que utilizam a  $\text{SiO}_2$  como índice de diferenciação recebem o nome de *diagramas de Harker*. Comumente são utilizados diagramas de variação para elementos maiores que indicam processos de cristalização fracionada e fusão parcial, e diagramas de variação para elementos-traços, que refletem as características da fonte geradora do magma primário. Os *trends* gerados nestes diagramas permitem identificar mecanismos de diferenciação magmática tais como cristalização fracionada, misturas de magmas e AFC (assimilação e cristalização fracionada) sendo este melhor entendido quando as razões e variações isotópicas são estudadas.

Através da análise dos óxidos  $\text{SiO}_2$  e  $\text{MgO}$  é possível distinguir dois grupos de rochas para Martin Vaz: um ultramáfico magnesiano (<42%  $\text{SiO}_2$  e >7%  $\text{MgO}$ ) e um básico (>45%  $\text{SiO}_2$ ) e, para os montes submarinos, dois grupos: um ultramáfico magnesiano (>9%  $\text{MgO}$  <42%  $\text{SiO}_2$ ) e um básico (>45%  $\text{SiO}_2$  e com valores de  $\text{MgO}$  em torno de 4%). Nos diagramas de variação foi utilizado o  $\text{MgO}$  como índice de diferenciação uma vez que estão sendo analisadas rochas ultramáficas a máficas. A amostra TRIM-01D apresenta soma total dos óxidos de 97,62% peso, fora do limite (98% peso a 101% peso) estipulado satisfatório para análise geoquímica. A amostra TRIM-01D (Monte Columbia) foi descartada.

A análise dos diagramas bivariantes para elementos maiores, tendo o  $\text{MgO}$  (figura 30) como índice de diferenciação, indica que as amostras da ilha principal de Martin Vaz e dos cinco montes submarinos definem *trends* lineares com inflexão em torno de 7% peso de  $\text{MgO}$  indicando mudança de fase fracionante ou variação na intensidade de fracionamento de um ou mais fases e não apresentam *gaps* composicionais significativos.

É possível observar que as amostras de Martin Vaz (anexo C) apresentam maiores teores em %peso de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$  e menores teores em %peso de  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FeO}^T$ ,  $\text{MgO}$  e  $\text{CaO}$ , enquanto as amostras dos montes submarinos apresentam o inverso, com exceção do  $\text{MnO}$  que é baixo para os dois litotipos (anexo D). Essas concentrações refletem a química de seus magmas félsicos e máficos/ultramáficos, respectivamente.

Os basanitos de Martin Vaz e os ankaramitos magnesianos (>7%peso  $\text{MgO}$ ) dos montes submarinos (TRIM-01; TRIM-03; TRIM-05 e TRIM-08) apresentam altas razões  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,82-1,54) comparados com os basanitos históricos ( $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,35-0,76) presentes no Complexo Vulcânico Teide-Pico Viejo das Ilhas Canárias (Abley et al. 1998). Além disso, as amostras TRIM-04 (Monte Columbia) apresentam razões  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,55-0,56) similares com estes basanitos históricos supracitados e altos teores de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$  e baixos teores de  $\text{FeO}^T$  comparados com os basanitos magnesianos das demais amostras dos montes submarinos, fato evidenciado pela presença de fenocristais de feldspato na análise petrográfica do monte Colúmbia.

A análise dos diagramas de variação de elementos maiores (figura 47) evidenciam uma correlação negativa para os óxidos  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$  e uma correlação positiva para os óxidos  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$  e  $\text{FeO}^T$ . Os elementos traços (figura 49) apresentam quebra de *trend* passando de correlação positiva para negativa (Y, Cr, Ni, Mg) e por vezes de negativa para positiva (Ba, Zr, Rb).

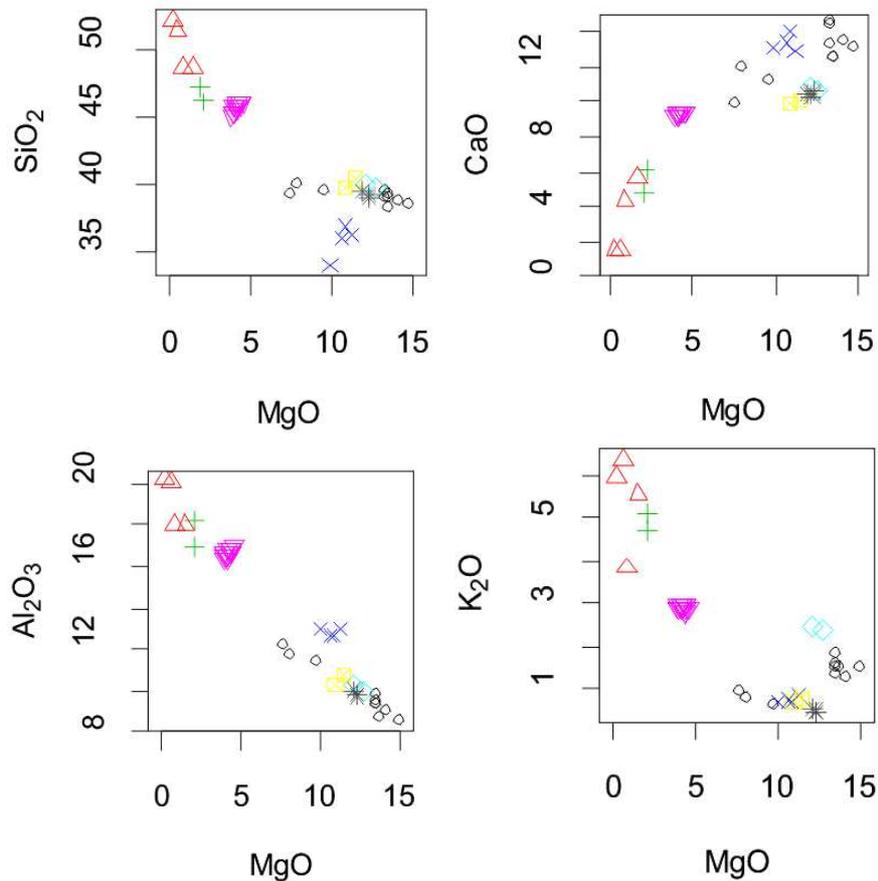
Essas características sugerem que a assembléia fracionante para estes líquidos pode corresponder a plagioclásio, feldspatóides (nefelina e analcima), piroxênios, titanita e opacos (ilmenita/magnetita). O feldspato alcalino possivelmente constitui a fase mineral principal que cristaliza ao longo da evolução do magma.

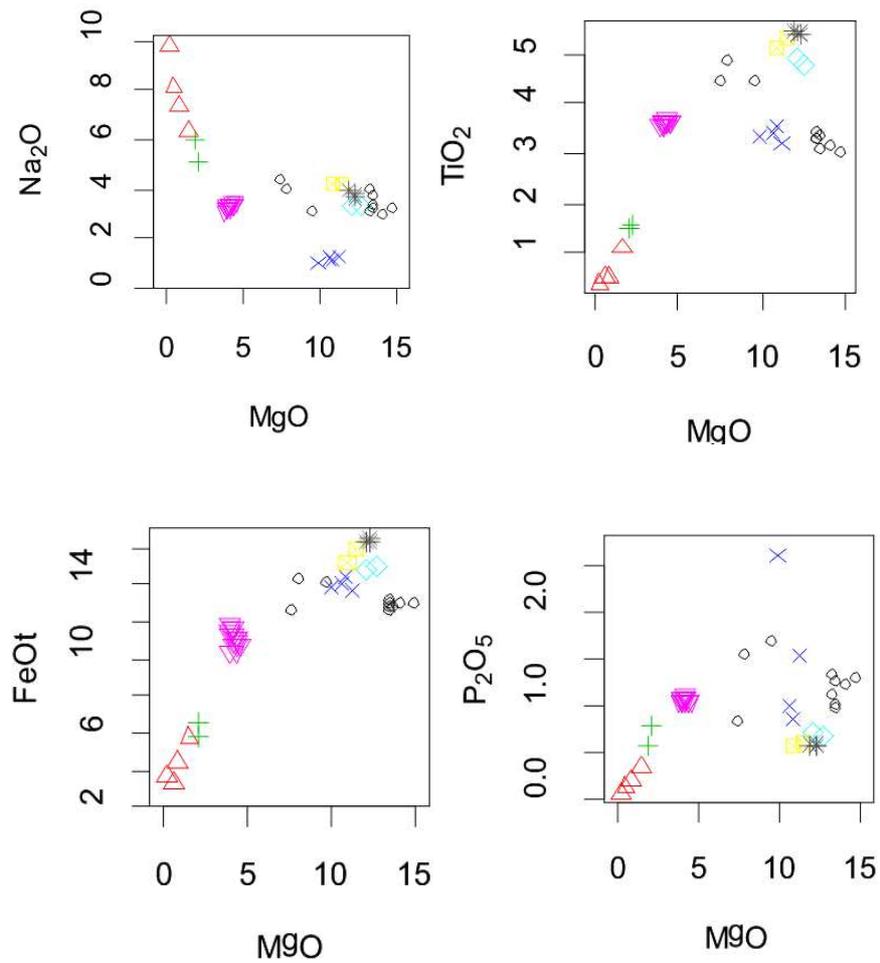
As razões Nb/U (figura 51) para os basanitos de Martin Vaz variam de 25,94-46,67 enquanto os ankaramitos (basanitos melanocráticos porfiríticos) apresentam valores pouco mais elevados, variando de 33,48-85,71. Os fonólitos de Martin Vaz apresentam as seguintes razões: diques – 17,10 (MVA-05A) e 56,21 (MVA-05B) e domos – 11,92-30,37 refletindo maior concentração de LILE nos fonólitos e basanitos e maior concentração de HFSE nos ankaramitos dos montes submarinos. As razões Ce/Pb (figura 52) para os basanitos de Martin Vaz variam de 19,18-35,67 e para os fonólitos: diques – 11,50 (MVA-05A) e 14,79 (MVA-

05B) e domos – 4,77 e 6,33. A figura 52 mostra que as concentrações de Pb devem ser trabalhadas com cuidado.

Diferentes fases minerais cristalizadas produzirão respostas diferentes nos diagramas bivariantes uma vez que a razão  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  em plagioclásio é baixa (0,07 em albita com veio de quartzo e titanita em fratura em anfibolito (teores baseados em Deer, Howie & Zussman, 1965) e são relativamente mais altas em clinopiroxênios nos basanitos. Na figura 48 é possível observar que razões mais altas de  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  estão associadas a % peso de MgO mais altos referentes as amostras menos evoluídas (basanitos/ankaramitos) e seguem um *trend* linear indicando possível proveniência de um único magma parental.

## Elementos Maiores

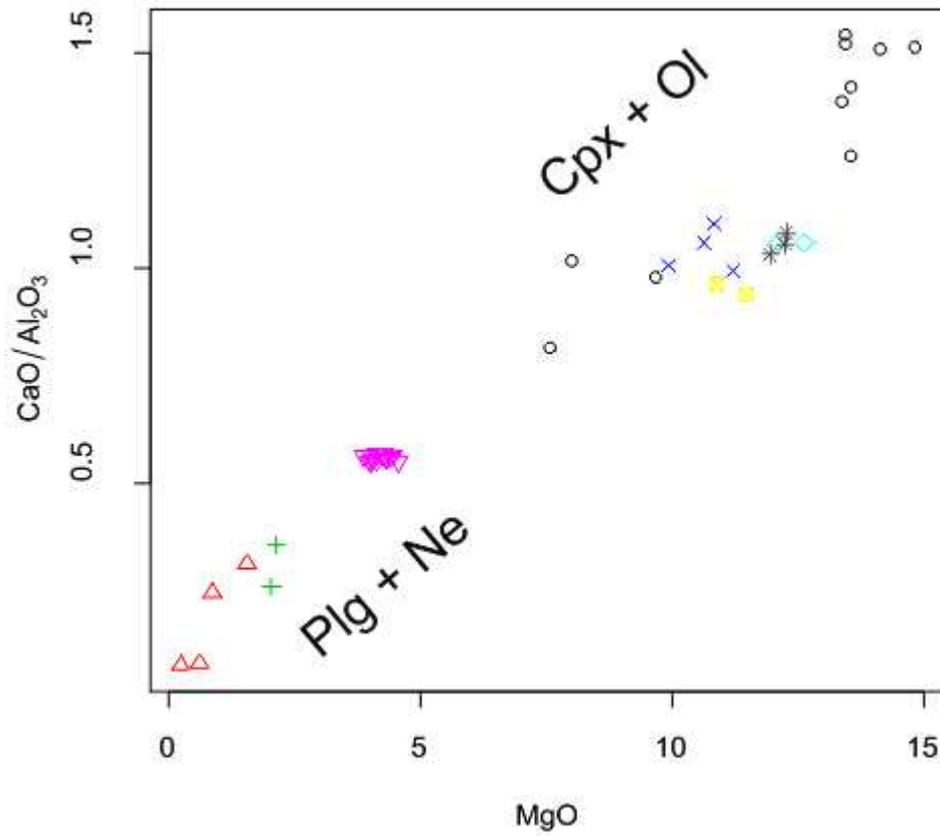




### Legenda

- *Martin Vaz - basanitos*
- + *Martin Vaz - fonólitos (diques)*
- △ *Martin Vaz - fonólitos (intrusões)*
- × *Columbia*
- ◇ *Degaressa*
- ▽ *Davis*
- ⊠ *Jaseur*
- \* *Montague*

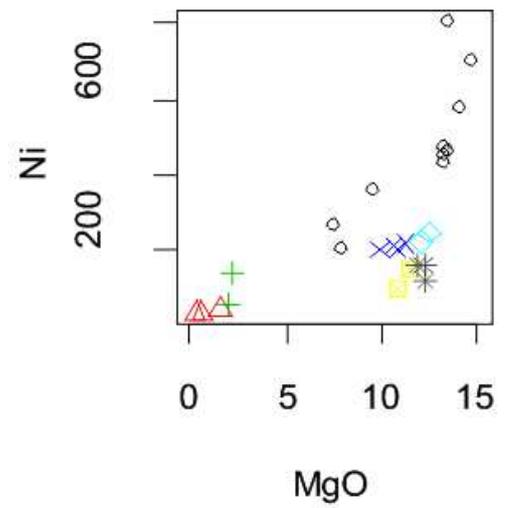
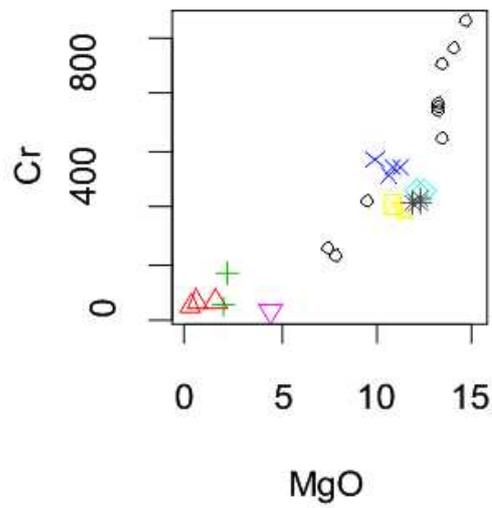
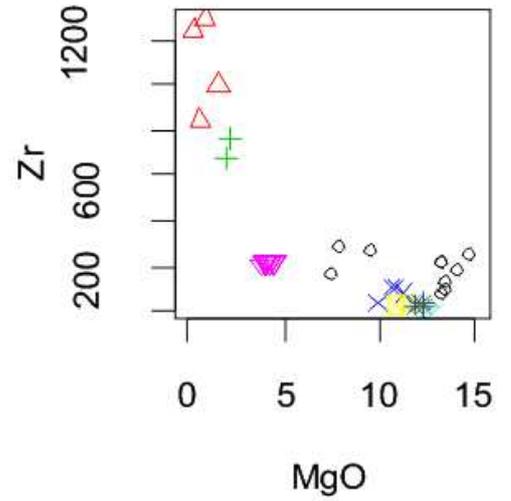
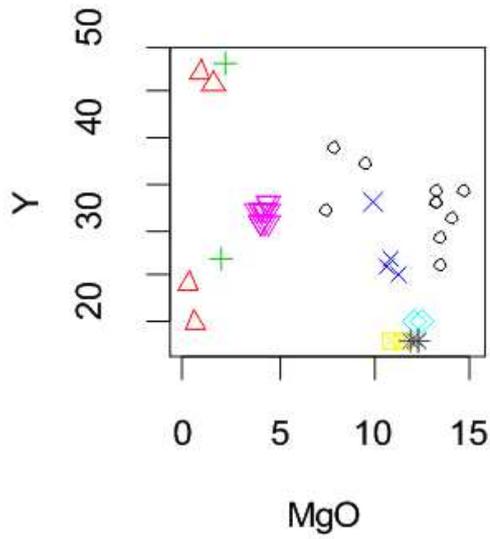
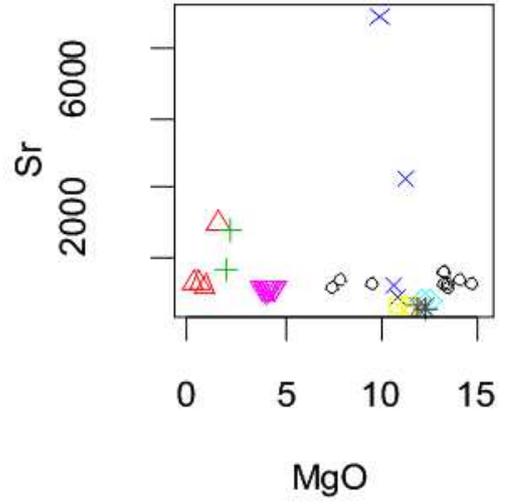
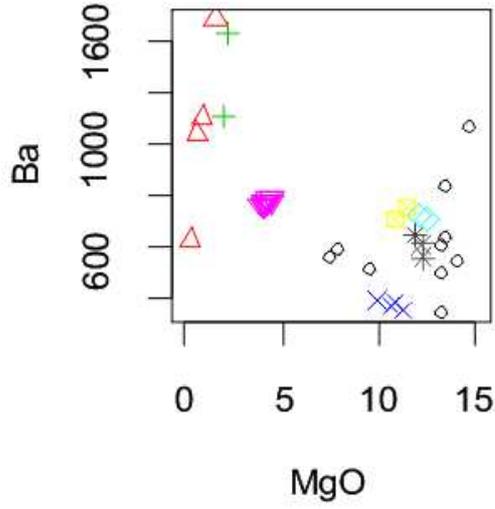
Figura 48 - Diagramas de variação para óxidos maiores com a MgO como índice de diferenciação. Todos os valores estão expressos em % peso.

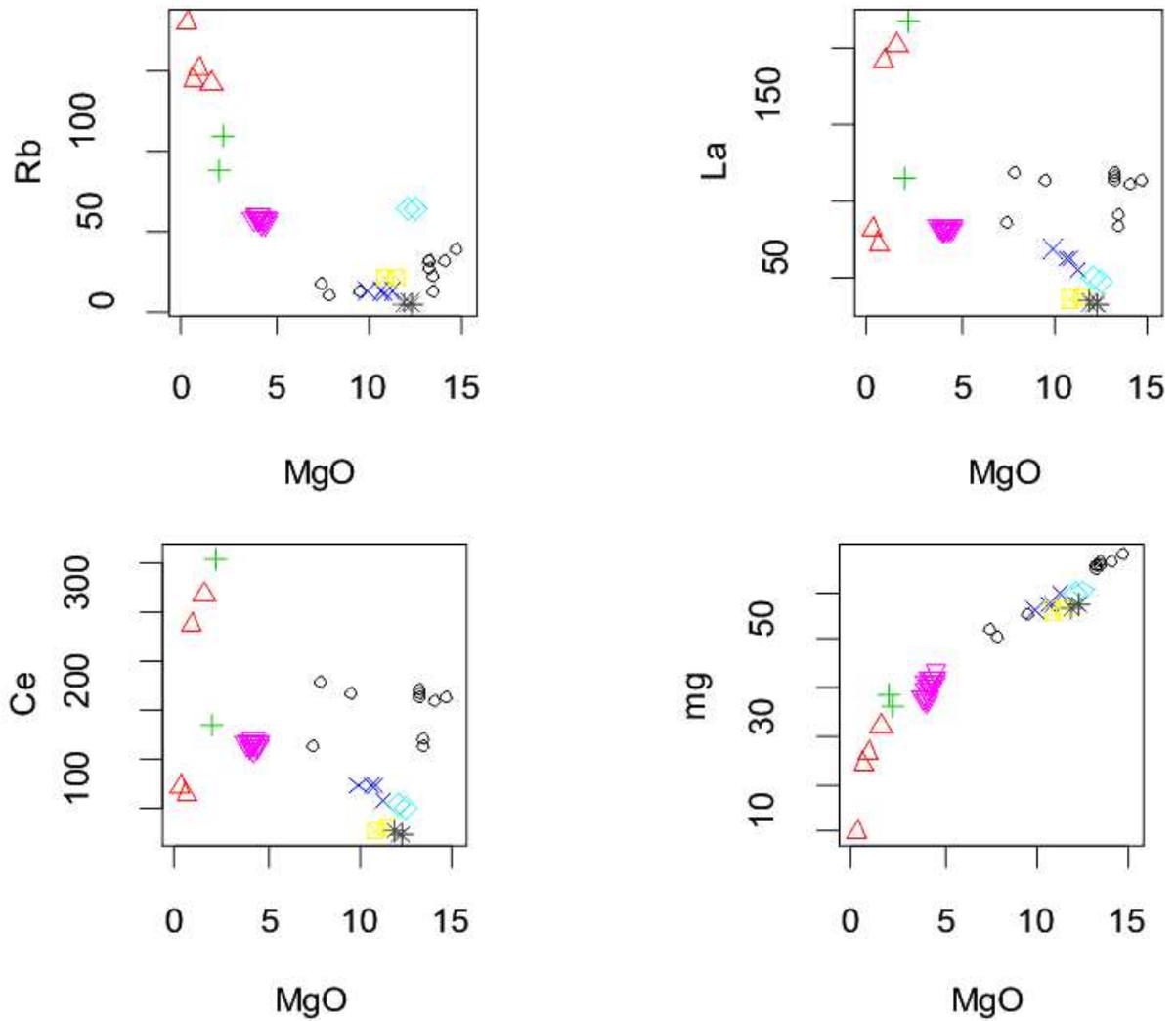


### Legenda

- *Martin Vaz - basanitos*
- + *Martin Vaz - fonólitos (diques)*
- △ *Martin Vaz - fonólitos (intrusões)*
- × *Columbia*
- ◇ *Dogaressa*
- ▽ *Davis*
- ⊠ *Jaseur*
- \* *Montague*

Figura 49 – Diagrama de variação MgO versus CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> apresentando *trend* contínuo sem variação nos termos mais evoluídos indicando um mesmo magma parental.



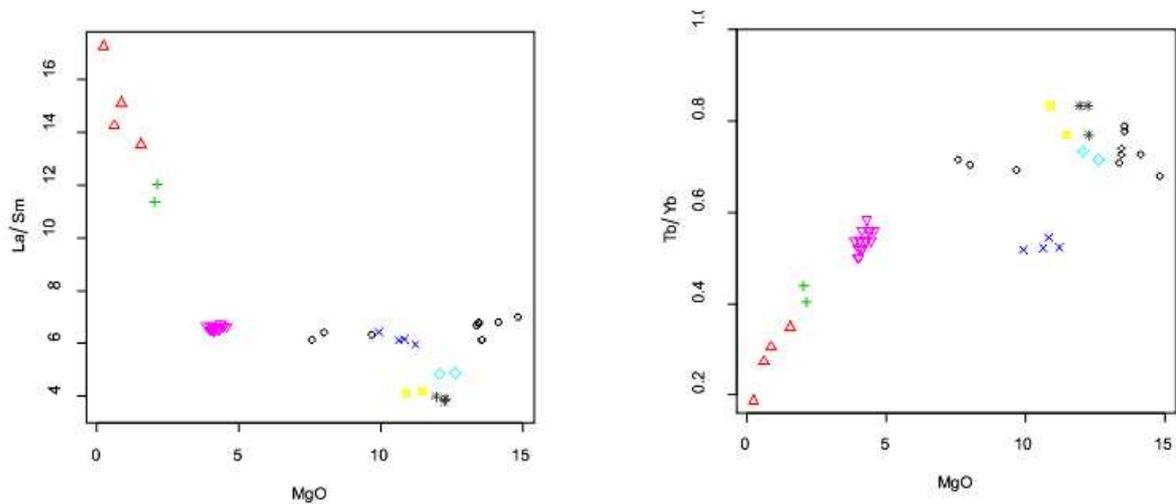


### Legenda

- *Martin Vaz - basanitos*
- + *Martin Vaz - fonólitos (diques)*
- △ *Martin Vaz - fonólitos (intrusões)*
- × *Columbia*
- ◇ *Dogaressa*
- ▽ *Davis*
- ⊠ *Jaseur*
- \* *Montague*

Figura 50 - Diagramas de variação para elementos-traços com a SiO<sub>2</sub> como índice de diferenciação. Os valores de SiO<sub>2</sub> são expressos em %peso, e os conteúdos dos elementos-traços são expressos em partes por milhão (ppm).

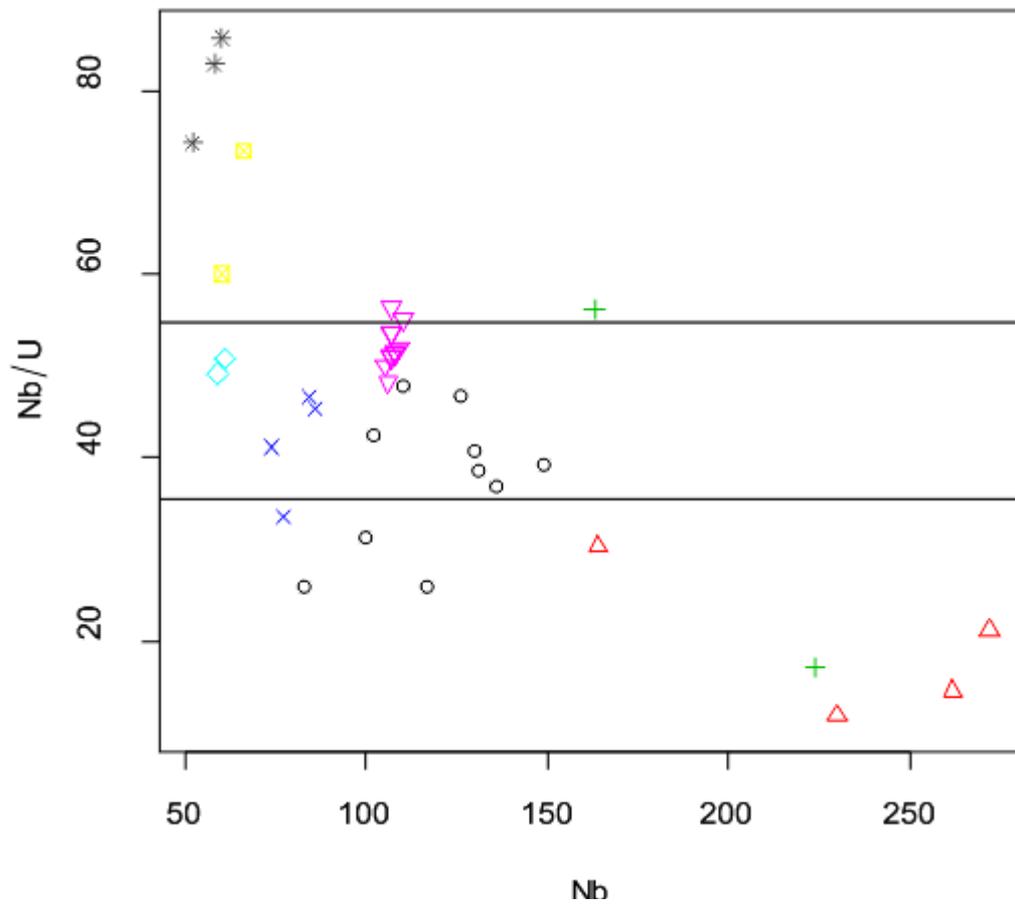
Na **figura 50** encontram-se plotados as razões de elementos traços (La/Sm e Tb/Yb) *versus* MgO. No diagrama La/Sm *versus* MgO é possível notar uma inflexão em torno de 5% peso MgO e razões maiores destes incompatíveis nos diques e necks fonolíticos indicando provável controle da titanita. No diagrama Tb/Yb *versus* MgO é possível notar uma inflexão em torno de 6% peso MgO e razões maiores destes incompatíveis nas amostras dos montes submarinos indicando provável controle do fracionamento de clinopiroxênio.



## Legenda

- *Martin Vaz - basanitos*
- + *Martin Vaz - fonólitos (diques)*
- △ *Martin Vaz - fonólitos (intrusões)*
- × *Columbia*
- ◇ *Dogaressa*
- ▽ *Davis*
- ⊠ *Jaseur*
- \* *Montague*

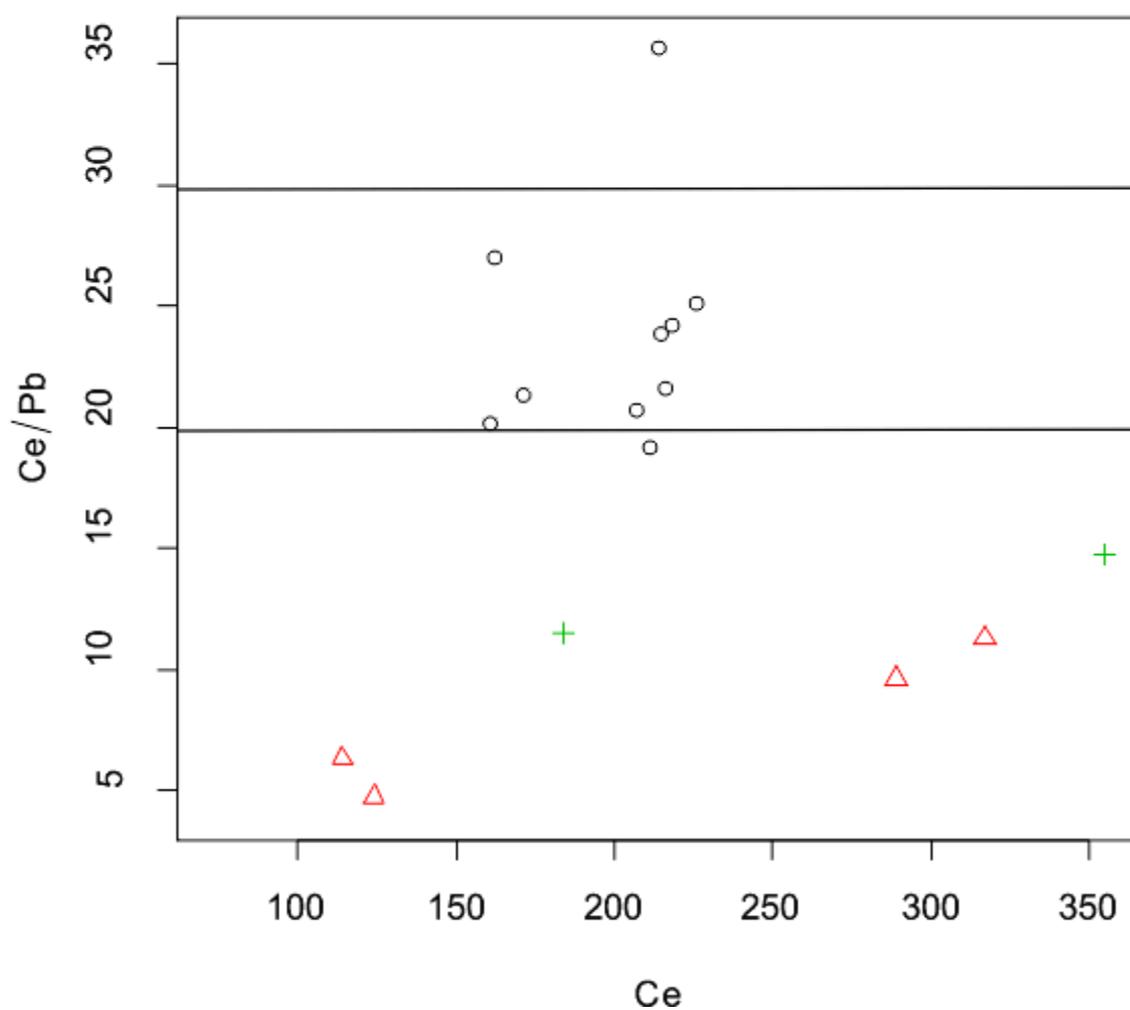
Figura 51 – Razões de elementos traços MgO *versus* La/Sm e MgO *versus* Tb/Yb.



### Legenda

- *Martin Vaz - basanitos*
- + *Martin Vaz - fonólitos (diques)*
- △ *Martin Vaz - fonólitos (intrusões)*
- × *Columbia*
- ◇ *Dogareessa*
- ▽ *Davis*
- ⊠ *Jaseur*
- \* *Montague*

Figura 52 - Diagrama Nb versus Nb/U para rochas de Martin Vaz e dos montes submarinos.

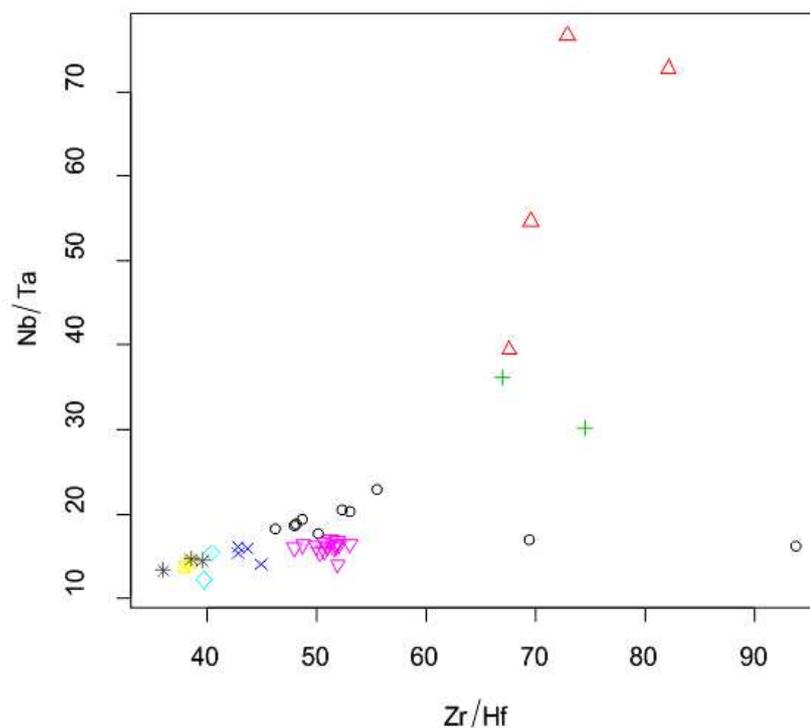


### Legenda

- *Martin Vaz - basanitos*
- + *Martin Vaz - fonólitos (diques)*
- △ *Martin Vaz - fonólitos (intrusões)*

Figura 53 – Diagrama Ce *versus* Ce/Pb para rochas de Martin Vaz e dos montes submarinos.

A razão Nb/Ta nos dois maiores reservatórios silicáticos (Manto e a crosta), apresentam valores subcondríticos ( $<20$ ). Tanto a razão Nb/Ta quanto a Zr/Hf são maiores na litosfera subcontinental do que na crosta e no manto superior e inferior. OIB's apresentam um valor médio de Nb/Ta de  $15,8 \pm 0,6$  (PFÄNDER et al., 2002), sendo as rochas de Martin Vaz e dos montes submarinos um pouco mais enriquecidos nesses elementos (figura 53) e algumas delas com razões muito mais altas.

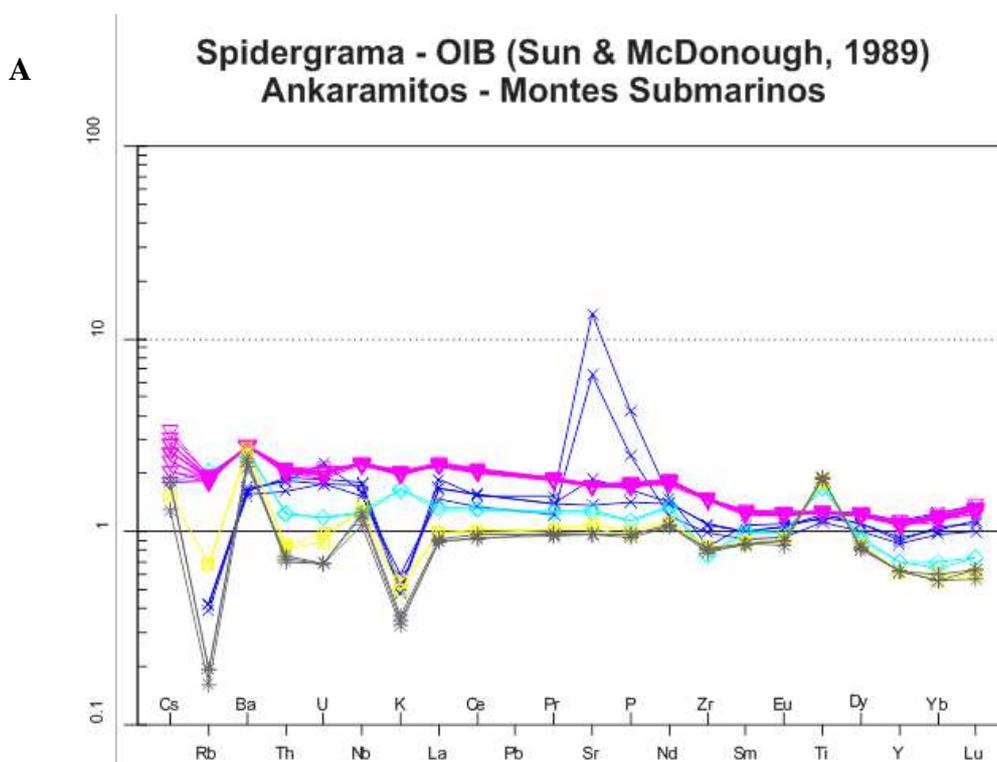


### Legenda

- *Martin Vaz - basanitos*
- + *Martin Vaz - fonólitos (diques)*
- △ *Martin Vaz - fonólitos (intrusões)*
- × *Columbia*
- ◇ *Degaressa*
- ▽ *Davis*
- ⊠ *Jaseur*
- \* *Montague*

Figura 53 – Razão Zr/Hf versus Nb/Ta para as rochas de Martin Vaz e dos montes submarinos.

Nos diagramas multielementares normalizados para OIB de Sun e McDonough (1989) (Figuras 54), os ankaramitos (figura 54a) (montes submarinos) e os basanitos (figura 54b) de Martin Vaz apresentam padrões relativamente similares. De maneira geral são observadas anomalias negativas de Rb e K. Estas características podem estar relacionadas ao fracionamento de minerais como feldspatos (plagioclásio, sanidina) e/ou feldspatoides (nefelina). A figura 54c mostra anomalias negativas de P e Ti para os fonólitos de Martin Vaz podendo refletir assinatura da fonte ou fracionamento de titanita e apatita. Comparando com os basanitos de Martin Vaz, os fonólitos apresentam anomalia negativa de Ti, fato também observado por Siebel et al., (2000) nos trabalhos realizados nas amostras de Trindade e Martin Vaz.



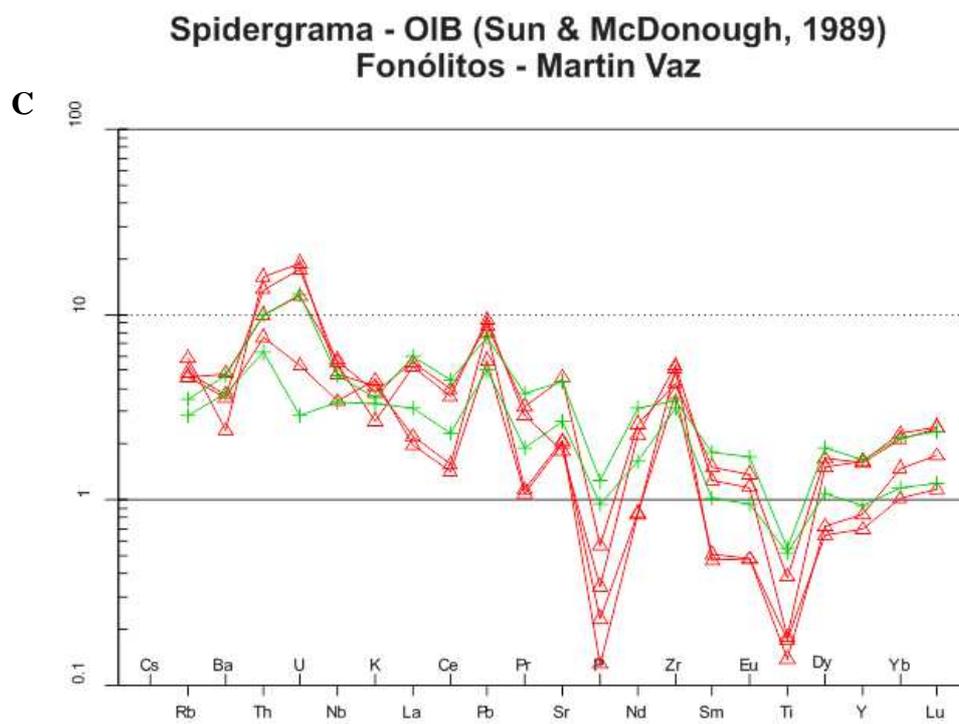
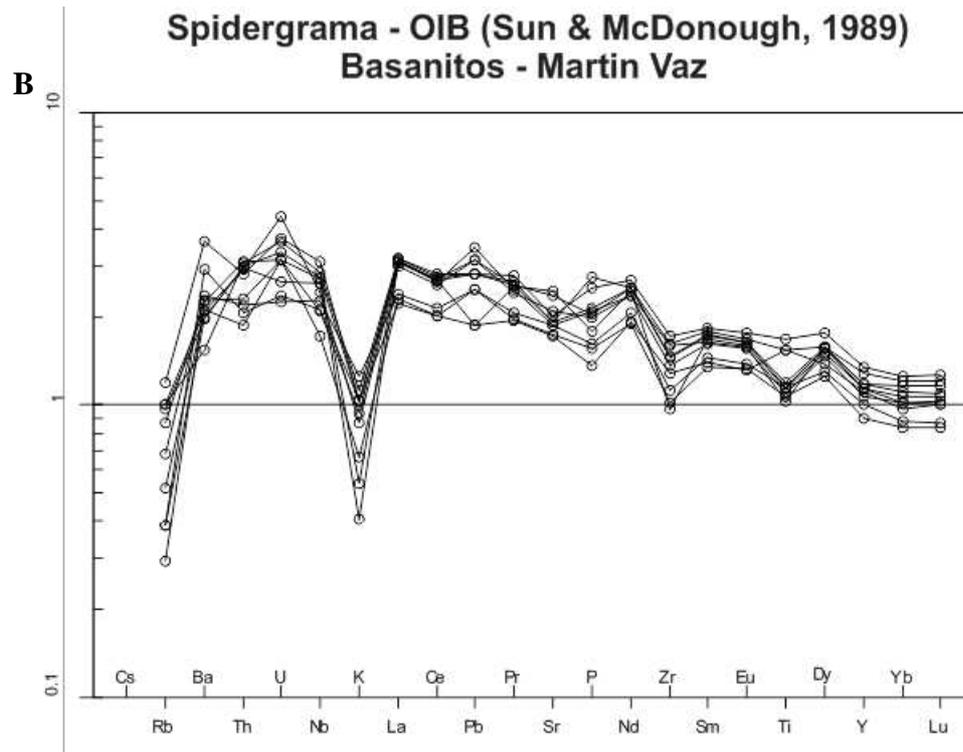


Figura 55 – Diagrama multielementar a) ankaramitos – Montes Submarinos; b) basanitos – Martin Vaz; c) fonólitos – Martin Vaz.

As amostras de Martin Vaz e dos cinco montes submarinos apresentam conteúdos de ETR que variam entre 8,07 e 654,84 vezes o condrito (Figura 55) e enriquecimento fraco de ETRL  $[(La/Yb)_N = 2,64 \text{ a } 5,38]$  além de ausência de anomalia negativa de Eu. A maioria das amostras apresentam-se igualmente fracionadas em ETRL, com exceção dos diques e necks fonolíticos. Nos necks fonolíticos de Martin Vaz é possível observar uma leve tendência em enriquecimento em elementos terras-raras pesados. Apresentam razão Ce/Y (figura 56) alta assim como as amostras potássicas da província alcalina Alto Paranaíba (SIEBEL et al., 2000). Estas rochas apresentam valores de  $K_2O/Na_2O > 1$ , diferente das amostras de Martin Vaz e dos Montes Submarinos ( $K_2O/Na_2O < 1$ ).

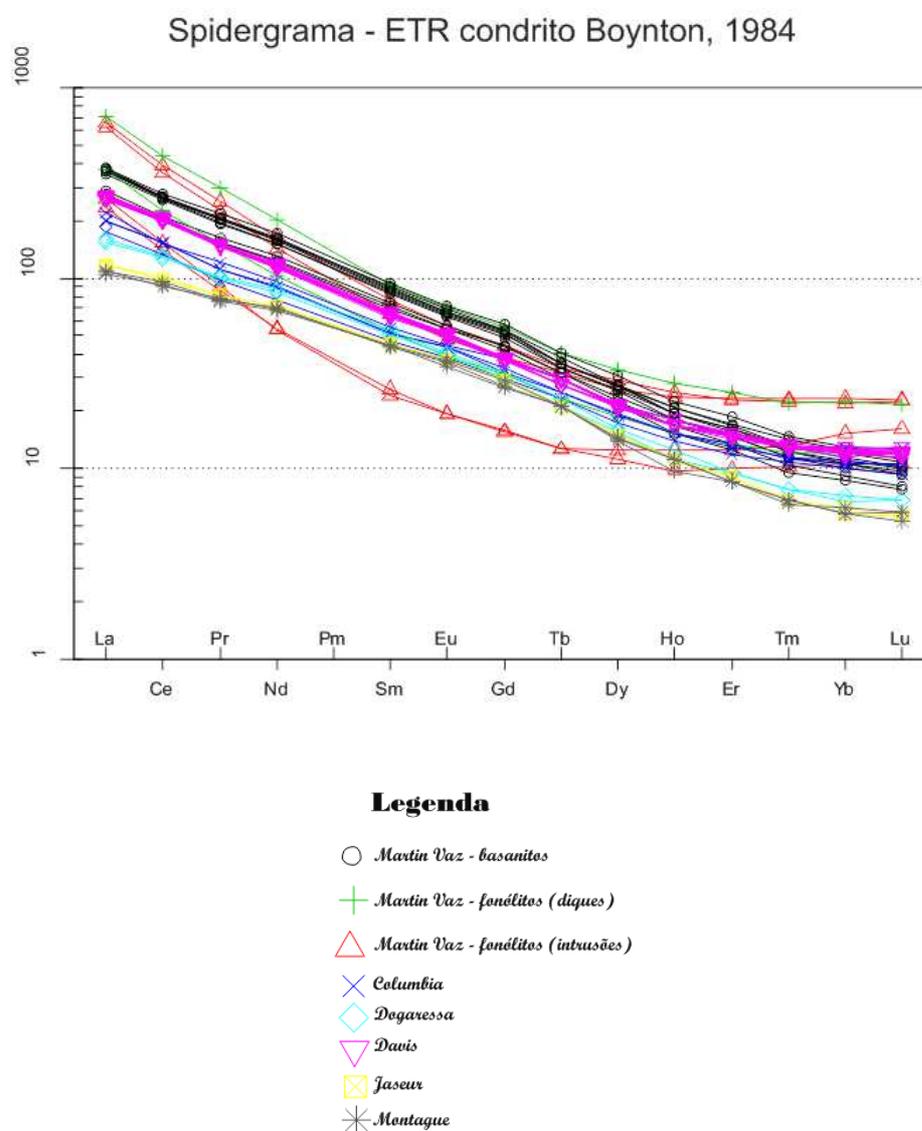


Figura 56 - Valores normalizados para o condrito (Boynton, 1984).

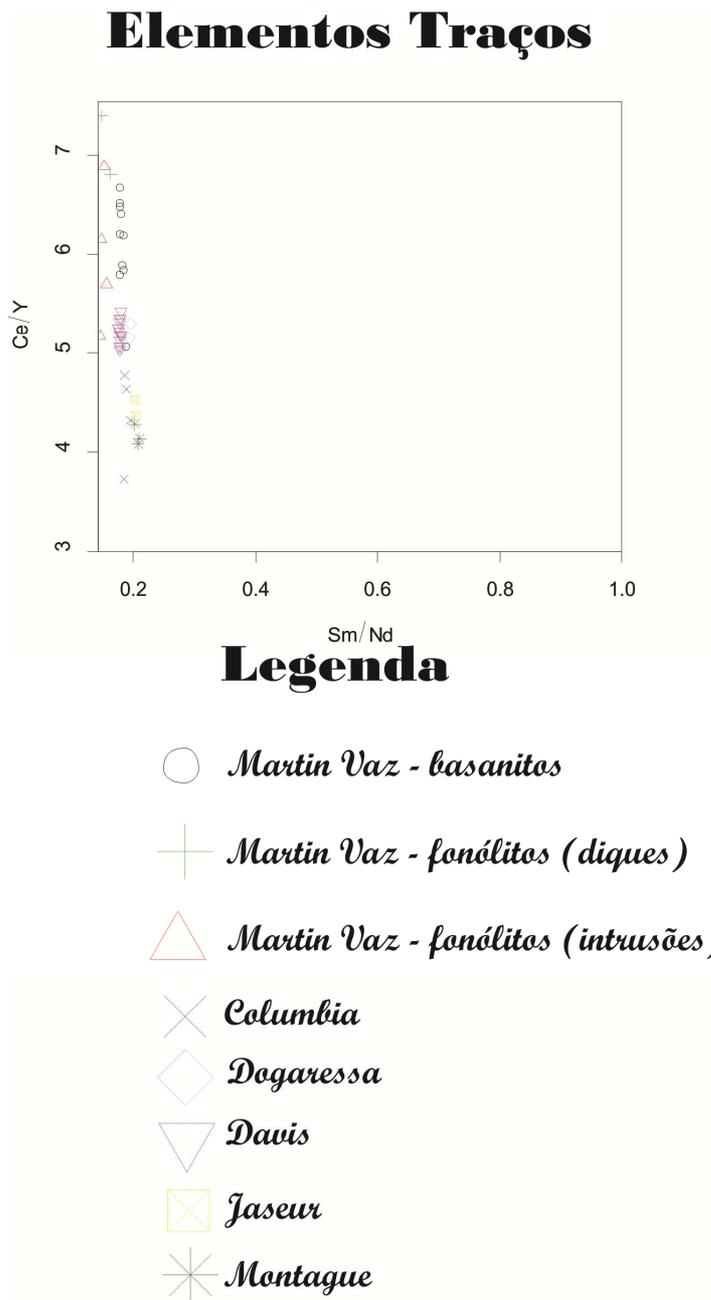


Figura 57 - Razão Ce/Y versus Sm/Nd para as amostras da cadeia Vitória-Trindade.