



**DADOS PETROLÓGICOS DOS DIABÁSIOS DOS SETORES CENTRO-NORTE E NORDESTE DO ENXAME DE DIQUES DA SERRA DO MAR**

A. Corval<sup>1,3,\*</sup>, S.C. Valente<sup>2\*\*,3</sup>, B.P. Duarte<sup>3\*\*\*\*</sup>, N. Famelli<sup>3\*\*\*\*\*</sup>, M. Zanon<sup>2\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia e Ciências Exatas - CEUNES-UFES. Rua Humberto de Almeida Francklin, 257 – Bairro Universitário, CEP: 29.933-415, São Mateus, ES (Sede Provisória), Brasil  
Correspondência: A. Corval; Rua Francisco Mota, n° 65,  
CEP 23013-630, Campo Grande, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

<sup>2</sup> Departamento de Geociências, UFRuralRJ, Seropédica. BR 465, km 7,  
CEP: 23890-000, Seropédica, RJ, Brasil

<sup>3</sup> Programa de Pós-graduação, FGEL/UERJ, Campus do Maracanã. Rua São Francisco Xavier, 524  
– Maracanã, CEP 20550-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

E-mail: \*arturcorval@ceunes.ufes.br; \*\*sergio@ufrj.br; \*\*\*marcelazonon87@gmail.com;  
\*\*\*\*biapasch@uerj.br; \*\*\*\*\*natfamelli@yahoo.com.br

Recebido em 02/08, aceito para publicação em 11/08

**ABSTRACT**

*This paper presents field, petrography and litogeochemical data on dolerites that outcrop within the middle-west and northeast portions of the Serra do Mar Dyke Swarm. In general, the tholeiitic basalts in the studied area are essentially composed of plagioclase and two clinopyroxenes. Accessory minerals are quartz, opaque minerals and apatite. Uralite and biotite over clinopyroxene as well as saussurite over plagioclase grains occur as alteration products. The dolerites are included in a transitional tholeiitic series that can be divided into low- and high-TiO<sub>2</sub> suites. Parental compositions of the low- and high-TiO<sub>2</sub> suites show La/Yb<sub>(N)</sub> and La/Nb<sub>(N)</sub> ratios greater than unity suggesting at least a contribution from the sub-continental lithospheric mantle in their generation.*

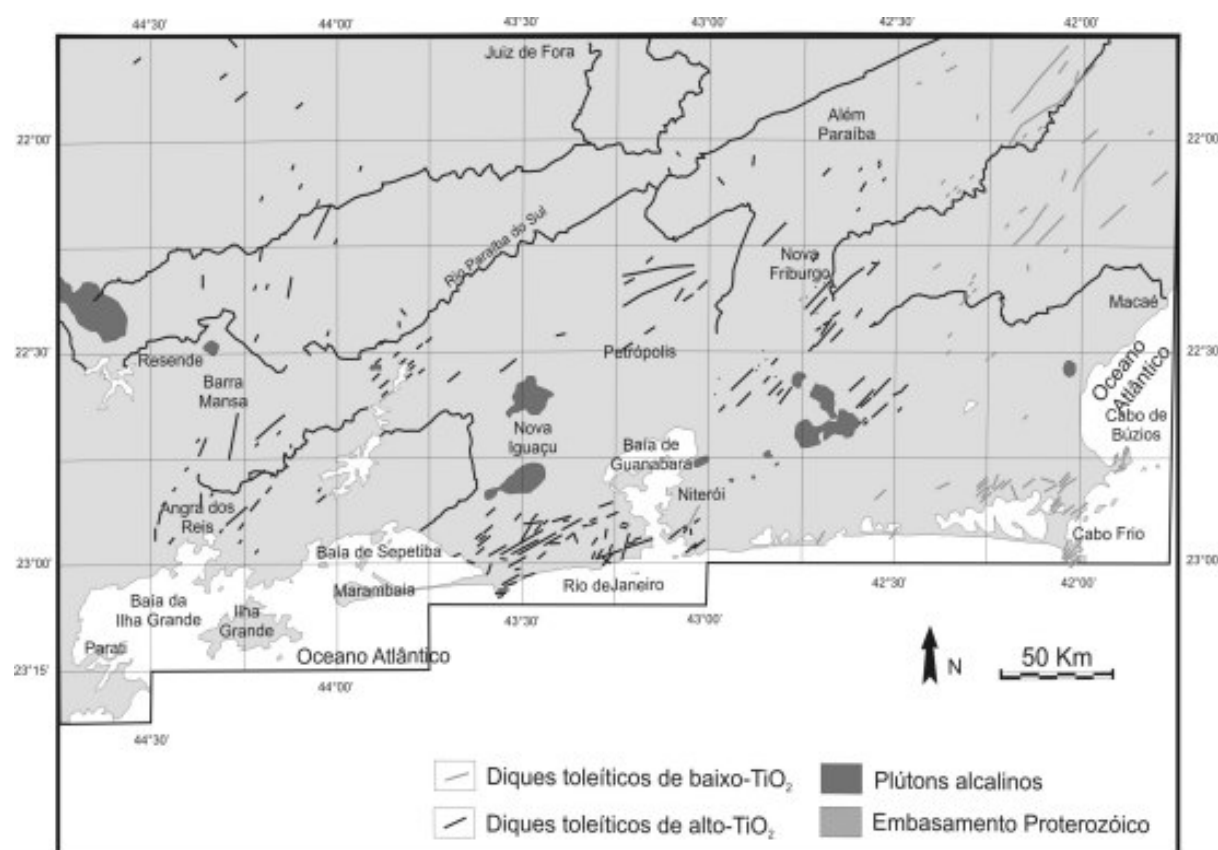
**RESUMO**

Este trabalho apresenta dados de campo, petrográficos e litogeoquímicos dos basaltos que afloram nas porções centro-oeste e nordeste do Enxame de Diques da Serra do Mar. As rochas da área de estudo são compostas essencialmente por plagioclásio e dois clinopiroxênios. Minerais acessórios incluem quartzo, minerais opacos e apatita. Minerais secundários comuns são a biotita e a uralita, bem como a saussurita sobre grãos de plagioclásio. Estes basaltos incluem-se numa série transicional de afinidade toleítica com duas suítes: baixo-TiO<sub>2</sub> e alto-TiO<sub>2</sub>. Líquidos parentais das suítes de baixo-TiO<sub>2</sub> e alto-TiO<sub>2</sub> apresentam razões La/Yb<sub>(N)</sub> e La/Nb<sub>(N)</sub> maiores que a unidade. Estes dados sugerem pelo menos uma contribuição do manto litosférico subcontinental na geração dos basaltos de ambas as suítes.

## INTRODUÇÃO

O Enxame de Diques da Serra do Mar ocorre ao longo da região costeira dos Estados de São Paulo, Rio de Janeiro e uma parte do Estado do Espírito Santo (Figura 1). Os diabásios intrudem, principalmente, gnaisses e granitóides do Orógeno Ribeira de idade Neoproterozóico/Cambro-Ordoviciano (Heilbron *et al.*, 2004; Schmitt *et al.*, 2004). Esses diques estão associados à fragmentação do Gondwana no Cretáceo Inferior (c.a. 132 Ma; Turner *et al.*, 1994), muito embora, mais recentemente, idades mais antigas (193-161 Ma) tenham sido publicadas (Guedes *et al.*, 2005). Valente (1997), Corval (2005) e Dutra (2006) têm mostrado que o enxame

é constituído por diques de basaltos transicionais com afinidade toleítica. Estudos litogeoquímicos mostram que o enxame compreende essencialmente uma suíte de alto-TiO<sub>2</sub> (Valente *et al.*, 1998), localizada na porção centro-norte. Subordinadamente, duas suítes de baixo-TiO<sub>2</sub> (Monteiro & Valente, 2003; Dutra, 2006) ocorrem no enxame. Essas duas suítes foram discriminadas em base geoquímica (Monteiro & Valente, *op. cit.*). Uma delas, denominada suíte Costa Azul (Dutra, *op. cit.*), aflora predominantemente na região de Búzios e Cabo Frio, enquanto a outra, chamada de suíte Serrana, aflora na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro (Monteiro & Valente, *op.cit.*; Corval, 2005).



**Figura 1:** Mapa do Enxame de Diques da Serra do Mar (Modificado de Valente *et. al.*, 2005a).

Este trabalho apresenta dados preliminares de campo, petrográficos e litogeoquímicos dos diabásios que afloram em dois setores ainda pouco estudados dentro do referido enxame. Um dos setores corresponde às regiões

de Sapucaia, Além Paraíba, Cantagalo, Valença, Paraíba do Sul, Três Rios, Anta, Duas Barras e Cordeiro, limitadas pelas coordenadas 43°45' W - 42°15' W e 21°45' S - 22°15' S (porção centro-norte do enxame). A outra área estudada

corresponde às regiões de Santa Maria Madalena, Renascença, Casimiro de Abreu, Conceição de Macabu e Trajano de Moraes, limitadas pelas coordenadas 42° 15' W - 41° 45' W e 21° 45' S - 22° 30' S (porção nordeste do enxame). O objetivo deste trabalho é a apresentação de dados petrológicos preliminares associados ao Enxame de Diques da Serra do Mar que poderão contribuir para o refinamento dos modelos geodinâmicos que têm sido propostos para o magmatismo máfico do Cretáceo na porção centro-sul da Placa Sul-Americana (p.ex.: Turner *et al.*, 1994; Marques & Ernesto, 2004; Valente *et al.*, 2007).

### **MATERIAIS E MÉTODOS**

O trabalho de campo foi realizado com base em quatorze folhas topográficas, na escala de 1:50.000, correspondendo às coordenadas 43° 45' W - 42° 15' W e 21° 45' S - 22° 15' S (porção centro-norte do enxame) e 42° 15' W - 41° 45' W e 21° 45' S - 22° 30' S (porção nordeste do enxame). Foram visitados vinte e oito afloramentos de diabásios, tendo os mesmos sido locados nos referidos mapas topográficos, suas localizações registradas com GPS (*datum WGS84*, coordenadas UTM), descritos detalhadamente, fotografados e amostrados. Amostras das margens resfriadas e das partes centrais dos diques foram coletadas sempre que possível. As amostras foram, então, laminadas no Laboratório de Preparação de Amostras do Departamento de Geociências da UFRuralRJ para o estudo petrográfico sob microscópio de luz transmitida no Laboratório de Microscopia da mesma instituição. As amostras foram, posteriormente, selecionadas para as análises litogeoquímicas, tendo sido britadas, lavadas sob água destilada, secas, reduzidas ao pó em moinho de bolas de carbeto de tungstênio e secas novamente, no Laboratório Geológico de

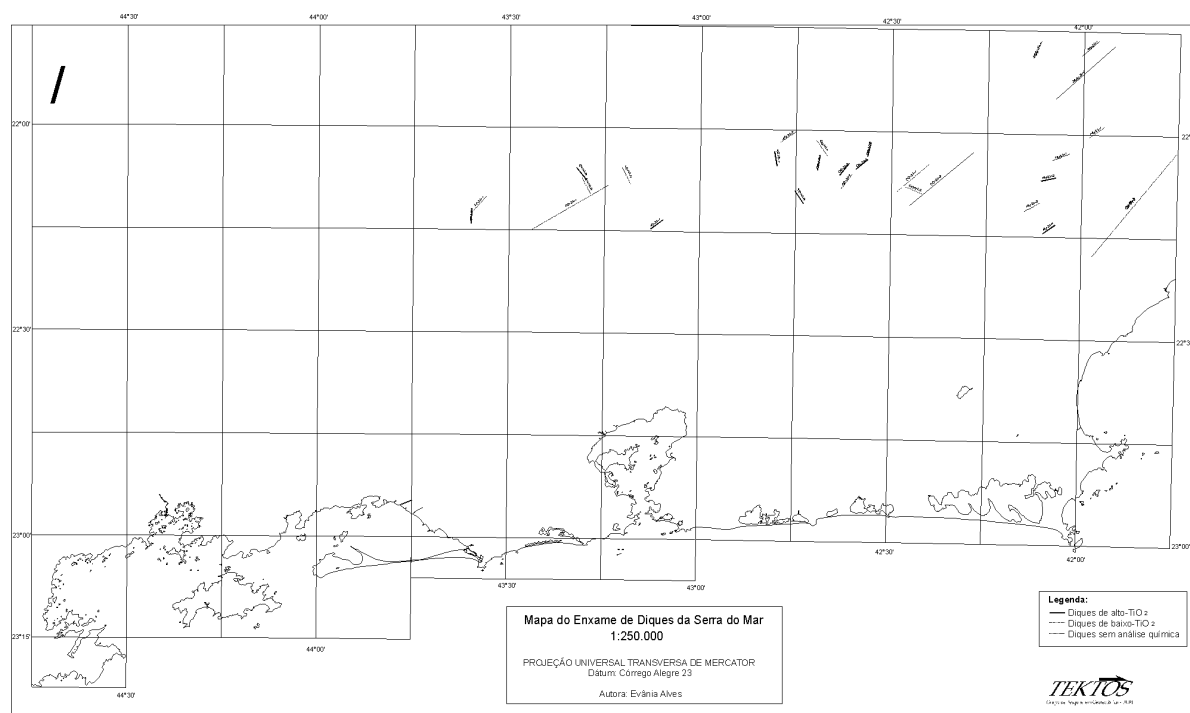
Preparação de Amostras da Faculdade de Geologia da UERJ. As análises litogeoquímicas (elementos maiores, elementos-traço, incluindo elementos terras-raras) foram realizadas no ACTLABS, no Canadá, pelo método ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma-mass Spectrometry*) após fusão total da amostra. Os limites de detecção foram 0,01% peso para os óxidos (à exceção do TiO<sub>2</sub> e MnO; 0,001% peso), menores que 3 ppm para os elementos-traço (à exceção de Ni e Cr; 20 ppm) e menores que valores condriticos para os elementos terras-raras. Valores de exatidão variaram entre 0,3% e 15% para os óxidos, entre 3% e 7% para os elementos-traço, entre 0,5% e 2% para os elementos terras-raras leves e entre 1% e 11% para os elementos terras-raras pesados. Valores de precisão variaram entre 1% e 7% para os óxidos e entre 0,1% e 5% para os elementos-traço. Os brancos foram menores que 2 ppm para os elementos-traço, à exceção de Ni e Cr (20 ppm).

### ***Aspectos de campo e petrográficos***

Esta seção visa apresentar os dados de campo e petrográficos dos diabásios coletados num total de 28 pontos visitados na área estudada neste trabalho (Figura 2). Os diabásios do setor centro-norte (43° 45' W - 42° 15' W e 21° 45' S - 22° 15' S) do Enxame de Diques da Serra do Mar têm direção preferencial NE-SW e, portanto, coincidente com os principais lineamentos do Orógeno Ribeira. Estes lineamentos estão comumente relacionados às estruturas dúcteis das rochas Neoproterozóicas daquele orógeno que, na porção centro-oriental do enxame, são sub-paralelas à Zona de Cisalhamento Além Paraíba (N 60° - 75° E) (p.ex.: Heilbron *et al.*, 2004). Os diques de diabásio, mesmo quando de extensão de até alguns quilômetros e espessuras de centenas de metros, estão relacionados a lineamentos pouco expressivos, muito

embora também na direção preferencial NE-SW, sempre contínuos e associados a expressões topográficas positivas. Dados de campo mostraram que os diabásios nesta área do enxame estão mal expostos, ora em afloramentos muito alterados, ora como blocos *in situ* alinhados e blocos rolados. A presença de margens resfriadas é indicativa de forte gradiente térmico entre os diques e as rochas encaixantes, o que remete a níveis crustais rasos para as intrusões. A ausência geral de xenólitos indica que não houve interação física ou química apreciável entre os magmas basálticos e as rochas encaixantes de composição predominantemente granítica, o que foi atribuído à condução térmica ineficiente devido à presença da margem resfriada. As poucas feições metassomáticas

observadas no campo foram, por sua vez, atribuídas à mobilização de fluidos das próprias rochas encaixantes e não das intrusões propriamente ditas, haja vista que estas últimas são destituídas de vesículas, amígdalas e veios. O estudo petrográfico mostrou que os diabásios estudados não apresentam olivina na matriz e são formados quase que exclusivamente por um único tipo de piroxênio rico em cálcio, ou seja, augita. O piroxênio pobre em cálcio (pigeonita) foi raramente observado. Minerais opacos, apatita e quartzo ocorrem como minerais acessórios, enquanto saussurita, sobre grãos de plagioclásio, biotita e uralita ocorrem como produtos de alteração. Minerais opacos anédricos encontrados nestes diabásios parecem relacionados a processos *subsolidus* tardios.



**Figura 2:** Mapa esquemático mostrando os vinte e oito diques amostrados nos setores centro-norte e nordeste do Enxame de Diques da Serra do Mar.

Os diques mapeados na porção nordeste do Enxame de Diques da Serra do Mar ( $42^{\circ}15' W - 41^{\circ}45' W$  e  $21^{\circ}45' S - 22^{\circ}30' S$ ) apresentam espessuras de dezenas a centenas de metros, enquanto suas extensões variam na ordem de centenas a milhares de metros. A direção preferencial destes diques também é NE-SW. Os afloramentos de diabásios

desta região encontram-se bastante intemperizados, diaclasados e com esfoliação esferoidal. Subordinadamente, há blocos rolados e *in situ*. De um modo geral, os diques estão associados a feições topográficas positivas. Entretanto, essas feições são inexpressivas quando comparadas àquelas associadas às rochas encaixantes.

Estudos petrográficos mostraram que os diabásios da porção nordeste do Enxame de Diques da Serra do Mar são similares aos da porção centro-oeste descritos anteriormente. As rochas são compostas, essencialmente, por plagioclásio e clinopiroxênio (augita e pigeonita). Vale ressaltar que a ocorrência de grãos de pigeonita na porção nordeste do Enxame de Diques da Serra do Mar é freqüente, o que é contrastante em relação à porção centro-norte do referido enxame, conforme citado anteriormente. Minerais opacos, apatita e quartzo ocorrem como minerais acessórios. Subordinadamente, texturas gráficas foram observadas nas rochas estudadas. Saussurita sobre grãos de plagioclásio, e biotita e uralita sobre grãos de piroxênios são os produtos de alteração mais freqüentes. As amostras coletadas na porção central dos diques são holocristalinas, inequigranulares seriadas e intergranulares (com augita preenchendo interstícios). Texturas subofíticas também foram observadas nestas rochas. Fenocristais não foram observados nas porções centrais das intrusões. Raros grãos grossos (> 3 mm) e corroídos de plagioclásio foram interpretados como xenocristais. Já a margem resfriada dos diques é caracterizada por microfenocristais de plagioclásio e augita, assim como glomeropórfiros monominerálicos de augita e plagioclásio, envolvidos por uma matriz fina com vidro intersticial. A textura granofírica, associada à predominância de fenocristais de plagioclásio em relação à augita, e a ausência de fenocristais de olivina, indicam o caráter evoluído dos líquidos representados pelos diabásios estudados. Similarmente à porção centro-norte, os minerais opacos anédricos encontrados nos diabásios da porção nordeste do Enxame de Diques da Serra do Mar parecem relacionados a processos *subsolidus* tardios.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### ***Dados litogeoquímicos***

Vinte e uma amostras de diabásio nas duas áreas estudadas (porções centro-norte e nordeste do Enxame de Diques da Serra do Mar) foram selecionadas para análises litogeoquímicas (óxidos e elementos-traços, incluindo elementos terras-raras) (Tabela 1). Os valores de perda ao fogo (PF) das amostras dos setores centro-norte e nordeste do Enxame de Diques da Serra do Mar, selecionadas para este estudo, estão, em geral, abaixo de 2% peso (média  $1,40 \pm 0,40\%$  peso), o que é indicativo do baixo grau de alteração das amostras estudadas. Os valores da soma dos óxidos ficaram entre 97,89% peso e 100,9% peso. As amostras DB-SV-3, CO-SV-1, AN-SV-3, TM-SV-4 e SMM-SV-2 (Tabela 1) apresentam totais dos óxidos iguais a 97,89% peso, 97,97% peso, 98,67% peso, 98,46% peso e 98,38% peso, respectivamente. Estas somas estão fora do intervalo (entre 99 e 101% peso) geralmente considerado satisfatório para análises geoquímicas de rocha total. Mesmo assim, estas amostras foram utilizadas neste trabalho, muito embora atenção especial tenha sido dada a elas no tocante à detecção de possíveis discrepâncias. O ferro foi analisado como ferro total sob a forma de ferro férrico ( $Fe_2O_3^t$ ).

Os diabásios puderam ser separados em duas suítes distintas (baixo- $TiO_2$  e alto- $TiO_2$ ) com base em critérios apresentados na literatura por Bellieni *et al.* (1983) e Hergt *et al.* (1991). Com base nos critérios adotados, dentre as vinte e uma analisadas, cinco amostras foram identificadas como pertencentes à suíte de baixo- $TiO_2$ , enquanto que dezesseis amostras foram incluídas na suíte de alto- $TiO_2$ .

**Tabela 1:** Dados litogeoquímicos para os diabásios dos setores centro-norte e nordeste do Enxame de Diques da Serra do Mar. PF é perda ao fogo. Ferro analisado como ferro total sob a forma de ferro férrico.

| Amostra                                     | SMM-SV-1<br>Baixo-TiO <sub>2</sub> | CO-SV-1<br>Baixo-TiO <sub>2</sub> | CM-SV-2<br>Baixo-TiO <sub>2</sub> | CM-SV-1A<br>Baixo-TiO <sub>2</sub> | CM-SV-1B<br>Baixo-TiO <sub>2</sub> | TM-SV-4<br>Alto-TiO <sub>2</sub> | SMM-SV-2<br>Alto-TiO <sub>2</sub> | RN-SV-1E<br>Alto-TiO <sub>2</sub> | AN-SV-3<br>Alto-TiO <sub>2</sub> | RN-SV-1A<br>Alto-TiO <sub>2</sub> | RN-SV-1D<br>Alto-TiO <sub>2</sub> |
|---|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| SiO <sub>2</sub>                            | 52,99                              | 52,61                             | 53,47                             | 51,82                              | 52,69                              | 49,87                            | 50,69                             | 51,71                             | 50,06                            | 51,37                             | 51,31                             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>              | 14,45                              | 15,28                             | 13,33                             | 13,29                              | 13,45                              | 12,96                            | 12,14                             | 12,48                             | 13,03                            | 12,65                             | 12,49                             |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>t</sup> | 11,21                              | 10,99                             | 13,3                              | 13,34                              | 13,15                              | 13,86                            | 14,97                             | 15,01                             | 14,43                            | 15,06                             | 15,45                             |
| MnO   | 0,179                              | 0,16                              | 0,211                             | 0,212                              | 0,199                              | 0,193                            | 0,198                             | 0,194                             | 0,188                            | 0,173                             | 0,207                             |
| MgO   | 5,62                               | 3,23                              | 4,88                              | 4,77                               | 4,79                               | 4,89                             | 3,79                              | 3,9                               | 3,84                             | 3,41                              | 3,95                              |
| CaO   | 10,5                               | 7,85                              | 8,61                              | 8,51                               | 8,61                               | 8,27                             | 7,4                               | 7,45                              | 7,37                             | 7,2                               | 7,77                              |
| Na <sub>2</sub> O                           | 2,46                               | 3,06                              | 2,62                              | 2,46                               | 2,66                               | 2,64                             | 2,6                               | 2,64                              | 2,61                             | 2,68                              | 2,7                               |
| K <sub>2</sub> O                            | 1,04                               | 1,63                              | 1,15                              | 1,18                               | 1,4                                | 1,4                              | 1,79                              | 1,99                              | 1,73                             | 1,72                              | 1,82                              |
| TiO <sub>2</sub>                            | 1,118                              | 1,407                             | 1,456                             | 1,558                              | 1,565                              | 2,813                            | 3,221                             | 3,276                             | 3,287                            | 3,335                             | 3,45                              |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>               | 0,17                               | 0,3                               | 0,2                               | 0,24                               | 0,24                               | 0,38                             | 0,58                              | 0,57                              | 0,54                             | 0,57                              | 0,56                              |
| PF  | 1,06                               | 1,44                              | 0,98                              | 1,64                               | 1,23                               | 1,2                              | 1,01                              | 1,19                              | 1,58                             | 1,99                              | 1,04                              |
| Total                                       | 100,8                              | 97,97                             | 100,2                             | 99,01                              | 99,97                              | 98,46                            | 98,38                             | 100,4                             | 98,67                            | 100,2                             | 100,8                             |

| Amostra                                     | AN-SV-1<br>Alto-TiO <sub>2</sub> | VL-SV-2<br>Alto-TiO <sub>2</sub> | TM-SV-2<br>Alto-TiO <sub>2</sub> | TR-SV-1A<br>Alto-TiO <sub>2</sub> | PS-SV-3<br>Alto-TiO <sub>2</sub> | DB-SV-3<br>Alto-TiO <sub>2</sub> | CO-SV-3<br>Alto-TiO <sub>2</sub> | DB-SV-5<br>Alto-TiO <sub>2</sub> | DB-SV-2<br>Alto-TiO <sub>2</sub> | DB-SV-6<br>Alto-TiO <sub>2</sub> |
|---|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| SiO <sub>2</sub>                            | 50,65                            | 51,43                            | 47,87                            | 47,72                             | 48,16                            | 48,33                            | 49,87                            | 47,72                            | 48,67                            | 47,37                            |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>              | 13,2                             | 12,21                            | 12,84                            | 12,67                             | 12,66                            | 12,54                            | 12,36                            | 12,6                             | 12,15                            | 12,23                            |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>t</sup> | 13,29                            | 15,13                            | 14,97                            | 14,28                             | 14,72                            | 13,94                            | 15,3                             | 14,94                            | 15,89                            | 15,51                            |
| MnO   | 0,183                            | 0,2                              | 0,19                             | 0,223                             | 0,189                            | 0,18                             | 0,211                            | 0,201                            | 0,216                            | 0,198                            |
| MgO   | 4,11                             | 3,36                             | 5,19                             | 4,6                               | 4,84                             | 4,52                             | 5,03                             | 4,88                             | 4,58                             | 5,36                             |
| CaO   | 7,39                             | 7,15                             | 8,68                             | 8,81                              | 7,77                             | 8,14                             | 8,24                             | 8,72                             | 8,37                             | 8,83                             |
| Na <sub>2</sub> O                           | 2,91                             | 2,83                             | 2,39                             | 2,75                              | 3,12                             | 2,44                             | 2,65                             | 2,82                             | 2,65                             | 2,55                             |
| K <sub>2</sub> O                            | 2,14                             | 2,16                             | 1,53                             | 1,19                              | 1,69                             | 1,89                             | 1,83                             | 1,25                             | 1,65                             | 1,29                             |
| TiO <sub>2</sub>                            | 3,561                            | 3,666                            | 3,991                            | 4,003                             | 4,01                             | 4,032                            | 4,134                            | 4,175                            | 4,241                            | 4,304                            |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>               | 0,77                             | 0,65                             | 0,63                             | 0,78                              | 0,66                             | 0,78                             | 0,69                             | 0,69                             | 0,89                             | 0,6                              |
| PF  | 1,77                             | 1,26                             | 1,36                             | 2,14                              | 1,83                             | 1,09                             | 0,62                             | 1,86                             | 1,13                             | 1,88                             |
| Total                                       | 99,97                            | 100                              | 99,64                            | 99,16                             | 99,65                            | 97,89                            | 100,9                            | 99,85                            | 100,4                            | 100,1                            |

**Tabela 1:** Continuação.

| Amostra | SMM-SV-1               | CO-SV-1                | CM-SV-2                | CM-SV-1A               | CM-SV-1B               | TM-SV-4               | SMM-SV-2              | RN-SV-1E              | AN-SV-3               | RN-SV-1A              | RN-SV-1D              |
|---------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Suíte   | Baixo-TiO <sub>2</sub> | Baixo-TiO <sub>2</sub> | Baixo-TiO <sub>2</sub> | Baixo-TiO <sub>2</sub> | Baixo-TiO <sub>2</sub> | Alto-TiO <sub>2</sub> | Alto-TiO <sub>2</sub> | Alto-TiO <sub>2</sub> | Alto-TiO <sub>2</sub> | Alto-TiO <sub>2</sub> | Alto-TiO <sub>2</sub> |
| Ba      | 289                    | 428                    | 281                    | 384                    | 397                    | 396                   | 556                   | 583                   | 526                   | 1340                  | 570                   |
| La      | 17,2                   | 27,4                   | 21,6                   | 25                     | 26                     | 29,4                  | 40,6                  | 44,6                  | 37,4                  | 47                    | 43,9                  |
| Ce      | 35,7                   | 58,1                   | 44,6                   | 50,5                   | 53,5                   | 64,6                  | 86,9                  | 96,8                  | 82,1                  | 92                    | 94,6                  |
| Pr      | 4,09                   | 7,07                   | 5                      | 5,67                   | 5,99                   | 7,64                  | 10,3                  | 11,2                  | 9,8                   | 11,7                  | 11,1                  |
| Nd      | 16,4                   | 26,5                   | 20,2                   | 21,3                   | 23,7                   | 32,1                  | 37,2                  | 45,6                  | 41,4                  | 46,8                  | 44,9                  |
| Sm      | 4,06                   | 6,05                   | 4,83                   | 5,06                   | 5,47                   | 7,53                  | 9,07                  | 9,85                  | 9,39                  | 10,2                  | 9,65                  |
| Eu      | 1,26                   | 1,87                   | 1,44                   | 1,49                   | 1,64                   | 2,48                  | 2,8                   | 3,01                  | 2,94                  | 3,08                  | 3,01                  |
| Gd      | 4,66                   | 6,74                   | 5,75                   | 5,77                   | 6,1                    | 7,87                  | 9,23                  | 9,72                  | 9,64                  | 10,5                  | 9,69                  |
| Tb      | 0,8                    | 1,13                   | 0,96                   | 0,97                   | 1,01                   | 1,23                  | 1,44                  | 1,47                  | 1,46                  | 1,6                   | 1,51                  |
| Dy      | 4,74                   | 6,74                   | 5,68                   | 5,65                   | 5,96                   | 6,89                  | 7,64                  | 8,21                  | 8,13                  | 8,9                   | 8,29                  |
| Ho      | 0,95                   | 1,34                   | 1,11                   | 1,13                   | 1,2                    | 1,29                  | 1,41                  | 1,53                  | 1,49                  | 1,63                  | 1,53                  |
| Er      | 2,74                   | 3,8                    | 3,11                   | 3,28                   | 3,46                   | 3,47                  | 3,91                  | 4,19                  | 3,97                  | 4,46                  | 4,15                  |
| Tm      | 0,384                  | 0,545                  | 0,445                  | 0,469                  | 0,491                  | 0,473                 | 0,527                 | 0,556                 | 0,526                 | 0,603                 | 0,546                 |
| Yb      | 2,37                   | 3,38                   | 2,74                   | 2,87                   | 3,02                   | 2,84                  | 3,16                  | 3,44                  | 3,12                  | 3,62                  | 3,36                  |
| Lu      | 0,371                  | 0,515                  | 0,434                  | 0,442                  | 0,46                   | 0,421                 | 0,462                 | 0,509                 | 0,451                 | 0,519                 | 0,506                 |
| Hf      | 3,3                    | 5,2                    | 3,8                    | 4,6                    | 4,7                    | 5,9                   | 7,9                   | 8,4                   | 8,3                   | 8,1                   | 7,9                   |
| Th      | 3,15                   | 5,22                   | 4,33                   | 5,08                   | 4,91                   | 2,66                  | 5,04                  | 5,32                  | 4,22                  | 5,14                  | 4,72                  |
| U       | 0,79                   | 1,26                   | 1,36                   | 1,19                   | 1,16                   | 0,67                  | 1,27                  | 1,45                  | 1,07                  | 1,26                  | 1,23                  |
| Sc      | 40                     | 27                     | 36                     | 33                     | 35                     | 29                    | 26                    | 27                    | 25                    | 27                    | 29                    |
| V       | 307                    | 238                    | 396                    | 381                    | 381                    | 387                   | 356                   | 362                   | 370                   | 379                   | 404                   |
| Cr      | 30                     | 19                     | 19                     | 40                     | 30                     | 80                    | 19                    | 19                    | 40                    | 19                    | 19                    |
| Co      | 47                     | 47                     | 57                     | 48                     | 54                     | 46                    | 43                    | 56                    | 59                    | 41                    | 61                    |
| Ni      | 30                     | 19                     | 40                     | 40                     | 30                     | 30                    | 30                    | 40                    | 50                    | 30                    | 19                    |
| Rb      | 36                     | 63                     | 43                     | 38                     | 47                     | 34                    | 52                    | 57                    | 47                    | 43                    | 49                    |
| Sr      | 244                    | 272                    | 207                    | 225                    | 255                    | 512                   | 458                   | 464                   | 519                   | 482                   | 487                   |
| Y       | 28,1                   | 39,3                   | 33                     | 33,9                   | 35,7                   | 37,2                  | 41,9                  | 44,9                  | 44,9                  | 46,3                  | 44,3                  |
| Zr      | 123                    | 180                    | 140                    | 170                    | 183                    | 225                   | 300                   | 317                   | 313                   | 305                   | 307                   |
| Nb      | 8,1                    | 17,4                   | 9,7                    | 18,7                   | 15,5                   | 18,2                  | 33,8                  | 34,7                  | 31                    | 33,9                  | 27,3                  |

(continua na próxima página)

**Tabela 1:** Continuação.

| Amostra | AN-SV-1               | VL-SV-2               | TM-SV-2               | TR-SV-1A              | PS-SV-3               | DB-SV-3               | CO-SV-3               | DB-SV-5               | DB-SV-2               | DB-SV-6               |
|---------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Suíte   | Alto-TiO <sub>2</sub> | Alto-TiO <sub>2</sub> | Alto-TiO <sub>2</sub> | Alto-TiO <sub>2</sub> | Alto-TiO <sub>2</sub> | Alto-TiO <sub>2</sub> | Alto-TiO <sub>2</sub> | Alto-TiO <sub>2</sub> | Alto-TiO <sub>2</sub> | Alto-TiO <sub>2</sub> |
| Ba      | 750                   | 655                   | 483                   | 392                   | 577                   | 653                   | 517                   | 492                   | 533                   | 434                   |
| La      | 57,1                  | 51,7                  | 37,9                  | 47                    | 36,3                  | 46,9                  | 42,5                  | 38,5                  | 42,6                  | 32,7                  |
| Ce      | 123                   | 111                   | 82,6                  | 99,3                  | 81,4                  | 101                   | 94,1                  | 85                    | 95,4                  | 72,9                  |
| Pr      | 14,4                  | 13                    | 9,78                  | 13,2                  | 9,78                  | 12                    | 11,3                  | 10,2                  | 11,6                  | 8,76                  |
| Nd      | 57,5                  | 49,1                  | 40,6                  | 49,7                  | 40,6                  | 43,6                  | 44                    | 38,4                  | 46,1                  | 32,7                  |
| Sm      | 12,1                  | 11,1                  | 8,92                  | 10,7                  | 8,99                  | 10,1                  | 10,4                  | 9,33                  | 10,8                  | 8,19                  |
| Eu      | 3,88                  | 3,37                  | 2,93                  | 3,45                  | 2,94                  | 3,29                  | 3,41                  | 3,17                  | 3,56                  | 2,8                   |
| Gd      | 11,6                  | 11,3                  | 8,74                  | 9,82                  | 8,7                   | 9,44                  | 10,6                  | 9,52                  | 10,9                  | 8,21                  |
| Tb      | 1,69                  | 1,78                  | 1,31                  | 1,42                  | 1,34                  | 1,33                  | 1,68                  | 1,4                   | 1,67                  | 1,25                  |
| Dy      | 9,09                  | 9,32                  | 7,14                  | 7,39                  | 6,85                  | 6,76                  | 8,59                  | 7,35                  | 8,35                  | 6,42                  |
| Ho      | 1,64                  | 1,69                  | 1,3                   | 1,29                  | 1,23                  | 1,15                  | 1,53                  | 1,3                   | 1,47                  | 1,13                  |
| Er      | 4,34                  | 4,67                  | 3,45                  | 3,45                  | 3,24                  | 3,05                  | 4,09                  | 3,46                  | 3,91                  | 2,96                  |
| Tm      | 0,566                 | 0,636                 | 0,465                 | 0,453                 | 0,436                 | 0,395                 | 0,555                 | 0,452                 | 0,518                 | 0,387                 |
| Yb      | 3,36                  | 3,74                  | 2,78                  | 2,62                  | 2,48                  | 2,28                  | 3,24                  | 2,56                  | 2,98                  | 2,35                  |
| Lu      | 0,477                 | 0,553                 | 0,426                 | 0,37                  | 0,362                 | 0,317                 | 0,462                 | 0,368                 | 0,418                 | 0,33                  |
| Hf      | 9,2                   | 9,1                   | 6,5                   | 7,1                   | 7                     | 7,5                   | 8,2                   | 6,9                   | 7,8                   | 6,6                   |
| Th      | 5,57                  | 5,92                  | 3,88                  | 3,89                  | 3,5                   | 4,64                  | 3,56                  | 3,2                   | 3,26                  | 2,98                  |
| U       | 1,4                   | 1,53                  | 0,97                  | 0,95                  | 0,86                  | 1,16                  | 0,85                  | 0,82                  | 0,8                   | 0,78                  |
| Sc      | 21                    | 28                    | 26                    | 23                    | 25                    | 21                    | 29                    | 27                    | 29                    | 27                    |
| V       | 354                   | 412                   | 472                   | 427                   | 444                   | 421                   | 464                   | 446                   | 445                   | 497                   |
| Cr      | 30                    | 19                    | 60                    | 19                    | 30                    | 30                    | 100                   | 30                    | 50                    | 50                    |
| Co      | 44                    | 53                    | 64                    | 50                    | 44                    | 47                    | 45                    | 47                    | 56                    | 48                    |
| Ni      | 19                    | 19                    | 80                    | 30                    | 40                    | 40                    | 40                    | 19                    | 19                    | 50                    |
| Rb      | 57                    | 61                    | 39                    | 20                    | 48                    | 46                    | 45                    | 26                    | 35                    | 33                    |
| Sr      | 687                   | 470                   | 649                   | 704                   | 649                   | 949                   | 546                   | 679                   | 616                   | 656                   |
| Y       | 51,9                  | 50                    | 40,1                  | 35,4                  | 36                    | 34,1                  | 44,9                  | 38,9                  | 43,9                  | 32,7                  |
| Zr      | 372                   | 365                   | 228                   | 273                   | 261                   | 277                   | 314                   | 265                   | 301                   | 236                   |
| Nb      | 33,3                  | 31,6                  | 28,2                  | 33,7                  | 29,5                  | 38,5                  | 26,9                  | 24,7                  | 27,5                  | 29,4                  |



A amostra menos evoluída da suíte de baixo-TiO<sub>2</sub> tem valores de SiO<sub>2</sub>= 52,99 %peso, MgO= 5,62 %peso, Ni= 30 ppm e Cr= 30 ppm. Estes valores não caracterizam a amostra parental da suíte como tendo composição basáltica primária (p.ex.: Ni> 500 ppm e Cr> 1000 ppm; Wilson, 1989). A amostra mais evoluída da suíte de baixo-TiO<sub>2</sub> tem valores de SiO<sub>2</sub>= 52,61%peso, MgO= 3,23%peso, Ni= 19 ppm e Cr= 19 ppm (Tabela 1). A amostra menos evoluída da suíte de alto-TiO<sub>2</sub> tem valores de SiO<sub>2</sub>= 47,37%peso, MgO= 5,62%peso, Ni= 50 ppm e Cr= 47 ppm. Estes valores não caracterizam a amostra parental da suíte como tendo composição basáltica primária (p.ex.: Ni> 500 ppm e Cr> 1000 ppm; Wilson, *op.cit.*). A amostra mais evoluída da suíte de alto-TiO<sub>2</sub> tem valores de SiO<sub>2</sub>= 51,43%peso, MgO= 3,36%peso, Ni= 17 ppm e Cr= 19 ppm (Tabela 1).

A precisão analítica para elementos maiores dos basaltos de baixo-TiO<sub>2</sub> do EDSM varia de 0,25% a 2,26%, enquanto que para os basaltos de alto-TiO<sub>2</sub> a precisão varia de 0,40 a 3,20%. A precisão analítica para elementos-traço dos basaltos de baixo-TiO<sub>2</sub> do EDSM varia de 0,50 a 4,57% e, para os diabásios de alto-TiO<sub>2</sub> do enxame varia de 0,69 a 8,83%. Apenas o Ni apresentou valores acima de 10% (Ni= 12,76%). No caso dos elementos terras raras dos basaltos de baixo-TiO<sub>2</sub> do EDSM, a precisão analítica varia entre 0,77 e 2,48%, enquanto que para os basaltos de alto-TiO<sub>2</sub> a precisão analítica varia de 0,8 a 2,5%.

A acurácia analítica para elementos maiores dos basaltos de baixo-TiO<sub>2</sub> do EDSM varia de 0,74 a 8,28%, a exceção de TiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (55,76%; 28,60% e 15,12%; respectivamente). Para os basaltos da suíte de alto-TiO<sub>2</sub> do EDSM, a acurácia varia entre 0,46 e 8,29%. Contudo, a acurácia para TiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> é de 40,43%; 20,94% e 16,00%, respectivamente. A acurácia

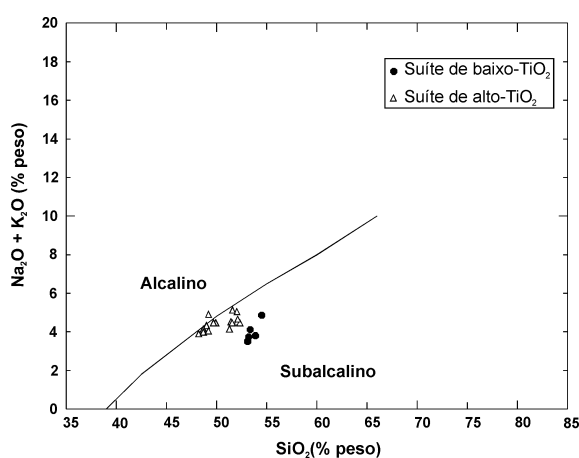
analítica para elementos-traço dos basaltos de baixo-TiO<sub>2</sub> do EDSM é variável entre 3,55 e 8,77%, à exceção de Nb (39,30%), Hf (39,27%) e Ta (14,66%). Em relação aos elementos-traço dos diabásios da suíte de baixo-TiO<sub>2</sub>, a acurácia varia de 4,65 a 8,49%, à exceção de Pr e Nd com 19,46% e 86,54%, respectivamente. A acurácia analítica para elementos-traço dos basaltos de alto-TiO<sub>2</sub> do EDSM é variável entre 3,7 e 8,8%, à exceção de Nb (39,30%), Hf (39,30%) e Ta (14,70%). Para os elementos-traço dos diabásios da suíte de alto-TiO<sub>2</sub>, a acurácia varia de 4,7 a 8,5%, à exceção de Pr (19,5%) e Nd (86,5%).

#### ***Discriminação de séries, suítes e classificações***

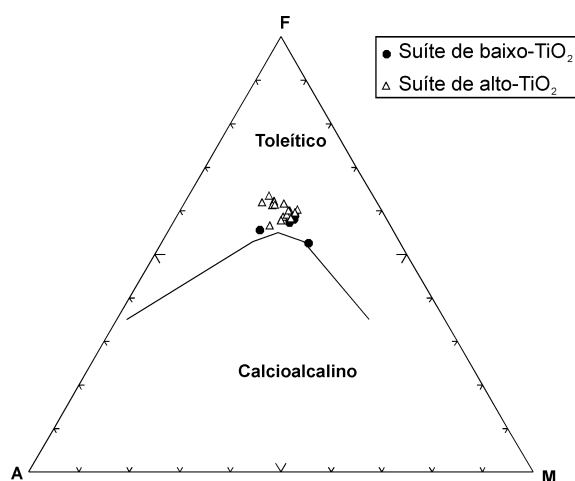
A interpretação dos dados litogeoquímicos apresentados neste trabalho (Tabela 1) gerou resultados preliminares que serão apresentados nesta seção. O diagrama de discriminação de séries utilizado neste trabalho (Figura 3) foi o TAS (total de álcalis x sílica) de Irvine & Baragar (1971). As amostras estudadas caracterizam uma série transicional, cruzando a linha divisória entre os campos das séries subalcalina e alcalina (Figura 3). No entanto, o caráter transicional é mais evidente para os diabásios da suíte de alto-TiO<sub>2</sub>, com os diabásios da suíte de baixo-TiO<sub>2</sub> plotando claramente no campo subalcalino do diagrama discriminante. As amostras de diabásio constituem uma série toleítica (Figura 4) no diagrama AFM (Irvine & Baragar, 1971). A afinidade toleítica da série é corroborada pela presença de hiperstênio (e ausência de nefelina) na norma CIPW em todas as amostras estudadas (Tabela 2). As concentrações de hiperstênio normativo variam de 17,14%peso a 19,60%peso, com valor médio de 17,14 ± 1,35%peso (Tabela 2). A grande maioria das

amostras é quartzo-toleítica (1,05 < quartzo < 7,12%peso). Apenas uma amostra, num total de vinte e um,

classificou-se como olivina-toleíta, com teores de olivina normativa de 0,74%peso.



**Figura 3:** Diagrama TAS (total de álcalis versus sílica) de discriminação de séries de com a curva de Irvine & Baragar (1971) para os diabásios estudados. Dados recalculados para 100% em base anídrica.



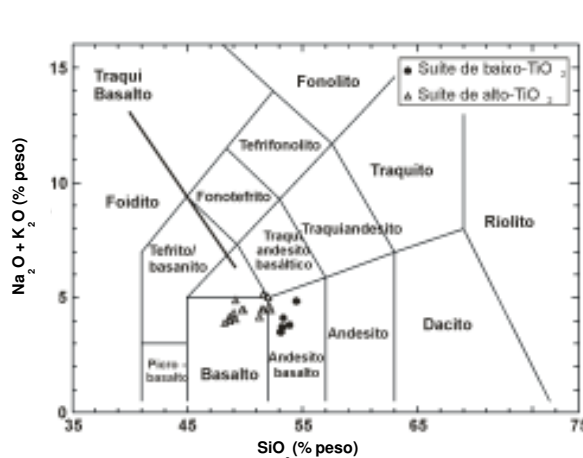
**Figura 4:** Diagrama AFM de discriminação de séries toleítica e calcioalcalina com a curva de de Irvine & Baragar (1971) para os diabásios estudados. A= Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O; F= FeO + 0,8998Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; M= MgO (em %peso). Dados recalculados para 100% em base anídrica.

**Tabela 2:** Valores máximos, mínimos, médias e desvios-padrão da norma CIPW das amostras estudadas. Todos os valores são expressos em %peso. Os minerais normativos são os seguintes: Q= quartzo, Hy= hiperstênio, Ol= olivina, Ne= nefelina, Or= ortoclásio, Ab= albita, An= anortita, Di= diopísídeo, Mt= magnetita, Il= ilmenita e Ap= apatita.

| Valores       | Q    | Hy    | Ol   | Ne   | Or    | Ab    | An    | Di    | Mt   | Il   | Ap   | Total |
|---------------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|
| Máximo        | 7,12 | 19,60 | 0,74 | 0,00 | 13,12 | 27,34 | 25,64 | 21,57 | 3,53 | 8,43 | 2,16 | 100,3 |
| Mínimo        | 0,00 | 14,85 | 0,00 | 0,00 | 6,24  | 20,85 | 14,62 | 12,32 | 2,47 | 2,15 | 0,41 | 100,1 |
| Média         | 3,93 | 17,14 | 0,06 | 0,00 | 9,72  | 23,42 | 19,17 | 16,19 | 3,17 | 6,13 | 1,34 | 100,2 |
| Desvio-padrão | 2,14 | 1,35  | 0,21 | 0,00 | 2,13  | 1,87  | 3,09  | 2,48  | 0,32 | 2,19 | 0,55 | 0,06  |

Os diabásios estudados neste trabalho foram classificados com base na sua composição química segundo o diagrama TAS de LeMaitre (1989). As amostras da suíte de alto-TiO<sub>2</sub> classificaram-se majoritariamente como basaltos, e mais subordinadamente como traqui-basaltos e andesito-basaltos. Em contrapartida, as amostras da suíte de baixo-TiO<sub>2</sub> classificaram-se somente em andesito-basaltos (Figura 5). Vale notar, porém, que os álcalis são elementos relativamente móveis durante a atuação dos processos secundários (ação intempérica e/ou hidrotermais). Assim sendo, as amostras também foram plotadas em diagramas de classificação que se baseiam em elementos

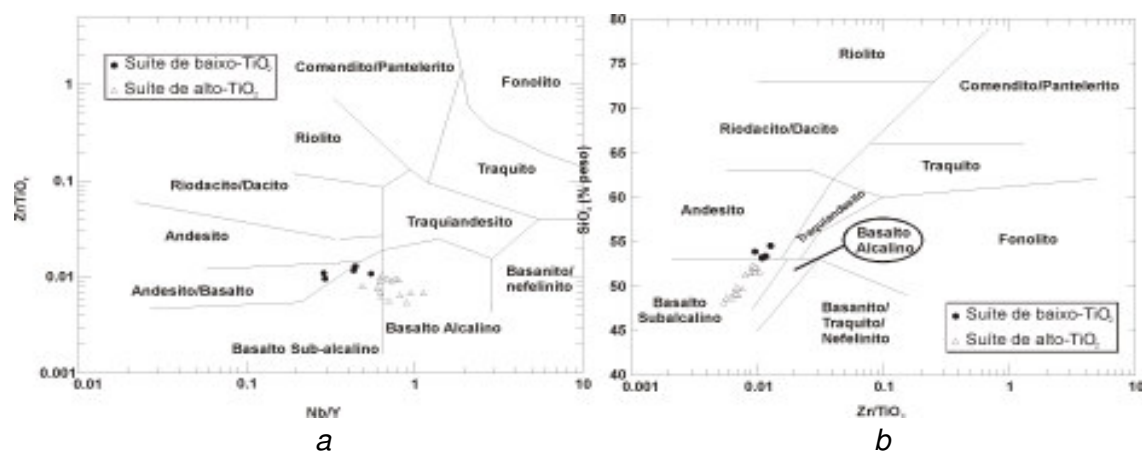
considerados imóveis, tais como o Zr, Nb,



**Figura 5:** Diagrama de classificação de rochas de LeMaitre (1989) para os diabásios estudados. Dados recalculados para 100% em base anídrica.

Y e  $\text{TiO}_2$  de Winchester & Floyd (1977). Nestes diagramas (Figura 6a,b), as amostras foram classificadas, em sua maioria, como basaltos, em especial as pertencentes à suíte de alto- $\text{TiO}_2$ . As amostras da suíte de baixo- $\text{TiO}_2$

classificaram-se predominantemente como andesitos. É interessante notar que o caráter transicional da série basáltica estudada também se revela pelos teores variáveis da razão Nb/Y (Figura 6a).



**Figura 6:** Diagramas de classificação de rochas para as amostras estudadas (Winchester & Floyd, 1977). (a) - Nb/Y versus  $\text{Zr}/\text{TiO}_2$ ; (b) -  $\text{Zr}/\text{TiO}_2$  versus  $\text{SiO}_2$ .

### **Processos evolutivos e discriminação de fontes: suíte de baixo- $\text{TiO}_2$**

Diagramas de variação, tendo MgO como índice de diferenciação, foram elaborados de modo a avaliar possíveis processos evolutivos para os diabásios de baixo- $\text{TiO}_2$  da área estudada (Figura 7). Análise regressiva pelo método dos mínimos quadrados foi empregada para assegurar a validade da avaliação, especialmente tendo em vista o pequeno número de amostras (cinco) nesta suíte. Curvas lineares e polinomiais foram inseridas nos diagramas e os respectivos valores dos quadrados dos coeficientes de correlação de Pearson ( $(R^2)^L$  e  $(R^2)^P$ ) e níveis de significância associados ( $\text{NS}_L$  e  $\text{NS}_P$ ) foram calculados para o total de amostras ( $n=5$ ). Os resultados são apresentados na figura 7.

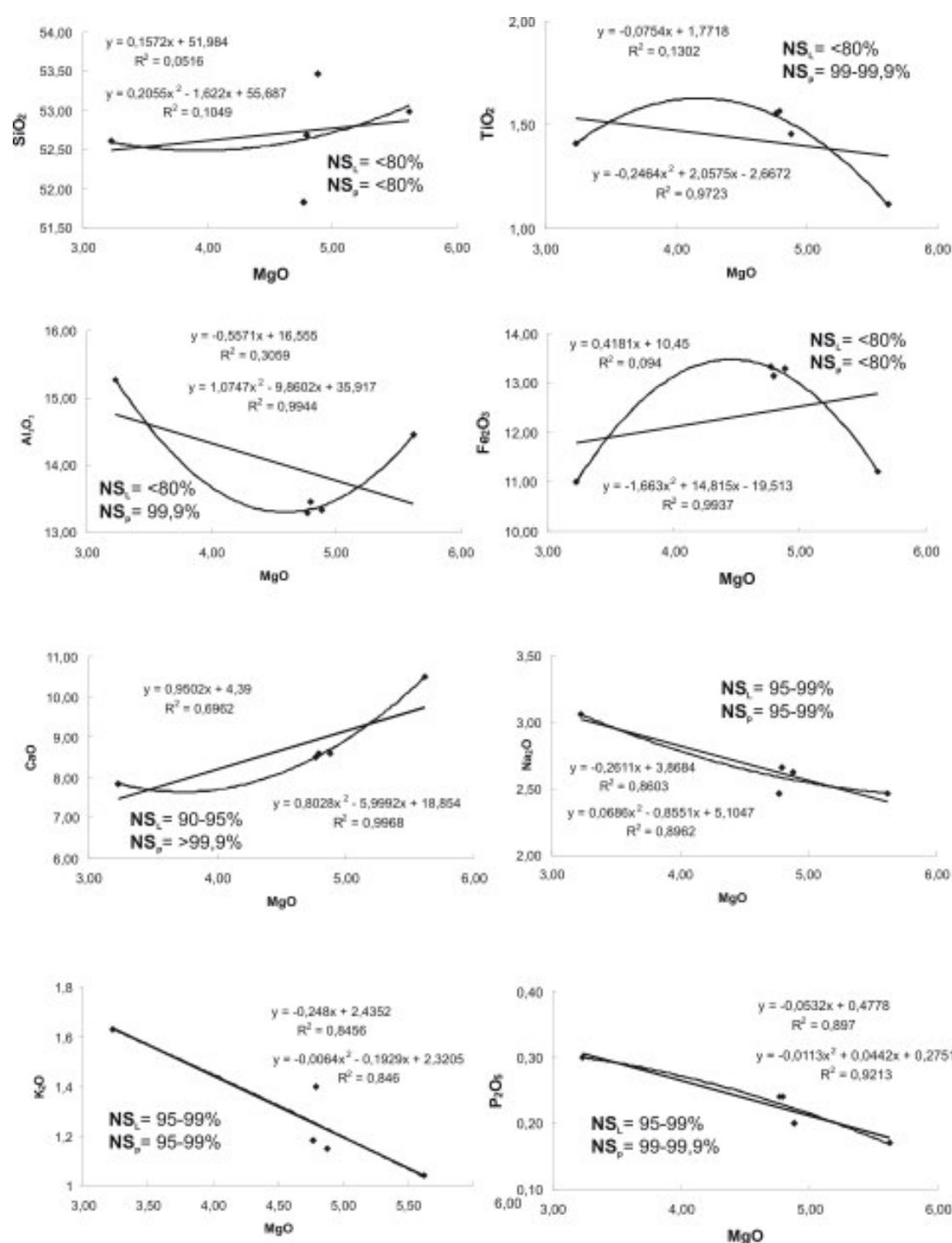
Os diagramas de variação para MgO para os óxidos (Figura 7) indicam que a suíte de baixo- $\text{TiO}_2$  da área de estudo evoluiu por cristalização fracionada ou AFC (*Assimilation and Fractional Crystallisation*) com mudança de assem-

bléia fracionante devido aos valores mais elevados dos níveis de significância para as curvas polinomiais, comparativamente às lineares (Figura 7).

A análise dos diagramas de variação para óxidos (Figura 7) permite sugerir, tentativamente, as assembléias fracionantes. Vale ressaltar que os níveis de significância polinomiais para a maioria dos óxidos ficaram próximos de 99% (Figura 7). A inflexão a cerca de 4,50% peso de MgO indica a mudança da assembléia fracionante. O primeiro estágio de cristalização (até MgO ~4,50% peso) deve ter sido marcado pelo fracionamento de olivina e plagioclásio cálcico que deve ter continuado a cristalizar também no segundo estágio. O segundo estágio de cristalização (MgO > 4,50% peso) é marcado por decréscimo nos teores de  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3^t$  e CaO. O decréscimo de  $\text{TiO}_2$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3^t$  sugere a cristalização de óxidos de Fe e Ti. Vale notar que os níveis de significância para  $\text{Fe}_2\text{O}_3^t$  são baixos, indicando dispersão. O maior obstáculo à discriminação de uma assembléia fracionante, no entanto, é o compor-

tamento anômalo do  $Al_2O_3$ . O decréscimo deste óxido no primeiro estágio de cristalização poderia, a princípio, ser atribuído

a inclusões de espinélio na olivina, como comumente ocorre em basaltos de outras províncias conti-nentais (Cox *et al.*, 1979).



**Figura 7:** Diagramas de variação para MgO para óxidos discriminantes de processos evolutivos para a suíte de baixo-TiO<sub>2</sub> da área estudada. As curvas lineares e polinomiais, suas respectivas equações, quadrados dos coeficientes de correlação ( $R^2$ ) e níveis de significância (NS) são mostrados no diagrama.

Adicionalmente, o decréscimo de  $Al_2O_3$  no primeiro estágio de cristalização, juntamente com o notável decréscimo de CaO, também poderia corroborar a

cristalização de plagioclásio rico em cálcio. Mais difícil é explicar os aumentos nos teores de  $Al_2O_3$  no segundo estágio de cristalização. De um modo geral, o

comportamento do  $\text{Al}_2\text{O}_3$  é totalmente anacrônico comparativamente ao esperado durante os processos usuais de cristalização de magmas basálticos. Talvez isso possa ser atribuído a erros analíticos. O decréscimo de CaO também é marcante no segundo estágio de cristalização, evidenciando o fracionamento de plagioclásio. O comportamento compatível de Cr, aliado ao comportamento notadamente compatível de CaO é indicativo da cristalização de um piroxênio rico em cálcio (p.ex.: augita) em líquidos basálticos (p.ex.: Cox *et al.*, 1979). Adicionalmente, o comportamento compatível de Cr pode indicar também a participação de espinélio, talvez como inclusões na olivina. O comportamento compatível de Ni corrobora a participação de olivina no processo fracionante. Entretanto, é importante ressaltar que os estudos petrográficos não apontam para uma assembléia de fenocristais que envolva a ocorrência de olivina. Além disso, os teores de MgO das rochas basálticas de baixo- $\text{TiO}_2$  (Tabela 1) indicam o caráter evoluído da série, reduzindo a hipótese de fracionamento de olivina em uma provável assembléia fracionante. Logo, muito embora haja todas estas limitações citadas anteriormente, as assembléias fracionantes mais prováveis para o processo de cristalização dos basaltos de baixo- $\text{TiO}_2$  da área estudada são plagioclásio no primeiro e segundo estágios de cristalização, respectivamente, e, plagioclásio e augita no segundo estágio de cristalização.

De um modo geral, as variações de razões de elementos-traços incompatíveis são menores que 50%, considerando-se as composições das amostras parental (SMM-SV-1) e mais evoluída (CO-SV-1) da suíte (Tabela 3). Isto indica que a suíte evoluiu por cristalização fracionada.

A discriminação de prováveis fontes mantélicas relacionadas à suíte

**Tabela 3:** Variações de razões de elementos-traços incompatíveis entre as amostras parental e mais evoluída dos diabásios de baixo- $\text{TiO}_2$  nos setores centro-norte e nordeste do Enxame de Diques da Serra do Mar.

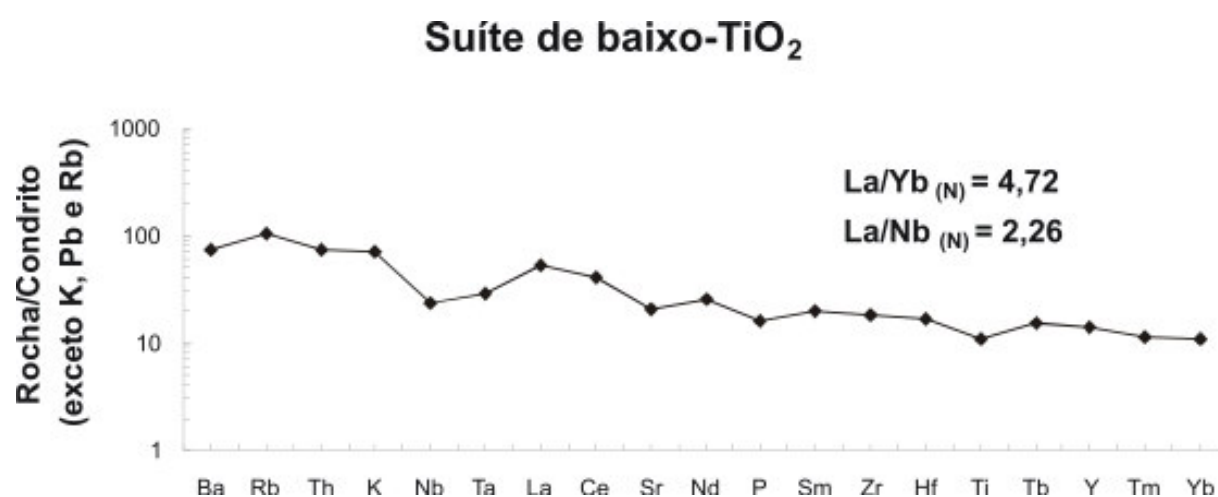
| Amostra  | La/Yb | La/Nb | Zr/Nb | Zr/Y | Y/Nb | Ba/Rb |
|----------|-------|-------|-------|------|------|-------|
| Parental | 4,1   | 2,1   | 15,2  | 4,4  | 3,5  | 8,0   |
| Evoluída | 5,7   | 1,6   | 10,3  | 4,6  | 2,3  | 6,8   |

de baixo- $\text{TiO}_2$  estudada foi feita com base na composição da amostra representativa do magma parental (SMM-SV-1).

A discriminação de prováveis fontes foi feita com base na análise do padrão da amostra parental em diagrama de variação multi-elementar, onde foram plotados elementos incompatíveis e elementos terras raras (Figura 8). As razões  $\text{La/Yb}_{(N)}$  (4,72) e  $\text{La/Nb}_{(N)}$  (2,26) da amostra parental indicam pelo menos uma contribuição do manto litosférico subcontinental na geração dos basaltos da suíte de baixo- $\text{TiO}_2$  na área estudada.

#### **Processos evolutivos e discriminação de fontes: suíte de alto- $\text{TiO}_2$**

Diagramas de variação, tendo MgO como índice de diferenciação, também foram elaborados de modo a avaliar possíveis processos evolutivos para os diabásios de alto- $\text{TiO}_2$  da área estudada (Figura 9). Análise regressiva pelo método dos mínimos quadrados foi empregada para assegurar a validade da avaliação. Curvas lineares e polinomiais foram inseridas nos diagramas e os respectivos valores dos quadrados dos coeficientes de correlação de Pearson ( $(R^2)^L$  e  $(R^2)^P$ ) e níveis de significância associados ( $\text{NS}_L$  e  $\text{NS}_P$ ) foram calculados para o total de amostras ( $n=16$ ). Os resultados são apresentados na figura 9. Vale ressaltar que os níveis de significância para  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$  que não foram satisfatórios indicando dispersão, comprometendo a utilização de seus resultados para a interpretação



**Figura 8:** Concentrações de elementos-traço da amostra parental SMM-SV-1 da suíte de baixo-TiO<sub>2</sub> da área de estudo plotadas num diagrama de variação multi-elementar normalizado para condrito (Thompson, 1982; Sun, 1980 e Hawkesworth *et al.*, 1984).

das prováveis assembléias fracionantes. Os demais óxidos apresentaram os níveis de significância maiores que próximos de 99,9%.

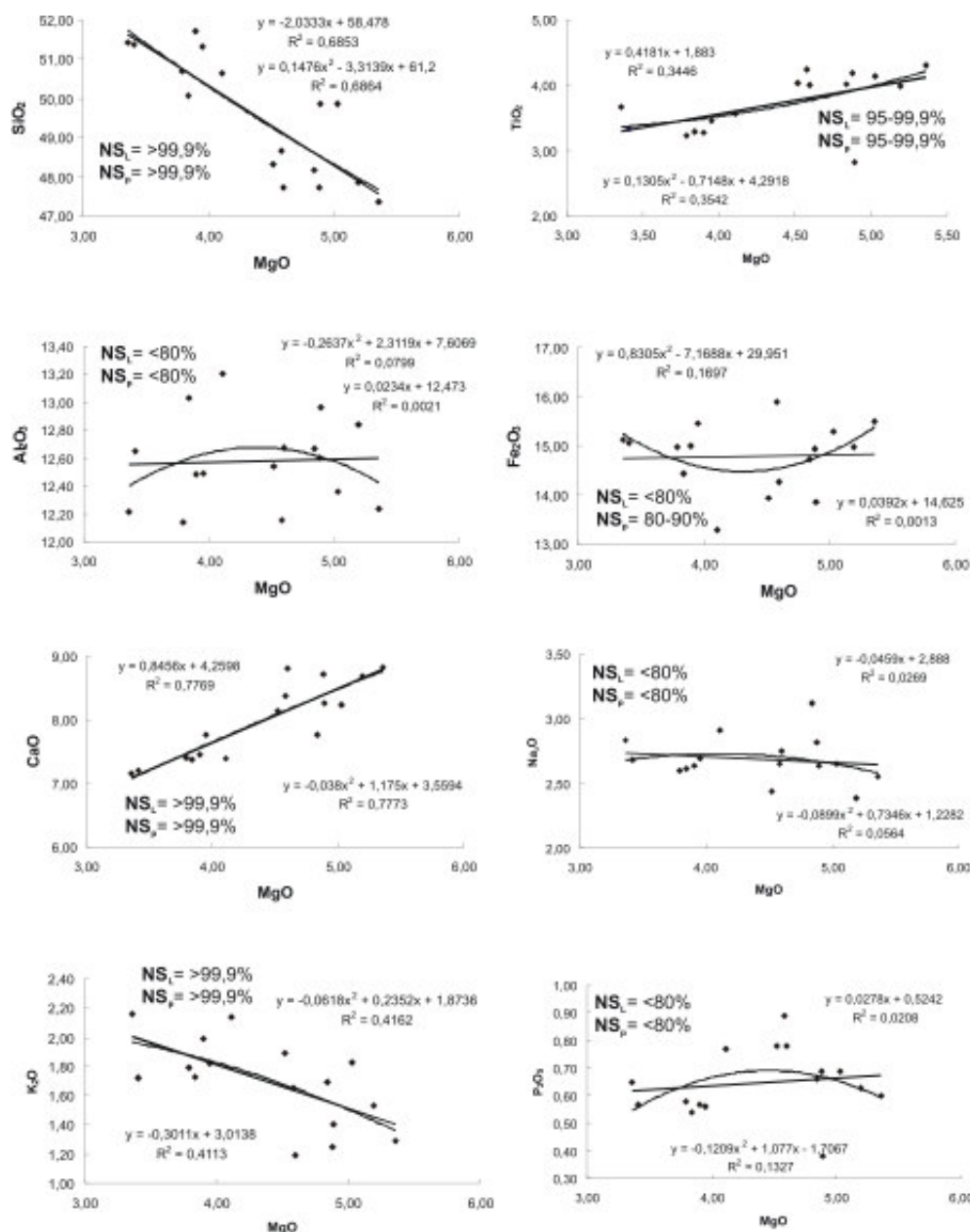
Os diagramas de variação, tendo MgO como índice de diferenciação, apresentam funções lineares e curvilineares, sem intervalos composicionais, indicativas de processos de evolução magmática por cristalização fracionada ou AFC (*Assimilation and Fractional Crystallisation*). Os valores similares dos níveis de significância lineares e polinomiais permitem sugerir que os processos evolutivos não envolveram mudança na assembléia fracionante (Figura 9). A análise dos diagramas para óxidos (Figura 9) permite sugerir, tentativamente, as assembléias fracionantes. O decréscimo da curva linear entre, aproximadamente, 3,30% peso e 5,50% peso de MgO indica um único estágio de cristalização. O decréscimo nos teores de MgO, CaO e TiO<sub>2</sub> sugerem o fracionamento de olivina, plagioclásio e piroxênio mais rico em titânio (p.ex.: augita titanífera). Há ainda o decréscimo nos teores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> que pode ser atribuído ao fracionamento de apatita, que comumente ocorre como inclusões em plagioclásios durante a cristalização de magmas basálticos. Entretanto, além de apresentar níveis de significância

lineares abaixo de 80%, o P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> também possui níveis de significância polinomiais igualmente baixos. Logo, há marcante dispersão para este óxido. Similarmente a suíte de baixo-TiO<sub>2</sub>, a proposição de uma assembléia fracionante envolvendo olivina é uma tarefa difícil, uma vez que os teores de MgO das rochas basálticas de alto-TiO<sub>2</sub> (Tabela 1) indicam o caráter evoluído da referida suíte. A petrografia não revelou a presença de olivina como uma fase possível em uma assembléia de fenocristais nas rochas estudadas. Portanto, com base nas análises e interpretações feitas acima, a assembléia fracionante mais provável para o processo de cristalização dos basaltos de alto-TiO<sub>2</sub> da área estudada são plagioclásio e piroxênio rico em titânio.

Variações das razões de elementos-traço incompatíveis acima de 50% (Tabela 4) indicam que o processo evolutivo mais provável para suíte de alto-TiO<sub>2</sub> é AFC (*Assimilation and Fractional Crystallisation*). Por exemplo, o valor mínimo da razão La/Yb dentre as rochas basálticas pertencentes a suíte de alto-TiO<sub>2</sub> da área de estudo é 10,4, enquanto que o valor máximo é 20,6 (Tabela 4). Isto representa uma variação de cerca de 100%. Logo, esta suíte não poderia evoluir por cristalização fracionada. Em contrapartida, o processo

evolutivo de AFC é capaz de gerar uma variação de razões de elementos-traço

dentro de uma mesma suíte acima de 50%.



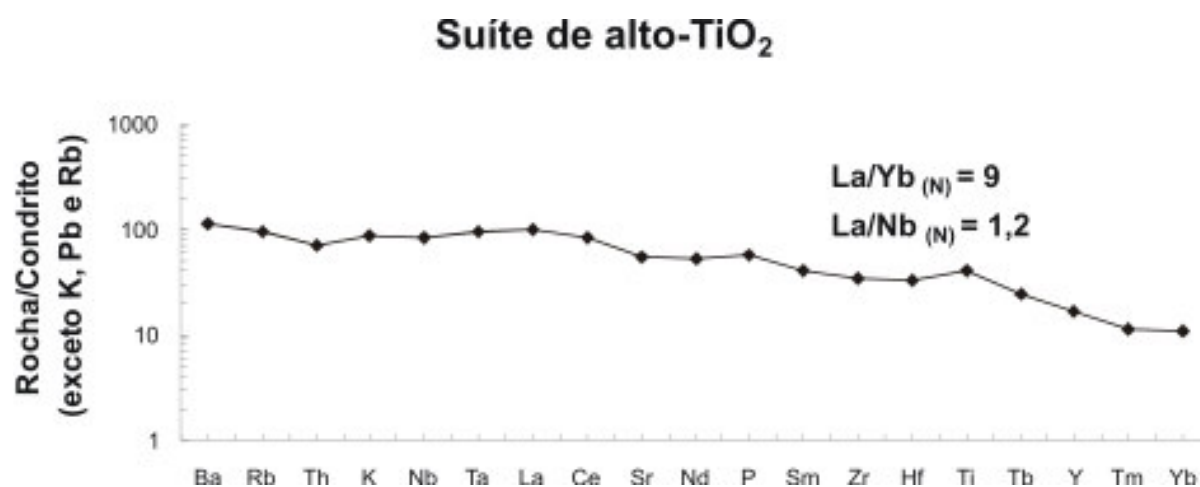
**Figura 9:** Diagramas de variação para MgO para óxidos discriminantes de processos evolutivos para a suíte de alto-TiO<sub>2</sub> da área estudada. As curvas lineares e polinomiais, suas respectivas equações, quadrados dos coeficientes de correlação (R<sup>2</sup>) e níveis de significância (NS) são mostrados no diagrama.

**Tabela 4:** Variação da razão entre elementos-traço incompatíveis imóveis dentro da suíte de alto-TiO<sub>2</sub>.

| Amostras | La/Yb | La/Nb | Zr/Y | Zr/Nb | Y/Nb | Ba/Rb |
|----------|-------|-------|------|-------|------|-------|
| TM-SV-4  | 10,4  | 1,6   | 6,0  | 12,4  | 2,0  | 11,6  |
| SMM-SV-2 | 12,8  | 1,2   | 7,2  | 8,9   | 1,2  | 10,7  |
| RN-SV-1E | 13,0  | 1,3   | 7,1  | 9,1   | 1,3  | 10,2  |
| AN-SV-3  | 12,0  | 1,2   | 7,0  | 10,1  | 1,4  | 11,2  |
| RN-SV-1A | 13,0  | 1,4   | 6,6  | 9,0   | 1,4  | 31,2  |
| RN-SV-1D | 13,1  | 1,6   | 6,9  | 11,2  | 1,6  | 11,6  |
| AN-SV-1  | 17,0  | 1,7   | 7,2  | 11,2  | 1,6  | 13,2  |
| VL-SV-2  | 13,8  | 1,6   | 7,3  | 11,6  | 1,6  | 10,7  |
| TM-SV-2  | 13,6  | 1,3   | 5,7  | 8,1   | 1,4  | 12,4  |
| TR-SV-1A | 17,9  | 1,4   | 7,7  | 8,1   | 1,1  | 19,6  |
| PS-SV-3  | 14,6  | 1,2   | 7,3  | 8,8   | 1,2  | 12,0  |
| DB-SV-3  | 20,6  | 1,2   | 8,1  | 7,2   | 0,9  | 14,2  |
| CO-SV-3  | 13,1  | 1,6   | 7,0  | 11,7  | 1,7  | 11,5  |
| DB-SV-5  | 15,0  | 1,6   | 6,8  | 10,7  | 1,6  | 18,9  |
| DB-SV-2  | 14,3  | 1,5   | 6,9  | 10,9  | 1,6  | 15,2  |
| DB-SV-6  | 13,9  | 1,1   | 7,2  | 8,0   | 1,1  | 13,2  |

A discriminação de prováveis fontes foi feita com base na análise do padrão da amostra parental (DB-SV-6) em diagrama de variação multi-elementar, onde foram plotados elementos incompatíveis e elementos

terras raras (Figura 10). As razões  $La/Yb_{(N)}$  (9) e  $La/Nb_{(N)}$  (1,2) da amostra parental indicam pelo menos uma contribuição do manto litosférico subcontinental na geração dos basaltos da suíte de baixo- $TiO_2$  na área estudada.



**Figura 10:** Concentrações de elementos-traço da amostra parental DB-SV-6 da suíte de alto- $TiO_2$  da área de estudo plotadas num diagrama de variação multi-elementar normalizado para condrito (Thompson, 1982; Sun, 1980 e Hawkesworth *et al.*, 1984).

## CONCLUSÕES

O estudo dos diabásios aflorantes nas porções centro-norte e nordeste do Enxame de Diques da Serra do Mar revelou que estes basaltos são do tipo transicional, de afinidade toleítica. Os diabásios da porção centro-norte do referido enxame apresentam coloração fortemente rosada dos grãos de augita e, portanto, a sua composição é possivelmente rica em titânio, o que já foi observado em diabásios de alto- $TiO_2$  de outras partes do enxame (Corval, 2005).

Os xenocristais de plagioclásio observados nos diabásios da porção nordeste do enxame podem ser oriundos das rochas encaixantes ortognáissicas, o que sugere que estes líquidos podem ter estado envolvidos em processos de assimilação (com ou sem cristalização fracionada concomitante). Alternativamente, os xenocristais podem também ter resultado de reequilíbrio decorrente de processos de realimentação ocorridos em câmaras magmáticas ou nos próprios

condutos dos diques. Finalmente, as freqüentes formas anédricas dos minerais opacos dos diabásios nos dois setores estudados neste trabalho foram interpretadas como resultantes de processos *subsolidus*. Os minerais opacos incluem grãos de augita uralitizados e grãos de plagioclásio saussuritizados, mostrando que os processos *subsolidus* foram muito tardios.

De acordo com os dados litogeoquímicos, as amostras de diabásios estudadas neste trabalho foram discriminadas em duas suítes: uma predominantemente de alto- $TiO_2$  e outra de baixo- $TiO_2$ , de ocorrência mais restrita. Tais resultados implicam, necessariamente, na provincialidade geoquímica do Enxame de Diques da Serra do Mar, à semelhança do que ocorre, por exemplo, em Paraná-Etendeka, conforme Peate (1997). Trabalhos recentes de Valente *et al.* (1998), Tetzner (2002), Corval (2005) e Dutra (2006) já têm apontado para a marcante provincialidade geoquímica do referido enxame. Entre-



tanto, é de grande valia ressaltar a ocorrência de um diabásio de baixo-TiO<sub>2</sub> (amostra CO-SV-1) na região de Cordeiro, localizada na porção centro-norte do enxame, amplamente dominada por diques de alto-TiO<sub>2</sub>. A menos de seis quilômetros de distância deste diabásio de baixo-TiO<sub>2</sub>, há um dique de alto-TiO<sub>2</sub> (CO-SV-3). As outras quatro amostras de baixo-TiO<sub>2</sub> estudadas neste trabalho estão localizadas nas folhas Conceição de Macabu e Santa Maria Madalena, regiões em que já é reconhecida uma suíte tipicamente de baixo-TiO<sub>2</sub>: a suíte Serrana, definida e estudada por Monteiro & Valente (2003) e Corval (2005). Em contrapartida, dentre as dezesseis amostras de alto-TiO<sub>2</sub> apresentadas neste trabalho, há quatro que ocorrem nas regiões de Renascença, Trajano de Moraes e Santa Maria Madalena. Ou seja, tais amostras caracterizadas como de alto-TiO<sub>2</sub>, afloram dentro de uma região onde os diques de baixo-TiO<sub>2</sub> são predominantes. Este cenário implica em uma marcante provincialidade geoquímica, em escala local, dentro do Enxame de Diques da Serra do Mar, suscitando a discussão sobre a possibilidade de as diferentes suítes de alto-TiO<sub>2</sub> e baixo-TiO<sub>2</sub> discriminadas no enxame serem relacionadas a diferentes terrenos tectônicos do Orógeno Ribeira. Isto implicaria que o processo de amalgamação do Gondwana no Neoproterozóico-Cambriano não teria sido puramente crustal, mas envolveria também o manto litosférico subcontinental, conforme Valente *et al.* (2005b) sugeriram recentemente.

As concentrações de elementos maiores (Tabela 1) e as razões entre elementos-traço incompatíveis das amostras parental e mais evoluída da suíte de baixo-TiO<sub>2</sub> da área de estudo indicam cristalização fracionada com mudança de assembléia de fracionante como processo evolutivo mais provável. Em contrapartida, as variações das razões entre elementos-traço incom-

patíveis dos diabásios da predominante suíte de alto-TiO<sub>2</sub> da área de estudo indicam AFC como processo evolutivo mais provável. Estes dados petrogenéticos dão suporte à hipótese levantada com base no estudo petrográfico, que sugere que a presença de xenocristais de plagioclásio na porção nordeste do referido enxame estaria relacionada a processos de assimilação. A similaridade entre os níveis de significância polinomiais e lineares indica que não houve mudança de assembléia fracionante. As razões La/Yb<sub>(N)</sub> e La/Nb<sub>(N)</sub> maiores que a unidade para ambas as suítes sugerem a contribuição de fontes enriquecidas na geração dos basaltos dos setores centro-norte e nordeste do Enxame de Diques da Serra do Mar.

#### **AGRADECIMENTOS**

Artur Corval é bolsista CAPES do Programa de Pós-graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis da FGEL-UERJ e agradece às referidas instituições por todo suporte oferecido pelas mesmas. Sérgio Valente e Beatriz Duarte são bolsistas de produtividade científica do CNPq. Natália Famelli é bolsista CNPq do Programa de Pós-graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis da FGEL-UERJ. Marcela Zanon foi bolsista PIBIC-UFRuralRJ-CNPq/2007-8. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo projeto Rife de Santos da Rede de Tecnologia em Geotectônica da PETROBRAS (0050.0022710.06.4). Os autores também são gratos às sugestões e críticas feitas pelos revisores anônimos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BELLIENI, G.; COMIN-CHIARAMONTI, P.; MARQUES, L.S.; MELFI, A.J.; PICCIRILLO, E.M.; NARDY, A.J.R.; ROSEMBERG, A. (1983). High- and low-TiO<sub>2</sub> flood basalts from the Paraná plateau (Brazil): petrology and geochemical aspects bearing on their mantle origin. *Neues Jahrbuch Fur Mineralogie-Abhandlungen*, **150**: 273-306.
- CORVAL, A. (2005). Petrogênese das suítes basálticas toleíticas do Enxame de Diques da Serra do Mar nos setores central e norte do estado do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado, UERJ, 92p.
- COX, K.G.; BELL, J.D.; PANKHURST, R.J. (1979). The interpretation of igneous rocks. George Allen & Unwin, London, 450p.
- DUTRA, T. (2006). Petrogênese dos basaltos de baixo-TiO<sub>2</sub> do Enxame de Diques da Serra do Mar na Região dos Lagos, RJ. Dissertação de Mestrado, UERJ, 111p.
- GUEDES, E.; HEILBRON, M.; VASCONCELOS, P.; VALERIANO, C.M.; ALMEIDA, J.C.H.; TEIXEIRA, W.; THOMAZ FILHO, A. (2005). K-Ar and Ar-Ar ages of dikes emplaced in the onshore basement of Santos Basin, Resende Area, SE, Brazil: Implications for the South Atlantic opening and a Tertiary reactivation. *Journal of South American Earth Sciences*, **18**:145-178.
- HAWKESWORTH, C.J.; MARSH, J.S.; DUNCAN, A.R.; ERLANK, A.J.; NORRY, M.J. (1984). 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, **13**: 341-354.
- HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A.C.; CAMPOS NETO, M.C.; SILVA, L.C.; TROW, R.A.J.; JANASI, V.A. (2004). Província Mantiqueira. In: Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C.D.R.; Brito-Neves, B.B. (eds.), Livro Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Editora Beca, São Paulo, p. 203-234.
- HERGT, J.M.; PEATE, D.W.; HAWKESWORTH, C.J. (1991). The petrogenesis of Mesozoic Gondwana low-Ti flood basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, **105**: 134-148.
- IRVINE, T.N. & BARAGAR, W.R.A. (1971). A guide to the chemical classification of common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **8**: 523-547.
- LEMAITRE, R.W. (1989). A classification of igneous rocks and glossary of terms. (Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks). Blackwell, Oxford, 193p.
- MARQUES, L.S. & ERNESTO, M. (2004). O magmatismo Toleítico da Bacia do Paraná. In: Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C.D.R.; Brito-Neves, B.B. (eds.), Livro Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida: São Paulo, Editora Beca, primeira edição, p. 245-263.
- MONTEIRO, H.L.J. & VALENTE, S.C. (2003). Estudo Petrológico comparativo das suítes de baixo-TiO<sub>2</sub> do Enxame de Diques da Serra do Mar: Jornada de Iniciação Científica, UFRuralRJ, Seropédica, 2003, p. 54-55.
- PEATE, D.W. (1997). The Paraná-Etendeka province. In: Mahoney, J.J.; Coffin, M.F. (eds.), Large igneous provinces: continental, oceanic and planetary flood volcanism. American Geophysical Union, Washington, DC, p. 217-245.
- SCHMITT, R.S.; TROUW, R.A.J.; VAN SCHMUS, W.R.; PIMENTEL, M.M. (2004). Late amalgamation in the central part of West Gondwana: new geochronological data and the characterization of a Cambrian collisional orogeny in the Ribeira Belt (SE Brazil). In: Precambrian Research, **133**: 29-61.
- SUN, S.S. (1980). Lead isotopic study of young volcanic rocks from mid-ocean ridges,

***Geochimica Brasiliensis*, 22(3) 159-177, 2008**

- ocean islands and island arcs. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **A297**: 409-445.
- TETZNER, W. (2002). Tectônica, petrografia e geoquímica dos diques toleíticos do Cabo de Búzios (RJ). Dissertação de Mestrado, UERJ, 88p.
- THOMPSON, R.N. (1982). Magmatism of the British Tertiary volcanic province, *Scottish Geologist*, **18**: 49-107.
- TURNER, S.; REGELOUS, M.; KELLEY, S.; HAWKESWORTH, C.; MANTOVANI, M. (1994). Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology: *Earth and Planetary Science Letters*, **121**: 333-348.
- VALENTE, S.C. (1997) Geochemical and isotopic constraints on the petrogenesis of the Cretaceous dykes of Rio de Janeiro, Brazil. Tese de Doutorado, The Queen's University of Belfast, 366p.
- VALENTE, S.C.; ELLAM, R.L.; MEIGHAN, I.G.; FALLICK, A.E. (1998). Geoquímica isotópica, modelo geodinâmico e petrogênese dos diabásios do Cretáceo Inferior no Enxame de Diques Máficos da Serra do Mar (EDSM) na área do Rio de Janeiro, RJ. *Boletim de Resumos do 40º Congresso Brasileiro de Geologia*, Belo Horizonte, SBG, 1998, p. 471.
- VALENTE, S.C.; DUARTE, B.P.; HEILBRON, M.; ALMEIDA, J.C.H.; VALLADARES, C.S.; GUEDES, E.; TETZNER, W.; LOBO, J.; CORVAL, A.; DUTRA, T.; SOARES, L.H.; SOUZA, F.M.; VINHA, J.; FAMELLI, N. (2005a). Mapa do Enxame de Diques da Serra do Mar. 3º Simpósio de Vulcanismo e Ambientes Associados. SBG-RJ, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, p. 207-211.
- VALENTE, S.C.; DUARTE, B.P.; HEILBRON, M.; CORVAL, A.; VALLADARES, C.; ALMEIDA, J.C.H.; GUEDES, E. (2005b). Provincialidade geoquímica do Enxame de Diques da Serra do Mar e domínios tectônicos do Orógeno Ribeira: o Cretáceo como uma janela para o Proterozóico. In: SBG-PR, 10º Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos e 7º International Symposium on Tectonics, *Boletim de Resumos* p. 283-285.
- VALENTE, S.C.; CORVAL, A.; DUARTE, B.P.; ELLAM, R.B.; FALLICK, A.E.; DUTRA, T. (2007). Tectonic boundaries, crustal weakness zones and plume-subcontinental lithospheric mantle interactions in the Serra do Mar Dyke Swarm, SE Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **37**: 194-201.
- WILSON, M. (1989) *Igneous petrogenesis: a global tectonic approach*. Longmans, London. 458p.
- WINCHESTER, J.A. & FLOYD, P.A. (1977). Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, **20**: 325-343.