



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA

# **AS ROCHAS VULCÂNICAS DA ILHA SÃO JORGE, AÇORES (PORTUGAL): PETROGRAFIA E GEOQUÍMICA**

Karoline Ferreira da Silva Mecnas

Orientadora: Prof. Dra. Adriane Machado

## **DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Programa de Pós-Graduação em Geociências e Análise de Bacias

São Cristóvão-SE  
2019

Karoline Ferreira da Silva Mecnas

**AS ROCHAS VULCÂNICAS DA ILHA SÃO JORGE, AÇORES  
(PORTUGAL): PETROGRAFIA E GEOQUÍMICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências e Análise de Bacias da Universidade Federal de Sergipe, como requisito para obtenção do título de Mestre em Geociências.

**Orientadora:** Prof. Dra. Adriane Machado

São Cristóvão–SE  
2019

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

M486r Mecenas, Karoline Ferreira da Silva  
As rochas vulcânicas da Ilha São Jorge, Açores (Portugal) :  
petrografia e geoquímica / Karoline Ferreira da Silva Mecnas ;  
orientadora Adriane Machado. – São Cristóvão, SE, 2019.  
64 f. : il.

Dissertação (mestrado em Geociências e Análise de Bacias) –  
Universidade Federal de Sergipe, 2019.

1. Geociências. 2. Petrologia. 3. Geoquímica. 4. Vulcanismo. 5.  
Geocronologia. 6. Basalto – São Jorge, Ilha de (Açores). I.  
Machado, Adriane, orient. II. Título.

CDU 552.313(469.9)

# **AS ROCHAS VULCÂNICAS DA ILHA SÃO JORGE, AÇORES (PORTUGAL): PETROGRAFIA E GEOQUÍMICA**

por:

**Karoline Ferreira da Silva Mecnas**

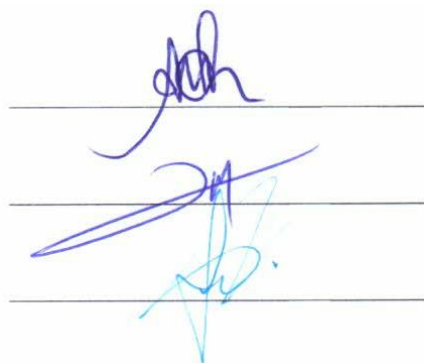
(Geóloga, Universidade Federal de Sergipe – 2016)

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Submetida em satisfação parcial dos requisitos ao grau de:

**MESTRE EM GEOCIÊNCIAS**

**BANCA EXAMINADORA:**

Three handwritten signatures in blue ink are positioned over three horizontal lines. The first signature is at the top, the second in the middle, and the third at the bottom. The signatures are stylized and cursive.

Dra. Adriane Machado [Orientadora – PGAB/UFS]

Dr. Herbet Conceição [UFS]

Dr. Luiz Alberto Vedana [UFS]

Data Defesa: 30/01/2019.

Dedico esta dissertação a minha mãe, Fátima,  
por ter me proporcionado educação suficiente  
para formar a pessoa que sou hoje.

“Quero saber como Deus criou este mundo.  
Não estou interessado neste ou naquele  
fenômeno, ou no espectro deste ou daquele  
elemento. Quero conhecer seus pensamentos,  
o resto são detalhes.”  
(Albert Einstein).

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por escolher o mestrado para a minha vida e por guiar o meu caminho até a conclusão desta grande trajetória.

À minha mãe, Fátima, por todo amor e cuidado diários.

Ao meu namorado, Alan, pela força, ajuda e companhia em todos os momentos, na UFS e fora dela. Não tenho palavras para expressar toda a minha gratidão. Estendo também os meus agradecimentos à minha sogra, pelo apoio e por me receber tão bem.

Aos meus amigos do “Terreiro do Galo Velho”, aos da “República”, a Jéssika, a Caio e a Bulandeira, pela torcida, incentivo e por não me deixarem desistir.

Aos meus amados amigos e grandes incentivadores, Cris e Luiz Henrique, por tudo que fizeram e fazem por mim sempre! Vocês foram fundamentais para eu chegar até aqui.

Aos chefes, supervisores e colegas de trabalho que não mediram esforços para eu não perder as aulas e conseguir estudar em datas importantes.

À minha orientadora, professora Adriane (que eu tanto admiro), por confiar e acreditar em mim, mesmo diante dos obstáculos. Obrigada pelos ensinamentos, dedicação, paciência, atenção e por me acalmar quando mais precisei. A paz e a tranquilidade que você sempre me transmitiu foram essenciais!

Aos meus colegas mestrandos, especialmente a Cássio, agradeço pelas caronas, convivência e conhecimentos compartilhados.

À Universidade Federal de Sergipe e ao Programa de Pós-Graduação em Geociências e Análise de Bacias, pela infraestrutura disponibilizada e pela oportunidade de desenvolver esta dissertação.

Ao Departamento de Geologia da UFS, pela disponibilização do laboratório de microscopia e lupas.

Aos técnicos Hélio e Iara, bem como a Wilker, por terem sido solícitos e atenciosos.

Enfim, a todos que contribuíram na elaboração desta pesquisa.

Serei eternamente grata!

## RESUMO

A Ilha São Jorge faz parte do Grupo Central do Arquipélago dos Açores (Portugal), que está situado próximo à junção tríplice, entre as placas litosféricas Norte-Americana, Euro-Asiática e Africana, na região do Atlântico Norte. O vulcanismo nesta ilha é do tipo fissural, com a orientação preferencial WNW-ESE, o que revela a importância do controle tectônico durante a atividade vulcânica. O vulcanismo estudado é influenciado pela interação entre o *Hotspot* dos Açores e a Cordilheira Meso-Atlântica. A vulcanoestratigrafia da ilha é composta por três complexos vulcânicos denominados Topo (leste da ilha), Rosais (oeste da ilha) e Manadas (centro da ilha). Segundo Ribeiro (2011), a idade geocronológica mais antiga relatada para a Ilha São Jorge é  $1,3 \pm 0,0035$  Ma ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ). Com base em dados petrográficos, as rochas da ilha apresentam granulometria média a fina, texturas porfírica, microporfírica, glomeroporfírica, intergranular, pilotaxítica, traquítica e intersertal. De acordo com dados geoquímicos, as rochas foram classificadas como basanitos (4,9-12,2% de olivina, 4,6-23,2% de augita, 5,4-8,3% de plagioclásio, 0-0,3% de minerais opacos e 59,2-81,9% de matriz), basaltos alcalinos (0,6-3,3% de olivina, 0-3,5% de augita, 6,3-17,5% de plagioclásio, 0-1,2% de kaersutita, 0-1,8% de minerais opacos e 79,2-88,2% de matriz) e hawaítos (0-5,6% de olivina, 0-3,2% de augita, 0-22,2% de plagioclásio, 0-1,1% de kaersutita, 0-1,6% de minerais opacos e 69-99,7% de matriz). A matriz apresenta composição mineralógica semelhante à composição dos fenocristais (olivina, augita, plagioclásio, kaersutita e minerais opacos), além de vidro vulcânico e vesículas com formas arredondadas e alongadas. Texturas de reabsorção, embainhamento, bordas de reação e zonação são feições comuns nos fenocristais das rochas estudadas e indicam que o magma sofreu descompressão rápida, com variação brusca de temperatura e pressão. Os padrões de elementos-traço mostram enriquecimento em LILE e HFSE em relação aos ETRP. Os padrões de ETR apresentam enriquecimento em ETRL em comparação aos ETRP, com anomalia negativa de Eu. Os padrões são similares, com *trends* subparalelos, sugerem que as rochas foram geradas por baixas taxas de fusão parcial. As rochas apresentam afinidade alcalina sódica, sendo originadas a partir de um magma mantélico enriquecido. Os dados químicos são compatíveis com dados de magmas gerados em ambiente do tipo intraplaca oceânico (OIB).

**Palavras-chave:** Basaltos de Ilha Oceânica; Arquipélago dos Açores; Ilha São Jorge



## ABSTRACT

São Jorge Island is part of Central Group from Azores Archipelago (*Portugal*), which is located near the triple junction among North American, Euro-Asian and African lithospheric plates, in the North Atlantic region. The volcanism in that island is fissural type, with the preferential orientation WNW-ESE, which reveals the importance of the tectonic control during the volcanic activity. The studied magmatism is influenced by the interaction between the *Hotspot* of the Azores and the Meso-Atlantic Ridge. The island volcanostratigraphy is composed of three volcanic complexes named *Topo* (East of the island), *Rosais* (West of the island) and *Manadas* (center of the island). According to Ribeiro (2011), the oldest geochronological age reported for São Jorge Island is  $1.3 \pm 0.0035$  Ma ( $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ ). Based on petrographic data, the rocks of the island show medium to fine granulometry, porphyritic, microporphyritic, glomeroporphyritic, intergranular, pilotaxitic, trachytic and intersertal textures. According to geochemical data, rocks are classified as basanites (4.9-12.2% olivine, 4.6-23.2% augite, 5.4-8.3% plagioclase, 0-0.3% opaque minerals and 59.2-81.9% matrix), alkaline basalts (0.6-3.3% olivine, 0-3.5% augite, 6.3-17.5% plagioclase, 0-1, 2% kaersutite, 0-1.8% opaque minerals and 79.2-88.2% matrix) and hawaiites (0-5.6% olivine, 0-3.2% augite, 0- 22.2% plagioclase, 0-1.1% kaersutite, 0-1.6% opaque minerals and 69-99.7% matrix). The matrix presents mineralogical composition like phenocrysts composition (olivine, augite, plagioclase, kaersutite and opaque minerals), as well as volcanic glass and rounded-elongated vesicles. Reabsorption textures, sheathing, reaction edges and zonation are common features in the phenocrysts of the studied rocks. These features indicate that the magma underwent rapid decompression, with sudden variation of temperature and pressure. The trace element patterns show enrichment in LILE and HFSE relative to the ETRP. The ETR patterns present ETRL enrichment compared to ETRP, with Eu negative anomaly. These similar patterns, with subparallel trends suggest that the rocks were generated by low partial melting rates. The rocks show alkaline sodium affinity and were originated from an enriched mantle magma. The chemical data are compatible with data from magmas generated in an environment of oceanic intraplate type (OIB).

**Keywords:** Ocean Island Basalts; Azores Archipelago; São Jorge Island

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização e cenário geotectônico do Arquipélago dos Açores, mostrando a distribuição geográfica das nove ilhas, divididas em três grupos (Fonte: Ribeiro, 2011). Sobreposição em imagem de satélite (Fonte: <i>Google Earth</i> , 2018). ....	13
Figura 2: Localização geográfica da Ilha São Jorge: Arquipélago dos Açores, Atlântico Norte, em imagem de satélite (Fonte: <i>Aerial View – Big Maps</i> , 2018). ....	16
Figura 3: Principais estruturas tectônicas nas proximidades da junção tríplice (Fonte: Nunes, 1999). Sobreposição em imagem de satélite (Fonte: <i>Google Earth</i> , 2018). Cordilheira Meso-Atlântica (CMA); Rife da Terceira (RT); Zona de Fratura Norte dos Açores (ZFNA); a Zona de Fratura Faial-Pico (ZFFP); Zona de Fratura Banco Açor (ZFBA); Zona de Fratura Banco Princesa Alice (ZFBPA); Falha da Glória (FG); Transformante <i>Leaky</i> de São Jorge (TSJ). ..	23
Figura 4: Mapa vulcanoestratigráfico com a localização das amostras que foram utilizadas na elaboração deste trabalho. As unidades geológicas foram definidas por Forjaz & Fernandes, 1970 e 1975. ....	26
Figura 5: Afloramentos da Ilha São Jorge. A) Fluxo de lava do tipo <i>pahoehoe</i> B) Fluxo de lava do tipo “aa” .....	26
Figura 6: Aspectos microscópicos dos basanitos da Ilha São Jorge, luz polarizada. A) Augita maclada (SJ-01/08). B) Textura porfirítica, exibindo augita zonada (SJ-01/08). C) Plagioclásio com inclusão de vidro vulcânico (SJ-01/08). D) Vesícula arredondada em matriz pilotaxítica e intersertal (SJ-17/08) (Abreviaturas: Chace, 1956; Siivola & Schmid, 2007). ....	28
Figura 7: Aspectos microscópicos dos basaltos alcalinos da Ilha São Jorge. A) kaersutita com borda de reação de minerais opacos (SJ-03/08), luz natural polarizada. B) Olivina euédrica com bordas preenchidas por óxido de ferro (SJ-21/08), luz polarizada. C) Plagioclásio zonado, com textura / fina (SJ-03/08), luz polarizada. D) Plagioclásio com textura <i>sieve</i> grossa (SJ-19/08), luz polarizada. (Abreviaturas: Chace, 1956; Siivola & Schmid, 2007). ....	31
Figura 8: Aspectos microscópicos dos basaltos alcalinos na Ilha São Jorge. A) Augita com processo de epidotização (SJ- 12/08), luz polarizada. B) Textura glomeroporfirítica constituída por plagioclásio com inclusão de vidro vulcânico (SJ- 12/08), luz polarizada. C) Olivina fraturada (SJ- 21/08), luz natural polarizada. D) Augita com feição de reabsorção e inclusão de olivina com óxido de ferro (SJ- 21/08), luz polarizada. (Abreviaturas: Chace, 1956; Siivola & Schmid, 2007). ....	31
Figura 9: Aspectos microscópicos dos hawaítos da Ilha São Jorge. A) Matriz com textura pilotaxítica e intersertal (SJ-02/08), luz polarizada. B) Matriz com textura traquítica, intersertal e intergranular (SJ-04/08), luz polarizada. C) Olivina com embainhamento nas bordas e oxidação (SJ-05/08), luz natural polarizada. D) Augita com processo de epidotização (SJ-10/08), luz polarizada (Abreviaturas: Chace, 1956; Siivola & Schmid, 2007). ....	33
Figura 10: Aspectos microscópicos dos hawaítos da Ilha São Jorge. A) Olivina maclada (SJ-10/08), luz polarizada. B) Kaersutita com borda de reação de minerais opacos (SJ-11/08), luz natural polarizada. C) Plagioclásio com embainhamento nas bordas (SJ-11/08), luz polarizada.	

D) Olivina com porções oxidadas e presença de boulingita nas fraturas (SJ-15/08), luz polarizada (Abreviaturas: Chace, 1956; Siivola & Schmid, 2007). ..... 34

Figura 11: Aspectos microscópicos dos hawaítos da Ilha São Jorge, luz polarizada. A) Augita com macla (SJ-15/08). B) Plagioclásio com de textura *sieve* fina (SJ-15/08). C) Plagioclásio euédrico zonado (SJ-16/08). D) Textura glomeroporfirítica composta por augita, plagioclásio e minerais opacos (SJ16/08) (Abreviaturas: Chace, 1956; Siivola & Schmid, 2007). ..... 34

Figura 12: Diagrama Total-Álcalis *versus* Sílica (TAS – Middlemost, 1994). As rochas da Ilha São Jorge traçam acima do limite de alcalinidade (linha tracejada vermelha) definida por MacDonald (1968). A classificação de rochas está presente no diagrama, mas é necessário considerar critérios de subclassificação para cada campo: o tefrito tem ol < 10% e o basanita apresenta ol > 10%. O traquibasalto é subdividido em hawaíto e traquibasalto potássico, como mostra o quadro acima. Segundo esses critérios, as rochas desse trabalho foram classificadas como basanitos e hawaítos. .... 35

Figura 13: Diagrama K<sub>2</sub>O *versus* Na<sub>2</sub>O (Middlemost, 1975) que mostra a natureza sódica das rochas efusivas da Ilha São Jorge. .... 38

Figura 14: Diagramas do tipo *Harker* de variação de elementos maiores e menores (% em peso) *versus* MgO (% em peso), para as rochas efusivas da Ilha São Jorge. .... 39

Figura 15: Diagramas do tipo *Harker* de variação de elementos traço (ppm) *versus* MgO (% em peso), para as rochas efusivas da Ilha São Jorge. .... 40

Figura 16: Diagrama multi-elementar de elementos-traço das rochas efusivas da Ilha São Jorge, normalizados pelo manto primitivo (Sun & McDonough, 1989). .... 41

Figura 17: Diagrama multi-elementar de elementos terras raras das rochas efusivas da Ilha São Jorge, normalizados para os valores do condrito (Sun & McDonough, 1989). .... 41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Análises químicas de rocha total das basanitos e basaltos alcalinos da Ilha São Jorge (elementos maiores e menores em % peso; traços e terras raras em ppm). CVM = Complexo Vulcânico Manadas; CVR = Comp. Vul. Rosais; CVT = Comp. Vul. Topo; P.F. = Perda ao Fogo; n.d. = não determinado. .... 36

Tabela 2: Análises químicas de rocha total dos hawaítos da Ilha São Jorge (elementos maiores e menores em % peso; traços e terras raras em ppm). CVM = Complexo Vulcânico Manadas; CVR = Comp. Vul. Rosais; CVT = Comp. Vul. Topo; P.F. = Perda ao Fogo; n.d. = não determinado. .... 37

## LISTA DE SIGLAS

ACME - *Acme Analytical Laboratories Ltd.*  
ACTLABS - *Activation Laboratories Ltd.*  
Aug - Augita  
CMA - Cordilheira Meso-Atlântica  
CVM – Complexo Vulcânico Manadas  
CVR – Complexo Vulcânico Rosais  
CVT - Complexo Vulcânico Topo  
DMM - MORB de Manto Empobrecido  
EM - Manto Enriquecido  
ETR – Elementos Terras Raras  
ETRL – Elementos Terras Raras Leves  
ETRP – Elementos Terras Raras Pesados  
FG - Falha da Glória  
Gls – Vidro vulcânico  
HFSE - Elementos de alto potencial iônico  
HIMU - Alto  $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$   
ICP - Plasma por acoplamento indutivo  
ICP-MS – Espectrometria de massa por plasma acoplado indutivamente  
ID – Índice de Diferenciação  
JT – Junção Tríplice  
Krs - Kaersutita  
LILE - Elementos litófilos de grande raio iônico  
MORB – Basaltos de Cordilheira Meso-Oceânica  
n.d. – não determinado  
OIB - Basaltos de Ilha Oceânica  
Ol – Olivina  
Op - Opacos  
P.F. – Perda ao Fogo  
Pl - Plagioclásio  
RT - Rifte da Terceira  
TAP – Transportes Aéreos Portugueses  
TAS - Total Álcalis *versus* Sílica  
TSJ - Transformante *Leaky* de São Jorge  
UFS - Universidade Federal de Sergipe  
UTM – Universal Transversa de Mercator  
Vs – Vesícula  
ZFNA - Zona de Fratura Norte dos Açores  
ZFFP - Zona de Fratura Faial-Pico  
ZFBA - Zona de Fratura Banco Açor  
ZFBPA - Zona de Fratura Banco Princesa Alice  
WGS – Sistema Geodésico Mundial

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1. APRESENTAÇÃO.....	13
1.2. OBJETIVOS.....	15
1.2.1. Geral .....	15
1.2.2. Específicos .....	15
1.3. LOCALIZAÇÃO E ACESSO DA ÁREA.....	15
1.4. MÉTODOS DE TRABALHO .....	16
1.4.1. Levantamento Bibliográfico.....	16
1.4.2. Trabalho de Campo .....	16
1.4.3. Petrografia .....	17
1.4.4. Geoquímica.....	17
1.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	17
<b>CAPÍTULO 2 – AS ROCHAS VULCÂNICAS DA ILHA SÃO JORGE, AÇORES (PORTUGAL): PETROGRAFIA E GEOQUÍMICA .....</b>	<b>19</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
<b>GEOLOGIA REGIONAL .....</b>	<b>22</b>
<b>GEOLOGIA LOCAL.....</b>	<b>24</b>
<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>27</b>
<b>RESULTADOS.....</b>	<b>27</b>
<b>PETROGRAFIA .....</b>	<b>27</b>
Basanitos.....	28
Basaltos alcalinos.....	29
Hawaítos .....	32
<b>GEOQUÍMICA.....</b>	<b>35</b>
<b>DISCUSSÕES .....</b>	<b>42</b>
<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>45</b>
<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>46</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>47</b>
<b>CAPÍTULO 3 – CONCLUSÕES.....</b>	<b>50</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>52</b>

<b>ANEXO 1: Condições para submissão de artigo científico na Revista Geociências da UNESP (Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho) de Rio Claro ....</b>	<b>53</b>
<b>ANEXO 2: Comprovante de submissão do artigo científico .....</b>	<b>58</b>
<b>ANEXO 3: Justificativa de coautorias do artigo científico .....</b>	<b>59</b>
<b>APÊNDICE 1 .....</b>	<b>60</b>
<b>APÊNDICE 2 .....</b>	<b>61</b>

## **CAPÍTULO 1 – Introdução**



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. APRESENTAÇÃO

Os basaltos de ilhas oceânicas (*Ocean Island Basalt* – OIB) provenientes de plumas mantélicas são importantes, porque possibilitam obter informações sobre a convecção do manto e reciclagem de material litosférico (Beier, *et al.*, 2010), uma vez que a química e a composição isotópica refletem a composição da fonte (Krienitz, *et al.*, 2012).

O Arquipélago dos Açores é composto por nove ilhas: Santa Maria e São Miguel (Grupo Oriental); Pico, Faial, São Jorge, Terceira e Graciosa (Grupo Central); e Flores e Corvo (Grupo Ocidental) (Figura 1). Este arquipélago localiza-se em uma região formada pela junção tríplice (JT), entre as placas Norte-Americana, Euro-Asiática e Africana, nas proximidades da Cordilheira Meso-Atlântica (CMA) (Figura 1) (Larrea *et al.*, 2014).

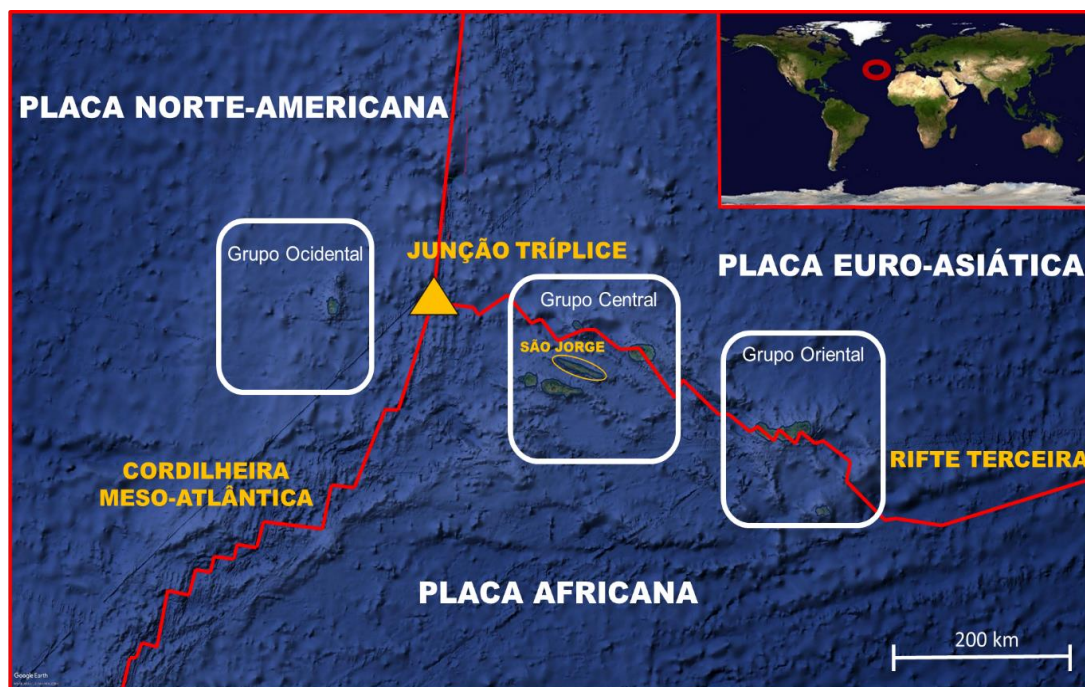


Figura 1: Localização e cenário geotectônico do Arquipélago dos Açores, mostrando a distribuição geográfica das nove ilhas, divididas em três grupos (Fonte: Ribeiro, 2011). Sobreposição em imagem de satélite (Fonte: Google Earth, 2018).

As lavas do Arquipélago dos Açores apresentam extrema heterogeneidade isotópica e de elementos incompatíveis, com grandes variações observadas entre as ilhas (Beier *et al.*, 2012). Consequentemente, o vulcanismo dos Açores oferece uma oportunidade de estudar as características heterogêneas do manto e a relação com a temperatura (Beier *et al.*, 2012).

França *et al.* (2005) corroboram a hipótese da existência de uma pluma mantélica na região dos Açores, com base em dados isotópicos. Esses autores atestam que as lavas teriam

assinaturas predominantes de HIMU (alto  $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ ), DMM (MORB de manto empobrecido) e EM (manto enriquecido).

O *Hotspot* dos Açores está localizado a sudeste da JT, a 100 km de distância, sob a Placa Africana, próximo às ilhas Faial e Pico (Georgen, 2011).

As lavas do Arquipélago dos Açores são essencialmente basálticas, embora ocorram com menor representatividade, rochas de natureza ácida (França *et al.*, 2005).

A Ilha São Jorge está entre as cinco ilhas que formam o Grupo Central do Arquipélago dos Açores (Larrea *et al.*, 2018). Esta ilha está situada na região da JT, entre as placas Norte-Americana, Euro-Asiática e Africana, a aproximadamente 200 km a leste da CMA (Millet *et al.*, 2009). Três sistemas vulcânicos foram descritos na Ilha São Jorge, os quais foram designados por Topo, Rosais e Manadas (Forjaz & Fernandes, 1970, 1975). O Sistema Topo é a unidade mais antiga e está inserida em toda a porção leste da ilha. O Sistema Vulcânico Rosais está exposto na parte oeste da ilha. Manadas é o sistema mais jovem, composto por diversos cones vulcânicos recentes (Hildenbrand *et al.*, 2008).

As lavas da Ilha São Jorge são todas alcalinas, variando de picrobasaltos a mugearitos, e por vezes, basaltos (Ribeiro, 2011; Larrea *et al.*, 2018).

A motivação para o estudo petrográfico e geoquímico das rochas vulcânicas da Ilha São Jorge se deve ao interesse e importância de compreender, mais detalhadamente, a geologia da ilha. A pesquisa teve como foco, as diferentes faciologias vulcânicas encontradas na Ilha São Jorge, a relação da dinâmica do vulcanismo com a tectônica da região e os processos magmáticos relacionados à formação das rochas da ilha.

Este trabalho visou o levantamento e a interpretação de dados petrográficos e geoquímicos das rochas efusivas da Ilha São Jorge, de forma a contribuir para o entendimento dos processos magmáticos e afinidade química do magmatismo responsável pela formação das rochas.

O capítulo 2 desta dissertação de mestrado está organizado no formato de artigo, intitulado “As Rochas Vulcânicas da Ilha São Jorge, Açores (Portugal): Petrografia e Geoquímica”. Este artigo foi submetido à revista científica “Geociências” da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP – Rio Claro), versão eletrônica, avaliada pela CAPES com o nível B2. As normas de submissão da revista supracitada se encontram no Anexo I. O comprovante de submissão do artigo está inserido no Anexo II. A justificativa da participação dos coautores está disponível no Anexo III.

No capítulo 3 são elencadas as conclusões do trabalho de mestrado desenvolvido. A identificação das amostras, as coordenadas dos afloramentos descritos e amostrados, as

litologias e as unidades vulcanoestratigráficas dos afloramentos estão listadas no Apêndice I. Os dados modais obtidos na petrografia estão no Apêndice II.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. Geral

O objetivo geral deste trabalho é a caracterização petrográfica e química das rochas efusivas dos diferentes sistemas vulcânicos da Ilha São Jorge.

### 1.2.2. Específicos

Os objetivos específicos incluem identificar e descrever a mineralogia, os aspectos texturais e as microestruturas presentes nas rochas efusivas, além de estabelecer o padrão químico dos três sistemas vulcânicos da Ilha São Jorge.

## 1.3. LOCALIZAÇÃO E ACESSO DA ÁREA

A Ilha São Jorge, 38° 33' e 38° 45'N de latitude e 27° 44' e 28° 20'W de longitude, localiza-se no Atlântico Norte (Larrea *et al.*, 2018). Esta ilha faz parte do Grupo Central do Arquipélago dos Açores, o qual está situado a uma distância de 1.600 km de Portugal Continental (Figura 2) (França *et al.*, 2005).

A posição geográfica da ilha é estratégica, distando 60 km da Ilha Terceira, 40 km da Ilha Graciosa, 30 km da Ilha Faial e 18 km da ilha do Pico (a mais próxima). A Ilha de São Jorge é a quarta maior ilha do arquipélago, com uma área de 245,8 km<sup>2</sup> e tem forma alongada (Figura 2) (Ribeiro, 2011).

O acesso à área de estudo ocorre por via aérea ou marítima. A partir da cidade de Lisboa, o transporte é viável por meio de avião, através de duas empresas que realizam o trajeto para os Açores, a *Azores Airlines* (SATA) e a Transportes Aéreos Portugueses (TAP). Para chegar à Ilha São Jorge é necessário fazer escala nas ilhas São Miguel, Terceira ou Faial, em um voo de aproximadamente 3h e 30min (Roque, 2016). O percurso por meio marítimo é realizado entre as ilhas, por diversas empresas como a *Atlânticoline*. A duração é de 50 min partindo da Ilha do Pico, 2h saindo da Ilha da Faial e no máximo 3h e 10min, partindo da Ilha Terceira (Santos, 2016).

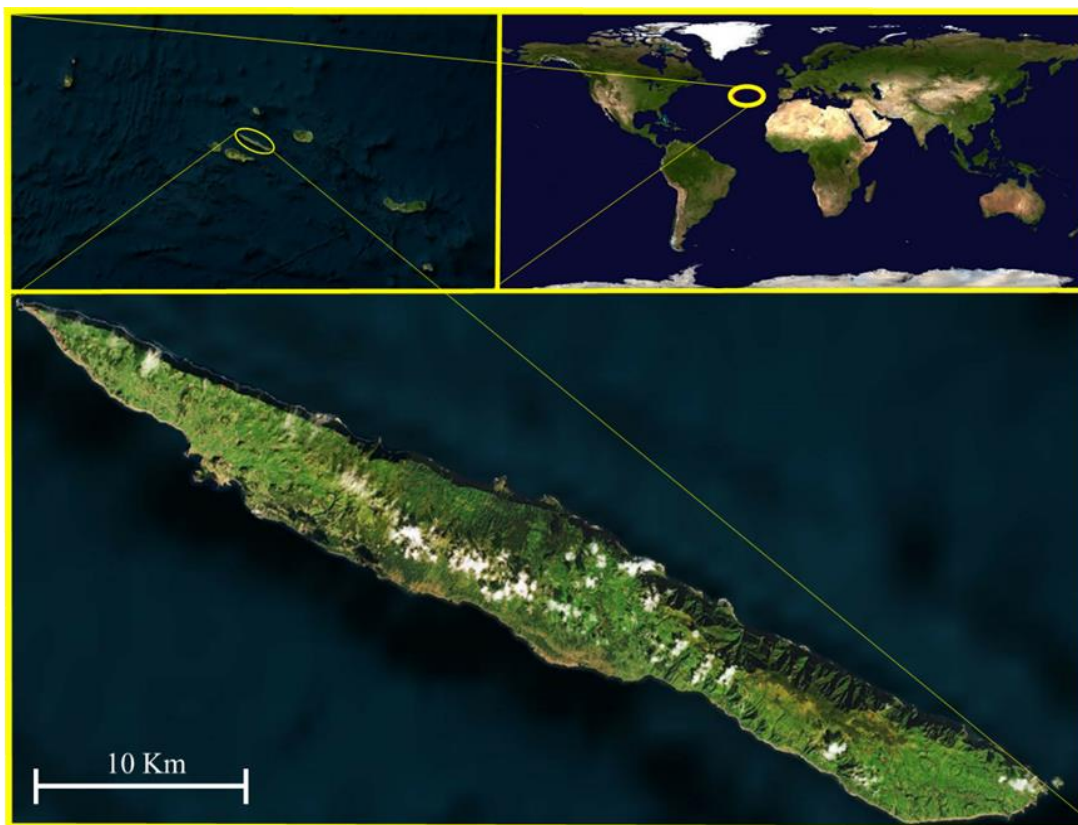


Figura 2: Localização geográfica da Ilha São Jorge: Arquipélago dos Açores, Atlântico Norte, em imagem de satélite (Fonte: *Aerial View – Big Maps*, 2018).

## 1.4. MÉTODOS DE TRABALHO

### 1.4.1. Levantamento Bibliográfico

O levantamento bibliográfico foi realizado através da busca de dados da região de estudo, relacionados ao contexto geotectônico, à geologia regional e local, bem como a dados petrográficos e geocronológicos.

As bibliografias pesquisadas compreenderam livros, artigos científicos, teses, dissertações, monografias, anais de congressos e relatório de campo confeccionado por um grupo de pesquisadores da Universidade de Coimbra (Portugal).

### 1.4.2. Trabalho de Campo

O trabalho de campo foi realizado em outubro de 2008 por um grupo de pesquisadores da Universidade de Coimbra (Portugal) e do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, coordenados pela Profa. Adriane Machado e pelo Prof. Evandro Fernandes de Lima, respectivamente. No trabalho de campo foram descritos 23 afloramentos e

coletadas 23 amostras de rocha. Os dados de campo foram cedidos pela Profa. Adriane Machado, orientadora desta pesquisa. O *DATUM* utilizado para o referenciamento geográfico foi o WGS 84, com coordenadas configuradas em projeção UTM.

#### 1.4.3. Petrografia

Um total de 21 lâminas delgadas foram confeccionadas no Laboratório de Preparação de Lâminas Delgadas do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro (Portugal). Apenas 15 lâminas delgadas foram selecionadas para o estudo petrográfico, visto que apenas essas lâminas continham dados químicos de rocha total. A descrição petrográfica foi realizada com o auxílio de um microscópio petrográfico da marca *Olympus* modelo *BX41*, do Laboratório de Microscopia e Lupas do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Sergipe (UFS). A estimativa modal foi realizada pelo método da contagem de pontos, através de uma varredura em toda a lâmina, até atingir em média, 800 pontos.

#### 1.4.4. Geoquímica

As análises químicas de 15 amostras foram obtidas nos laboratórios *Activation Laboratories Ltd.* (ACTLABS – Ontário, Canadá – 8 amostras) e *Acme Analytical Laboratories Ltd.* (ACME – Vancouver, Canadá – 7 amostras). As amostras foram britadas e moídas (< 200 *mesh*) nos laboratórios supramencionados.

A análise de elementos maiores foi realizada por meio de plasma por acoplamento indutivo (ICP) no ACTLABS e no ACME. Os elementos-traço e terras raras foram obtidos pela técnica de espectrometria de massa (ICP-MS) nos dois laboratórios supracitados.

Os dados químicos de 15 amostras foram tratados através de diagramas confeccionados no *Software Microsoft Excel* 2016.

### 1.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BEIER, C.; TURNER, S.; PLANK, T.; WHITE, W. **A preliminary assessment of the symmetry of source composition and melting dynamics across the Azores plume.** *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol. 11, Q02004, 2010.
2. BEIER, C.; HAASE, K. M.; TURNER, S. P. **Conditions of melting beneath the Azores.** *Lithos*, 144–145, p. 1–11, 2012.
3. FORJAZ, V. H. & FERNANDES, N. S. M. **Folha “B” da ilha de S. Jorge (Acores) da Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000.** Serv. Geol. Portugal, 1970.

4. FORJAZ, V. H. & FERNANDES, N. S. M. **Carta Geologica de Portugal na escala de 1:50000. Noticia explicativa das Folhas “A” e “B”, Ilha de São Jorge (Acores).** Serv. Geol. Portugal, 32p, 1975.
5. FRANÇA, Z.; CRUZ, J.; NUNES, J. C.; FORJAZ, V. H. **Geologia dos Acores: Uma perspectiva actual.** Revista Açoreana, 10: 140p, 2005.
6. GEORGEN, J. E. **Lithospheric control on the spatial pattern of Azores hotspot seafloor anomalies: Constraints from a model of plume-triple junction interaction.** Geophysical Research Letters, vol. 38, L19305, 2011.
7. HILDENBRAND, A.; MADUREIRA, P.; MARQUES, F. O.; CRUZ, I.; HENRY, B.; SILVA, P. **Multi-stage evolution of a sub-aerial volcanic ridge over the last 1.3 Myr: S. Jorge Island, Azores Triple Junction.** Earth and Planetary Science Letters, 273, 289–298, 2008.
8. KRIENITZ, M.-S.; GARBE-SCHONBERG, C.-D.; ROMER, R. L.; MEIXNER, A.; HAASE K. M.; STRONCIK N. A. **Lithium Isotope Variations in Ocean Island Basalts - Implications for the Development of Mantle Heterogeneity.** Journal of Petrology, vol. 53, 2333-2347. 2012.
9. LARREA, P.; WIJBRANS, J. R.; GALÉ, C.; UBIDE, T.; LAGO, M.; FRANÇA, Z.  **$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  constraints on the temporal evolution of Graciosa Island Azores (Portugal).** Bulletin of Volcanology, 76, 796, 2014.
10. LARREA, P.; WIDOM, E.; FRANÇA, Z.; LAGO, M. **Petrology of the Azores Islands.** Volcanoes of the Azores, Active Volcanoes of the World, 2018.
11. MILLET, M. A.; DOUCELANCE, R.; BAKER, J. A.; SCHIANO, P. **Reconsidering the origins of isotopic variations in Ocean Island Basalts: Insights from fine-scale study of São Jorge Island Azores archipelago.** Chemical Geology, 265(3–4), 289–302, 2009.
12. RIBEIRO, L. J. C. **Caracterização Petrológica e Geoquímica do Vulcanismo da Ilha de São Jorge, Açores.** Portugal, 2011. Tese de Doutoramento. Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro, 275p.
13. ROQUE, P. 2016. **Como ir de Lisboa aos Açores? O que você precisa saber.** Disponível em: [www.cultuga.com.br/2016/10/como-chegar-de-lisboa-aos-cores-voos-distancia/](http://www.cultuga.com.br/2016/10/como-chegar-de-lisboa-aos-cores-voos-distancia/). Acessado em: 01/12/2018.
14. SANTOS, M. P. 2016. **Ilha de São Jorge, a ilha das Fajãs.** Disponível em: <http://www.destinosvividos.com/ilha-de-sao-jorge-a-ilha-das-fajas/>. Acessado em: 01/12/2018.

## **CAPÍTULO 2 – As rochas vulcânicas da Ilha São Jorge, Açores (Portugal): Petrografia e Geoquímica**

# AS ROCHAS VULCÂNICAS DA ILHA SÃO JORGE, AÇORES (PORTUGAL): PETROGRAFIA E GEOQUÍMICA

## *THE VOLCANIC ROCKS OF SÃO JORGE ISLAND, AZORES (PORTUGAL): PETROGRAPHY AND GEOCHEMISTRY*

**Karoline Ferreira da Silva MECENAS<sup>1</sup>, Adriane MACHADO<sup>1,2</sup>,  
Alan Dantas CARDOSO<sup>2</sup>, Luiz Henrique PASSOS<sup>3</sup>, Cristine LENZ<sup>2</sup>**

(1) Programa de Pós-Graduação em Geociências e Análise de Bacias, Universidade Federal de Sergipe. Avenida Marechal Rondon, s/n – Bairro Jardim Rosa Elze. CEP 49100-000. São Cristóvão – SE, Brasil. Endereços eletrônicos: karolmecenas@yahoo.com.br, adrianemachado@yahoo.com.br

(2) Departamento de Geologia, Universidade Federal de Sergipe. Avenida Marechal Rondon, s/n – Bairro Jardim Rosa Elze. CEP 49100-000. São Cristóvão – SE, Brasil. Endereço eletrônico: alan\_tribo@hotmail.com, crislenz@yahoo.com.br

(3) Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, ICC – Ala Central. CEP 70910-900. Brasília – DF. Endereço eletrônico: lhpastos.geologo@gmail.com

INTRODUÇÃO  
GEOLOGIA REGIONAL  
GEOLOGIA LOCAL  
MATERIAIS E MÉTODOS  
RESULTADOS  
Petrografia  
Geoquímica  
DISCUSSÕES  
CONCLUSÕES  
AGRADECIMENTOS  
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**RESUMO** – A Ilha São Jorge faz parte do Grupo Central do Arquipélago dos Açores (Portugal), situado próximo à junção tríplice, entre as placas litosféricas Norte-Americana, Euro-Asiática e Africana, na região do Atlântico Norte. A vulcanoestratigrafia da ilha é composta por três complexos vulcânicos denominados *Topo*, *Rosais* e *Manadas*. A idade da Ilha São Jorge é  $1,3 \pm 0,0035$  Ma ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ) (Ribeiro, 2011). Segundo dados petrográficos, as rochas apresentam granulometria média a fina, texturas porfírica, microporfírica, glomeroporfírica, intergranular, pilotaxítica, traquítica e intersertal. De acordo com dados geoquímicos, as rochas foram classificadas como basanitos, basaltos alcalinos e hawaítos, compostos por olivina, augita, plagioclásio e minerais opacos, que ocorrem como fenocristais ou inseridos na matriz. Algumas amostras de basalto alcalino e hawaíto apresentam kaersutita, interpretada como um xenocristal. Texturas de reabsorção, embainhamento, zonagem e bordas de reação são feições comuns em fenocristais e indicam que o magma sofreu descompressão rápida, com variação brusca de temperatura e pressão. A interpretação geoquímica permitiu concluir que as lavas apresentam afinidade alcalina sódica e foram geradas por baixas taxas de fusão parcial, a partir de um magma mantélico enriquecido. Os dados geoquímicos são compatíveis com os de magmas gerados em ambiente geotectônico do tipo intraplaca oceânica (OIB).

**Palavras-chave:** Basaltos de Ilha Oceânica; Arquipélago dos Açores; Ilha São Jorge

**ABSTRACT** – São Jorge Island is part of the Central Group of the Azores Archipelago (Portugal), located near the triple junction between North American, Euro-Asian and African lithospheric plates in the North Atlantic region. The island volcanostratigraphy is composed of three volcanic complexes named *Topo*, *Rosais* and *Manadas*. The São Jorge Island age is  $1.3 \pm 0.0035$  Ma ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ) (Ribeiro, 2011). According to petrographic data, the rocks of the island show medium to fine granulometry, porphyritic, microporphyritic, glomeroporphyritic, intergranular, pilotaxitic, trachytic and intersertal textures. The rocks were classified as basanites, alkaline basalts and hawaiites, composed of olivine, augite, plagioclase and opaque minerals, occurring as phenocrysts or inserted in the matrix. Some alkaline basalt and hawaiite samples show kaersutite, which is interpreted as a xenocrystal. Reabsorption textures, sheathing, zoning and reaction edges are common features in phenocrysts. These features indicate that the magma underwent rapid decompression, with sudden variation of temperature and pressure. The geochemical interpretation allowed to conclude that the lavas show alkaline sodium affinity and were generated by low partial melting rates, from an enriched mantle magma. The geochemical data are compatible with those of magmas generated in geotectonic environment of oceanic intraplate type (OIB).

**Keywords:** Ocean Island Basalts; Azores Archipelago; São Jorge Island



## INTRODUÇÃO

Os vulcões de ambiente intraplaca oceânica são úteis para compreender a composição do manto astenosférico da Terra e os processos de geração e evolução de magmas. O magmatismo de ilha oceânica apresenta várias fases de atividade vulcânica e cada uma destas possui composições químicas e isotópicas distintas (Beier *et al.*, 2006). Assim, a ascensão dos magmas abaixo dos vulcões intraoceânicos requer um estudo detalhado, para distinguir basaltos primários e contaminados, e as diferentes fontes de magma (Beier *et al.*, 2006).

As ilhas do Arquipélago dos Açores são consideradas um laboratório natural para estudar os processos mantélicos e magmáticos, considerando que são ilhas oceânicas situadas em um cenário tectônico complexo, nas proximidades da Cordilheira Meso-Atlântica (CMA) (Ribeiro, 2011).

Anomalias topográficas, gravimétricas, de espessamento crustal, de velocidades de propagação de ondas sísmicas, térmicas e geoquímicas encontradas na região dos Açores são interpretadas como evidências da existência de uma pluma mantélica sob a região (Gente *et al.*, 2003; Pacheco *et al.*, 2013).

A presença de três placas tectônicas (Norte-Americana, Euro-Asiática e Africana) próximas ao Arquipélago dos Açores, é importante na distribuição do material da pluma no manto superior e influencia no padrão espacial do vulcanismo de fundo oceânico (Georgen, 2011). Essa proximidade resultou na interação entre a CMA e o *Hotspot* dos Açores, e como consequência, gerou uma assinatura geoquímica assimétrica, com diferenças ou desconformidades nos padrões das rochas do arquipélago. O início da interação entre a CMA e o *Hotspot* dos Açores ocorreu há 85 Ma, enquanto o período da construção do Platô dos Açores iniciou há 20 Ma (Gente *et al.*, 2003).

A evolução do Arquipélago dos Açores não segue o modelo de *hotspot* convencional, no qual o vulcanismo se desenvolve numa sequência temporal, como no *Hotspot* do Hawaí. Nos Açores, a ausência de uma sequência temporal entre as ilhas é o resultado da movimentação das placas sobre a

pluma. O desenvolvimento foi preferencialmente controlado pela tectônica extensional complexa da junção tríplice (JT) (Larrea *et al.*, 2014).

O presente trabalho visou o tratamento e a interpretação de dados petrográficos e geoquímicos das rochas vulcânicas da Ilha São Jorge, com o intuito de identificar e descrever a mineralogia e as texturas dos diferentes sistemas vulcânicos, bem como entender os processos magmáticos e a afinidade geoquímica do magmatismo.

## GEOLOGIA REGIONAL

O Arquipélago dos Açores está localizado no Oceano Atlântico Norte, a 1.600 km de Portugal Continental (França *et al.*, 2005), na latitude 37° - 40°N e longitude 25° - 31°W, com largura de aproximadamente 600 km (Pacheco *et al.*, 2013) (Figura 3). Esta região possui topografia elevada (1,5 km de altitude), com vulcões formados por atividade de um *hotspot* (Gente *et al.*, 2003).

Os Açores se encontram na convergência de três placas tectônicas (Norte-Americana, Euro-Asiática e Africana), que formam uma junção tríplice, com várias estruturas tectônicas nas proximidades, as quais influenciam o vulcanismo e a sismicidade da região. Dentre as estruturas estão a CMA, o Rifte da Terceira (RT), a Zona de Fratura Norte dos Açores (ZFNA), a Zona de Fratura Faial-Pico (ZFFP), a Zona de Fratura Banco Açor (ZFBA), a Zona de Fratura Banco Princesa Alice (ZFBPA), a Falha da Glória (FG) e a Transformante *Leaky* de São Jorge (TSJ) (Figura 3) (Nunes, 1999).

Geograficamente, as ilhas do Arquipélago dos Açores são distribuídas em três grupos denominados Grupo Oriental (Santa Maria e São Miguel), Grupo Central (Terceira, Graciosa, São Jorge, Faial e Pico) e Grupo Ocidental (Flores e Corvo) (Figura 3).

A ilha mais antiga do Arquipélago é Santa Maria, com idade de  $8,12 \pm 0,85$  Ma, enquanto a Ilha São Miguel tem  $4,01 \pm 0,50$  Ma (Abdel-Monem *et al.*, 1975). A Ilha da Terceira possui 3,52 Ma (Ferreira *et al.*, 1995). White *et al.* (1976) propuseram uma idade de 2,5 Ma para a Ilha da Graciosa,

enquanto Larrea *et al.* (2014) propôs uma idade variável entre  $1,05 \pm 0,028$  Ma e  $3,9 \pm 1,4$  ka. A idade geocronológica mais antiga relatada para a Ilha São Jorge é de  $1,3 \pm 0,0035$  Ma ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ) (Hildenbrand *et al.*, 2008; Ribeiro, 2011). As idades conhecidas para as ilhas do Faial e Pico são, respectivamente,  $0,85 \pm 0,012$  Ma (Hildenbrand *et al.*, 2012) e 0,27 Ma (Demand *et al.*, 1982). As ilhas localizadas a oeste da CMA, no Grupo Ocidental, apresentam idades de  $2,16 \pm 0,16$  Ma (Ilha das Flores) (Azevedo *et al.*, 2006) e 0,7 Ma (Ilha do Corvo) (Azevedo *et al.*, 2003).

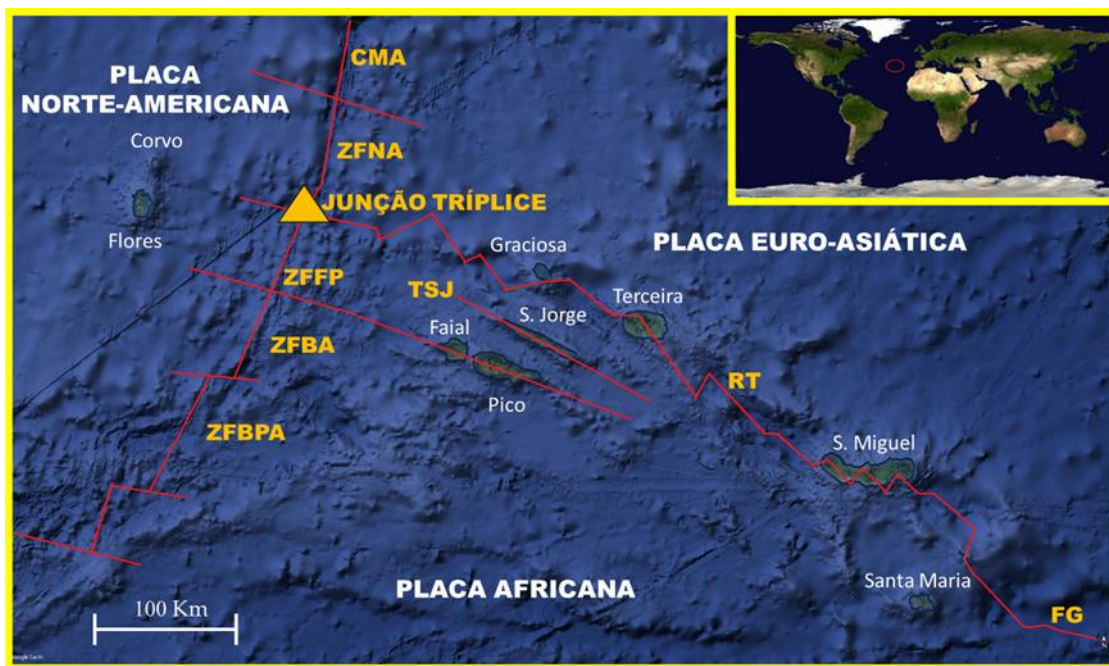


Figura 3: Principais estruturas tectônicas nas proximidades da junção tríplice (Fonte: Nunes, 1999). Sobreposição em imagem de satélite (Fonte: Google Earth, 2018). Cordilheira Meso-Atlântica (CMA); Rifte da Terceira (RT); Zona de Fratura Norte dos Açores (ZFNA); a Zona de Fratura Faial-Pico (ZFFP); Zona de Fratura Banco Açor (ZFBA); Zona de Fratura Banco Princesa Alice (ZFBPA); Falha da Glória (FG); Transformante *Leaky* de São Jorge (TSJ).

As rochas mais comuns nas ilhas açorianas são basaltos alcalinos e hawaítos (Beier *et al.*, 2010), podendo ocorrer picritos, mugaritos e traquitos (França *et al.*, 2005).

Do ponto de vista geoquímico, as lavas das ilhas açorianas são heterogêneas em termos de composições isotópicas radiogênicas, mas apresentam homogeneidade em relação aos valores dos elementos maiores e a maioria dos elementos traços incompatíveis (Beier *et al.*, 2012). Assim, o padrão na composição da fonte do magma é assimétrico para as ilhas do arquipélago (Gente *et al.*, 2003; Beier *et al.*, 2010). Os Açores têm composições de reservatórios mantélicos do tipo HIMU

(Alto  $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ ), DMM (MORB de Manto Empobrecido) e EM (Manto Enriquecido) (França *et al.*, 2005).

## GEOLOGIA LOCAL

A Ilha São Jorge, 38° 33' e 38° 45'N de latitude e 27° 44' e 28° 20'W de longitude, localiza-se no Atlântico Norte (Larrea *et al.*, 2018). Essa ilha apresenta forma alongada e área de 245,8 km<sup>2</sup> (Ribeiro, 2011), com 55 km de comprimento e 7 km de largura (Hildenbrand *et al.*, 2008; Mendes *et al.*, 2013). O estilo eruptivo do vulcanismo é fissural, com orientação preferencial WNW-ESE, o que revela a importância do controle tectônico durante a atividade vulcânica (Ribeiro, 2011).

A vulcanoestratigrafia da ilha é caracterizada por três complexos vulcânicos: Topo, Rosais e Manadas (Forjaz & Fernandes, 1970, 1975; Mendes, 2013) (Figura 4).

O Complexo Vulcânico Topo (CVT) foi o primeiro sistema vulcânico formado e aflora na parte leste da ilha. A unidade é composta por derrames vulcânicos espessos, devido à predominância de fluxos de lava do tipo “aa” (França *et al.*, 2005) em relação ao material piroclástico. As sequências do CVT são cortadas por diques orientados pelo sistema tectônico regional (Ribeiro, 2011). As rochas presentes no CVT são basanitos, tefritos, basaltos e hawaítos, (Larrea *et al.*, 2018). Ribeiro (2011) atestou que as rochas da Fajã São João do CVT, com idades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de  $1309,8 \pm 3,5$  ka e  $1284,0 \pm 4,8$  ka, representam a parte mais antiga da ilha (Figura 5), com uma sequência de derrames com mais de 400 m de espessura. A posição estratigráfica das lavas mais jovens do CVT (543 ka de idade) fornece um limite importante para o fim da atividade vulcânica do CVT (Ribeiro, 2011).

O Complexo Vulcânico Rosais (CVR) aflora na porção oeste da ilha e possui contato estratigráfico não visível com o CVT, considerando que está coberto pelas lavas recentes do Complexo Vulcânico Manadas (Pacheco *et al.*, 2013). No CVR ocorrem basanitos, basaltos, hawaítos e traquibasaltos potássicos (Ribeiro, 2011), sendo que as lavas são do tipo “aa” (França *et al.*, 2005). Nessa unidade, as idades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  variam entre  $270,1 \pm 2,5$  ka e  $116,6 \pm 2,0$  ka (Ribeiro, 2011).

O Complexo Vulcânico Manadas (CVM) está inserido na parte central da Ilha São Jorge e representa a unidade geológica mais jovem. Esse sistema vulcânico é composto por numerosos cones estrombolianos recentes (Larrea *et al.*, 2018) e dois surtesianos (Morro do Lemos e Morro Velho) (França *et al.*, 2005). O CVM é considerado ativo e as duas últimas erupções históricas ocorreram em 1.580 (Fajã da Queimada) e em 1.808 (na região de Urzelina) (França *et al.*, 2005; Larrea *et al.*, 2018), além de um provável evento submarino em 1.964, que foi identificado pelo cheiro sulfuroso na região (Forjaz & Fernandez, 1975; Ribeiro, 2011; Pacheco *et al.*, 2013). Basanitos, tefritos, basaltos, hawaítos e mugearitos são as litologias que ocorrem no CVM (Larrea *et al.*, 2018). Essa unidade apresenta uma exposição excelente de rochas básicas e uma expressiva heterogeneidade morfológica dos derrames, o que favorece o estudo detalhado em escala de afloramento (Rossetti *et al.*, 2015). Os dados geocronológicos indicam a idade  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  do CVM entre  $2,9 \pm 10,3$  ka, e  $0,5 \pm 6,9$  ka (Ribeiro, 2011).

França (2009) determinou a tipicidade vulcânica da Ilha São Jorge, como sugestiva de vulcanismo efusivo de baixa a média explosividade, do tipo hawaiano, e principalmente estromboliano, com base nas descrições das estruturas e produtos vulcânicos das erupções históricas das ilhas açorianas. Conforme Ribeiro (2011), o estilo hidromagmático ocorre no CVM.

Os dados de campo mostraram que os afloramentos da ilha apresentam fluxos de lava dos tipos “aa” e *pahoehoe* (Figura 5), sobrepondo-se aos depósitos piroclásticos. As sequências vulcânicas são intrudidas, frequentemente, por diques. Cones de escória com cristais de augita alterados foram observados no CVT.

As rochas vulcânicas da Ilha São Jorge relacionadas a este trabalho são representadas por basanitos, basaltos alcalinos e hawaítos pertencentes aos complexos vulcânicos Topo, Rosais e Manadas. Os pontos dos afloramentos estudados foram plotados no mapa geológico (Figura 4).

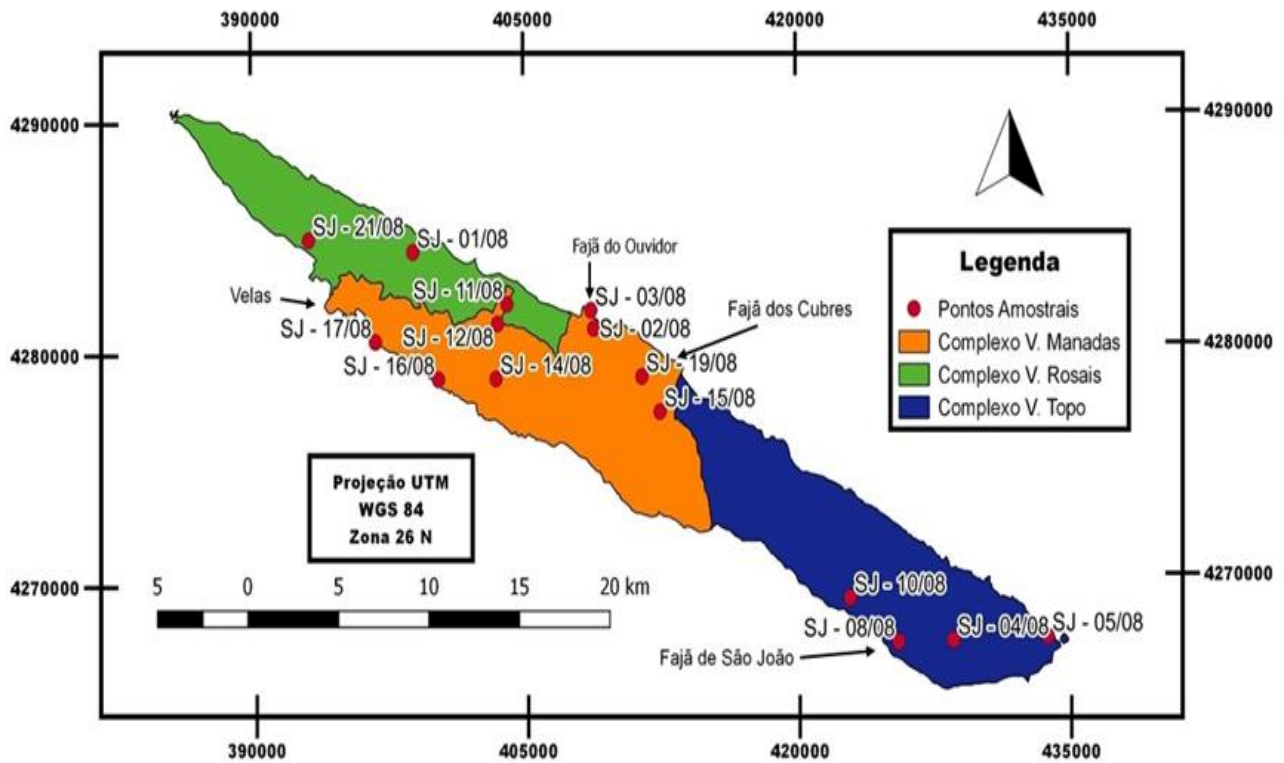


Figura 4: Mapa vulcanoestratigráfico com a localização das amostras que foram utilizadas neste trabalho. As unidades geológicas foram definidas por Forjaz & Fernandes, 1970 e 1975.

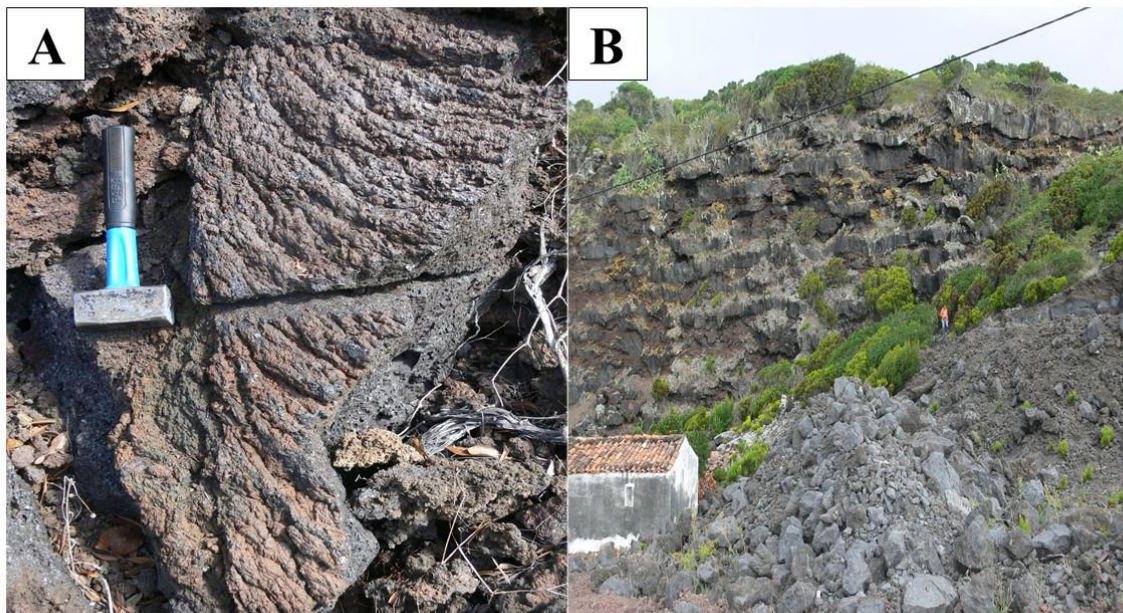


Figura 5: Afloramentos da Ilha São Jorge. A) Fluxo de lava do tipo *pahoehoe* B) Fluxo de lava do tipo “aa”.



## MATERIAIS E MÉTODOS

A partir das 23 amostras coletadas no trabalho de campo, 21 lâminas delgadas foram confeccionadas no Laboratório de Preparação de Lâminas Delgadas do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro (Portugal). Neste trabalho, somente 15 lâminas delgadas foram utilizadas, considerando que apenas estas lâminas possuíam análises químicas de rocha total. A descrição foi realizada com o auxílio do microscópio petrográfico *Olympus BX41*, do Laboratório de Microscopia e Lupas do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Sergipe (UFS). A estimativa modal foi realizada pelo método da contagem de pontos, através de uma varredura em toda a lâmina, até atingir em média, 800 pontos.

As amostras foram britadas e moídas (< 200 *mesh*) no *Activation Laboratories Ltd.* (ACTLABS – Ontário, Canadá – 8 amostras) e *Acme Analytical Laboratories Ltd.* (ACME – Vancouver, Canadá – 7 amostras). A análise de elementos maiores foi realizada por meio de plasma acoplado indutivamente (ICP) no ACTLABS e no ACME. Os dados de elementos-traço e terras raras foram obtidos pela técnica de espectrometria de massa (ICP-MS) em ambos os laboratórios. Os dados das análises químicas de 15 amostras foram tratados através de diagramas confeccionados no *Software Microsoft Excel 2016*.

## RESULTADOS

### PETROGRAFIA

As rochas vulcânicas estudadas da Ilha São Jorge afloram como fluxos de lava e apresentam textura porfirítica, microporfirítica, glomeroporfirítica, intergranular, pilotaxítica, traquítica e intersertal. A mineralogia é composta por fenocristais de olivina, augita, plagioclásio e minerais opacos imersos em uma matriz com a mesma composição mineralógica dos fenocristais. De acordo

com o diagrama Total Álcalis *versus* Sílica (TAS) (Middlemost, 1994), as rochas vulcânicas estudadas foram classificadas como basanitos, basalto alcalinos e hawaítos. A kaersutita (Ribeiro, 2011) foi identificada em algumas amostras de basalto alcalino e hawaíto.

## Basanitos

Os basanitos (SJ-01/08 e SJ-17/08) apresentam textura porfirítica (Figura 6B), com matriz pilotaxítica e intersertal. A composição mineralógica é formada por fenocristais de olivina (4,9-12,2%), augita (4,6-23,2%), plagioclásio (5,4-8,3%) e minerais opacos (0-0,3%). A matriz (59,2-81,9%) possui granulometria de 0,01 a 0,5 mm e é constituída por todos os minerais presentes como fenocristais, além de vidro vulcânico e vesículas arredondadas (Figura 6D).

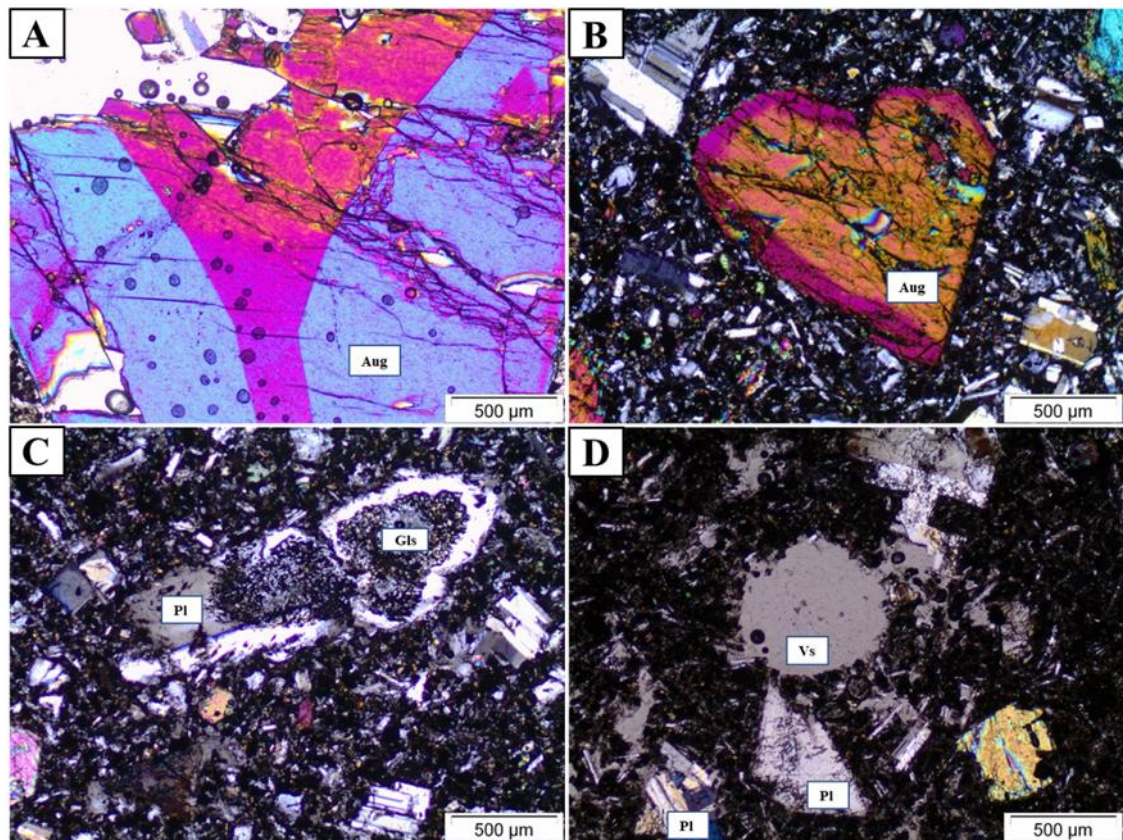


Figura 6: Aspectos microscópicos dos basanitos da Ilha São Jorge, luz polarizada. A) Augita maclada (SJ-01/08). B) Textura porfirítica, exibindo augita zonada (SJ-01/08). C) Plagioclásio com inclusão de vidro vulcânico (SJ-01/08). D) Vesícula arredondada em matriz pilotaxítica e intersertal (SJ-17/08) (Abreviaturas: Chace, 1956; Siivola & Schmid, 2007).



A olivina ocorre predominantemente como fenocristal (0,7 a 4,2 mm) e também está presente na matriz. A forma desse mineral varia de euédrica a subédrica, predominando a subédrica, com contatos retos a curvos com a matriz. Alguns cristais de olivina apresentam inclusões de augita (bordas) e minerais opacos (centro e bordas). Raros cristais apresentam feições de reabsorção.

A augita ocorre principalmente como fenocristal (0,7 a 8,6 mm) e varia de anédrica a euédrica, predominando a forma subédrica. A cor do mineral é marrom clara e os contatos são retos a curvos com a matriz e o plagioclásio, predominando os retos. Por vezes, possui inclusões de minerais opacos e olivina (centro), plagioclásio (bordas) e vidro vulcânico (centro e bordas). Alguns cristais apresentam maclas (Figura 6A), zonação (Figuras 6B) ou feições de reabsorção.

Os fenocristais de plagioclásio (0,7 a 6 mm) são subédricos a euédricos, com predominância dos subédricos. Os cristais possuem contatos retos a curvos com a matriz e a augita, predominando os retos. A presença de fraturas e feições de reabsorção são comuns. Alguns cristais apresentam inclusões de olivina, augita, minerais opacos e vidro vulcânico (centro e bordas) (Figura 6C). Raramente, observam-se cristais zonados. Na matriz, esses cristais são ripiformes.

Os fenocristais de minerais opacos (0,7 a 1,2 mm) são subédricos, com contatos retos a curvos com a matriz, predominando os curvos.

## **Basaltos alcalinos**

Os basaltos (**SJ-03/08**, **SJ-12/08**, **SJ-19/08**, **SJ-21/08**) apresentam textura porfirítica, com matriz pilotaxítica, intergranular e intersertal. Uma amostra apresenta textura glomeroporfirítica (olivina e augita ou somente plagioclásio - Figura 8B). O basalto é composto por fenocristais de olivina (0,6-3,3%), augita (0-3,5%), plagioclásio (6,3-17,5%), minerais opacos (0-1,8%) e kaersutita (0-1,2%). A matriz (79,2-88,2%) da rocha possui granulometria de 0,01 a 0,5 mm e se constitui por todos os minerais presentes como fenocristais, além de vidro vulcânico e vesículas alongadas ou arredondadas.

A olivina ocorre predominantemente como fenocristal (0,7 a 3,5 mm) e apresenta forma anédrica a euédrica, predominando a subédrica. Os contatos são retos a curvos, com a olivina, a augita, o plagioclásio e a matriz, predominando os retos. Alguns cristais incluem augita (centro), minerais opacos e vidro vulcânico (bordas). Ocasionalmente, os cristais possuem feição de reabsorção, macla, fraturas (Figura 8C) e oxidação (Figura 7B).

A augita ocorre principalmente como fenocristal (0,6 a 6,5 mm), com forma anédrica a euédrica, predominando a anédrica. A cor do mineral é marrom clara. Os contatos são retos a curvos, com a olivina, o plagioclásio, a kaersutita e a matriz, com predominância dos curvos. Por vezes, possui inclusões de minerais opacos e vidro vulcânico (centro e bordas), plagioclásio e olivina (centro). Alguns cristais apresentam macla ou zonação, com feição de reabsorção (Figura 8D). Um cristal apresenta processo de epidotização (Figura 8A).

Os fenocristais de plagioclásio (0,6 a 8,6 mm) são anédricos a euédricos, com predominância dos subédricos. Os contatos são retos a curvos, com a olivina, a augita, o plagioclásio e a matriz, predominando os retos. Alguns cristais apresentam inclusões de olivina, augita, minerais opacos e vidro vulcânico (centro e bordas). Raramente, observam-se cristais zonados (Figura 7C), maclados, com textura *sieve* fina (7C) ou *sieve* grossa (Figura 7D), bem como embainhamento nas bordas. Alguns cristais incluem vidro vulcânico alterado (borda). Na matriz, esses cristais são ripiformes.

Os fenocristais de minerais opacos (0,7 a 2,6 mm) são anédricos a subédricos, com predominância dos subédricos, e têm contatos retos a curvos com a matriz, predominando os curvos.

A kaersutita (Ribeiro, 2011) ocorre predominantemente como fenocristal (0,7 a 3,3 mm), apresenta cor marrom escura e forma anédrica. Os contatos são curvos com a augita e a matriz. A amostra SJ-12/08 possui um cristal com reabsorção, incluindo cristais de plagioclásio (centro), olivina, augita e vidro vulcânico (centro e bordas), devido ao processo de dissolução. Todos os cristais apresentam borda de reação de minerais opacos (Figura 7A). A presença da kaersutita com borda de reação no basalto alcalino sugere que esse mineral seria um xenocristal (Ribeiro, 2011). A borda de reação se desenvolveu fora do campo de estabilidade da kaersutita.

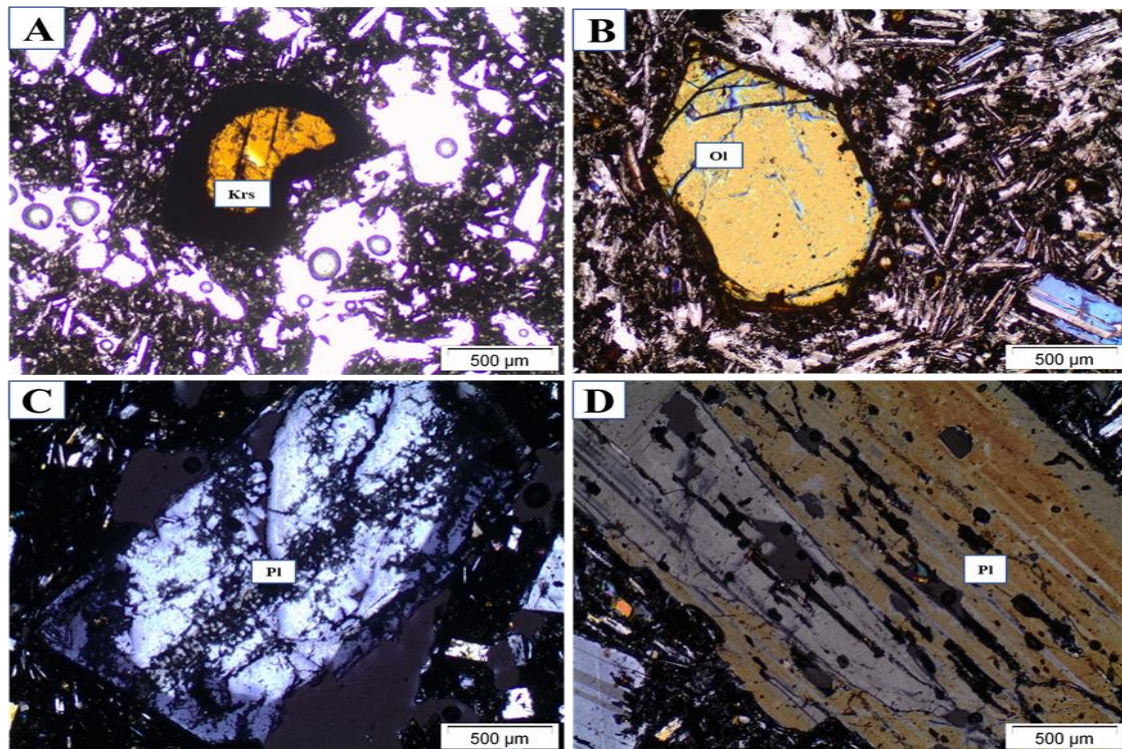


Figura 7: Aspectos microscópicos dos basaltos alcalinos da Ilha São Jorge. A) kaersutita com borda de reação de minerais opacos (SJ-03/08), luz natural polarizada. B) Olivina euédrica com bordas preenchidas por óxido de ferro (SJ-21/08), luz polarizada. C) Plagioclásio zonado, com textura *sieve* fina (SJ-03/08), luz polarizada. D) Plagioclásio com textura *sieve* grossa (SJ-19/08), luz polarizada. (Abreviaturas: Chace, 1956; Siivola & Schmid, 2007).

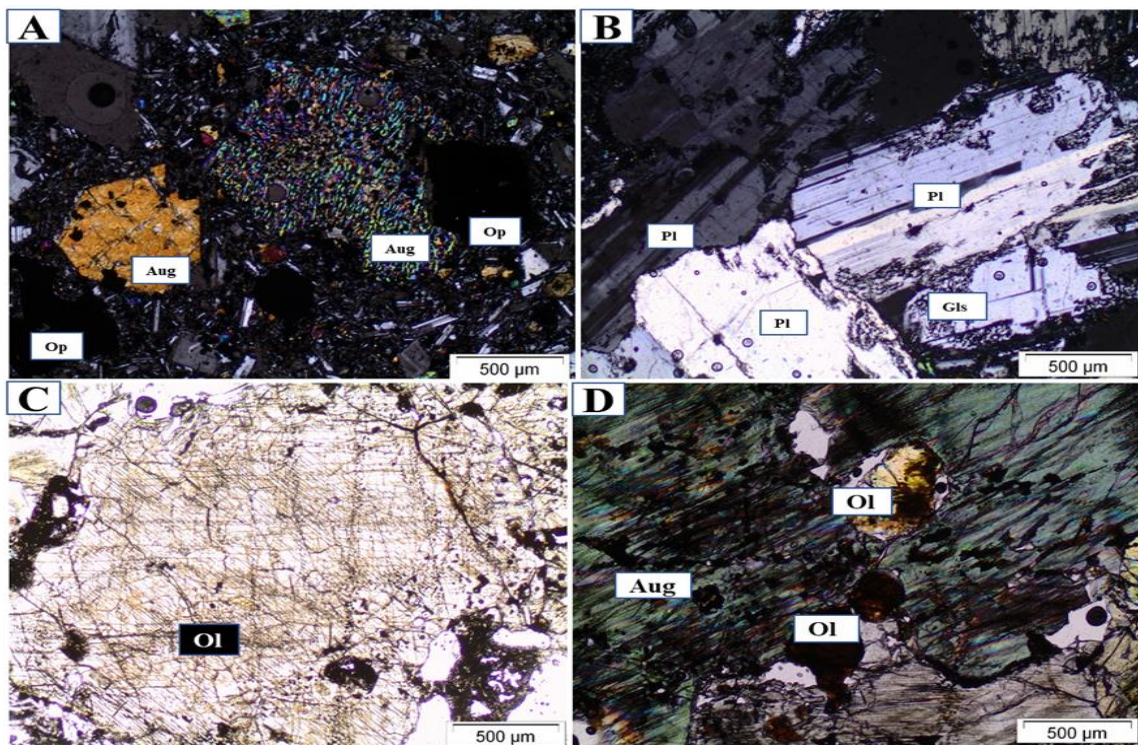


Figura 8: Aspectos microscópicos dos basaltos alcalinos na Ilha São Jorge. A) Augita com processo de epidotização (SJ- 12/08), luz polarizada. B) Textura glomeroporfírica constituída por plagioclásio com inclusão de vidro vulcânico (SJ- 12/08), luz polarizada. C) Olivina fraturada (SJ- 21/08), luz natural polarizada. D) Augita com feição de reabsorção e inclusão de olivina com óxido de ferro (SJ- 21/08), luz polarizada. (Abreviaturas: Chace, 1956; Siivola & Schmid, 2007).

## Hawaítos

Os hawaítos (**SJ-02/08**, **SJ-04/08**, **SJ-05/08**, **SJ-08/08**, **SJ-10/08**, **SJ-11/08**, **SJ-14/08**, **SJ-15/08**, **SJ-16/08**) apresentam textura porfírica, com matriz intersertal e intergranular, por vezes traquítica (Figura 9B) ou pilotaxítica (Figura 9A). Duas amostras possuem textura glomeroporfírica (olivina, augita, plagioclásio e minerais opacos) (Figura 11D). A rocha é composta por fenocristais de olivina (0-5,6%), augita (0-3,2%), plagioclásio (0-22,2%), minerais opacos (0-1,6%) e kaersutita (0-1,1%). Os fenocristais estão inseridos em uma matriz (69-99,7%) com granulometria de 0,01 a 0,5 mm, constituída por todos os minerais presentes como fenocristais, além de vidro vulcânico. Em algumas rochas, observa-se a presença de vesículas arredondadas ou alongadas.

A olivina ocorre predominantemente como fenocristal (0,7 a 3,7 mm) e apresenta forma anédrica a euédrica, predominando a subédrica. Os contatos são retos a curvos com a matriz, predominando os retos. Alguns cristais incluem olivina (centro), além de minerais opacos e vidro vulcânico (centro e bordas). Por vezes, observam-se cristais maclados (Figura 10A) e com porções oxidadas (Figura 9C), além de fraturas preenchidas por boulingita (Figura 10D) e feições de reabsorção. Alguns cristais apresentam embainhamento nas bordas (Figura 9C).

A augita como fenocristal (0,7 e 3,5 mm) é anédrica a euédrica, predominando a subédrica. A cor do mineral é marrom clara. Os contatos são retos a curvos com minerais opacos e matriz, com predominância dos curvos. Por vezes, possui inclusões de olivina, plagioclásio, minerais opacos e vidro vulcânico (centro e bordas). Alguns cristais apresentam feição de reabsorção e outros se encontram com maclas (Figura 11A) ou com zonação. O processo de epidotização é raro (Figura 9D).

Os fenocristais de plagioclásio (0,7 a 5,6 mm) são anédricos a euédricos, com predominância dos subédricos. Os contatos são retos a curvos, com minerais opacos e matriz, predominando os retos. Alguns cristais apresentam inclusões de olivina, plagioclásio, augita, minerais opacos e vidro vulcânico (centro e bordas). Raramente, ocorrem cristais zonados (Figura 11C), com textura *sieve*



finas (Figura 11B) ou com embainhamento nas bordas (Figura 10C). Na matriz, estes cristais são ripiformes.

Os fenocristais de minerais opacos (0,6 a 2,8 mm) são anédricos a euédricos, com predominância dos subédricos, e têm contatos retos a curvos com augita, plagioclásio e matriz, predominando os curvos.

A kaersutita (Ribeiro, 2011) ocorre predominantemente como fenocristal (0,7 a 5,8 mm), apresenta cor marrom escura e varia de anédrica a subédrica, predominando a anédrica. Os contatos são retos a curvos com a matriz, predominando os curvos. Na amostra SJ-11/08, todos os cristais apresentam borda de reação de minerais opacos (Figura 10B), sendo essa feição indicativa de que a kaersutita seria um xenocristal (Ribeiro, 2011).

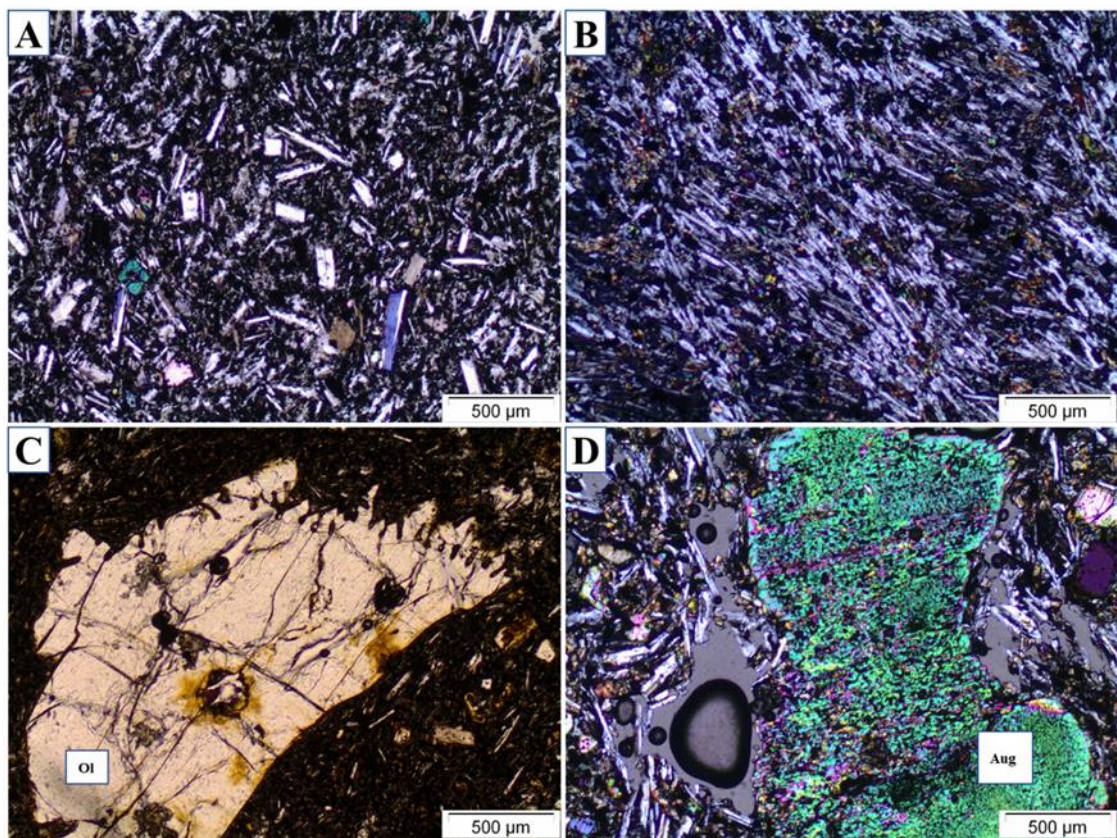


Figura 9: Aspectos microscópicos dos hawaítos da Ilha São Jorge. A) Matriz com textura pilotaxítica e intersertal (SJ-02/08), luz polarizada. B) Matriz com textura traquítica, intersertal e intergranular (SJ-04/08), luz polarizada. C) Olivina com embainhamento nas bordas e oxidação (SJ-05/08), luz natural polarizada. D) Augita com processo de epidotização (SJ-10/08), luz polarizada (Abreviaturas: Chace, 1956; Siivola & Schmid, 2007).



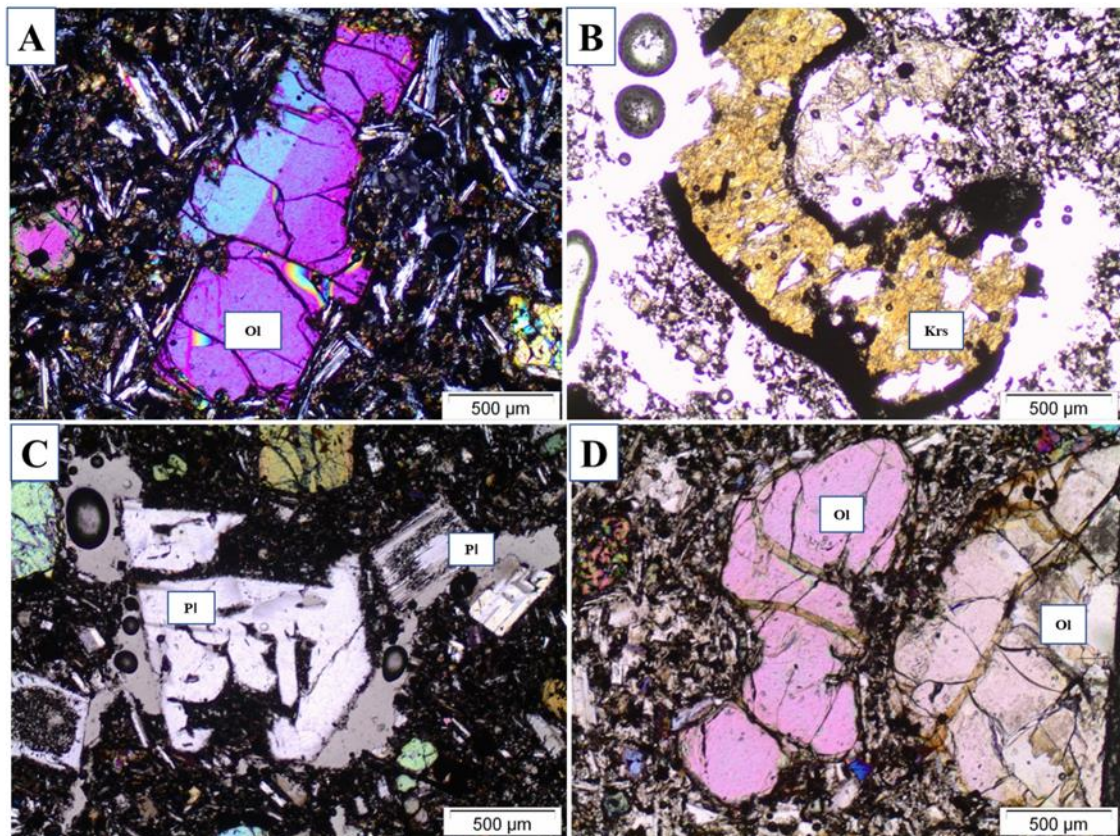


Figura 10: Aspectos microscópicos dos hawaítos da Ilha São Jorge. A) Olivina maclada (SJ-10/08), luz polarizada. B) Kaersutita com borda de reação de minerais opacos (SJ-11/08), luz natural polarizada. C) Plagioclásio com embainhamento nas bordas (SJ-11/08), luz polarizada. D) Olivina com porções oxidadas e presença de boulingita nas fraturas (SJ-15/08), luz polarizada (Abreviaturas: Chace, 1956; Siivola & Schmid, 2007).

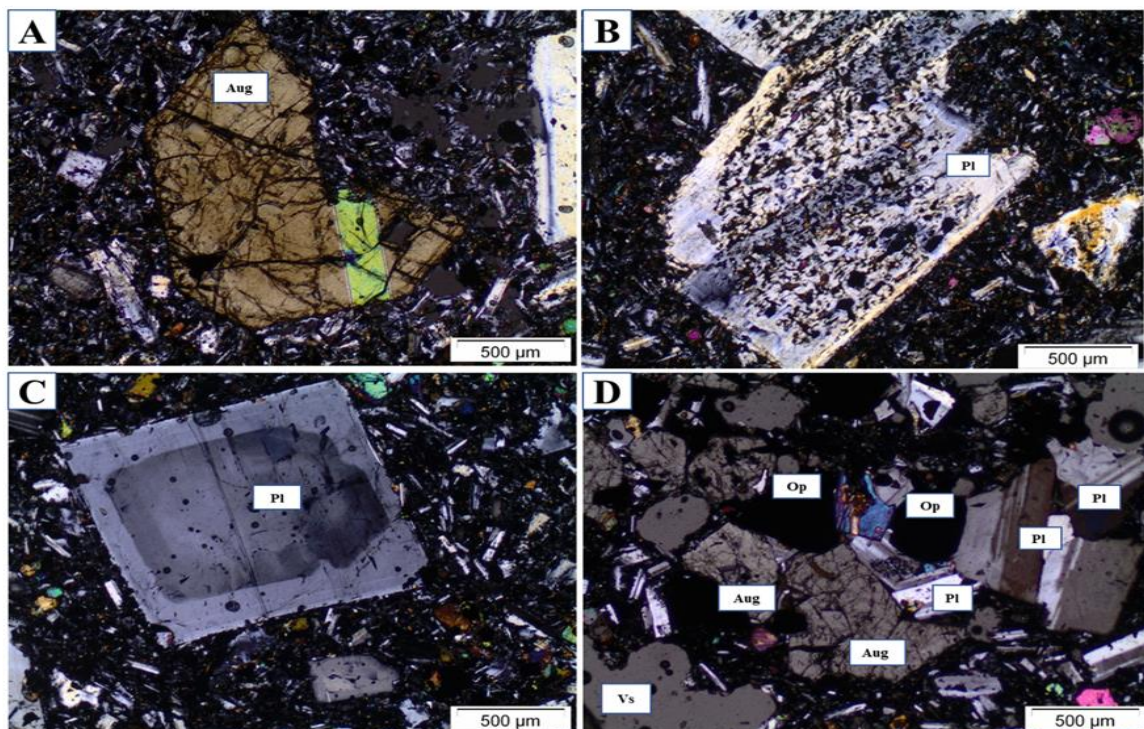


Figura 11: Aspectos microscópicos dos hawaítos da Ilha São Jorge, luz polarizada. A) Augita com macla (SJ-15/08). B) Plagioclásio com textura *sieve* fina (SJ-15/08). C) Plagioclásio euédrico zonado (SJ-16/08). D) Textura glomeroporfírica composta por augita, plagioclásio e minerais opacos (SJ16/08) (Abreviaturas: Chace, 1956; Siivola & Schmid, 2007).

## GEOQUÍMICA

De acordo com a classificação do diagrama TAS (Middlemost, 1994) (Figura 12), as rochas efusivas estudadas foram classificadas como basanitos, basalto alcalinos e hawaítos, com predominância de hawaítos. O conteúdo de álcalis varia entre 3,04 e 6,0%. As rochas apresentam afinidade alcalina segundo o limite de alcalinidade definido por MacDonald (1968) no diagrama TAS (Figura 12).

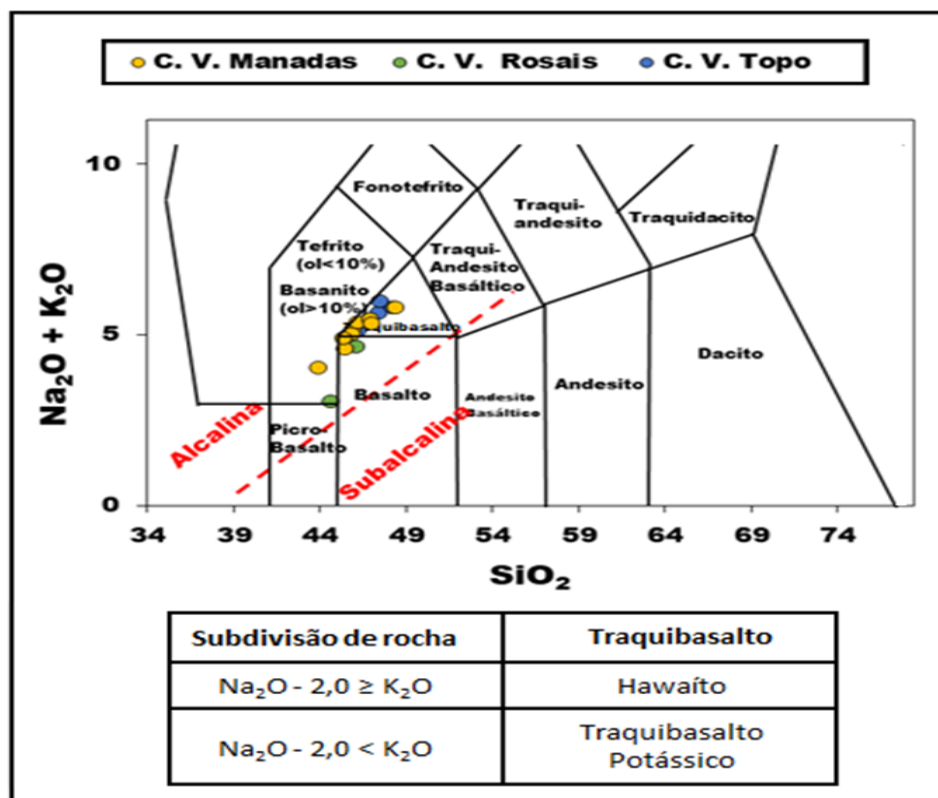


Figura 12: Diagrama Total-Álcalis versus Sílica (TAS – Middlemost, 1994). As rochas da Ilha São Jorge traçam acima do limite de alcalinidade (linha tracejada vermelha) definida por MacDonald (1968). A classificação de rochas está presente no diagrama, mas é necessário considerar critérios de subclassificação para cada campo: o tefrito tem  $\text{ol} < 10\%$  e o basanito apresenta  $\text{ol} > 10\%$ . O traquibasalto é subdividido em hawaíto e traquibasalto potássico, como mostra o quadro acima. Segundo esses critérios, as rochas desse trabalho foram classificadas como basanitos e hawaítos.

Os dados químicos de rocha total de 15 amostras de rochas efusivas dos CVT, CVR e CVM da Ilha São Jorge (Tabelas 1 e 2) foram plotados em diagramas geoquímicos. O conteúdo de MgO das rochas varia de 4,19 a 11,74% e o teor de  $\text{SiO}_2$  varia de 43,9 a 48,36%. O MgO foi escolhido como índice de diferenciação (ID) para os diagramas do tipo *Harker*, por ser o óxido com maior variação no teor.



Tabela 1: Análises químicas de rocha total das basanitos e basaltos alcalinos da Ilha São Jorge (elementos maiores e menores em % peso; traços e terras raras em ppm). CVM = Complexo Vulcânico Manadas; CVR = Comp. Vul. Rosais; CVT = Comp. Vul. Topo; P.F. = Perda ao Fogo; n.d. = não determinado.

Unidade	CVM	CVR	CVM	CVM	CVM	CVM	CVR
Tipo de rocha	Basanito				Basalto Alcalino		
Amostra	SJ-17/08	SJ-01/08	SJ-03/08	SJ-16/08	SJ-19/08	SJ-12/08	SJ-21/08
SiO <sub>2</sub> (%)	43,90	44,68	45,42	47,03	45,40	45,84	46,09
TiO <sub>2</sub>	4,22	2,88	3,67	3,46	3,89	3,47	3,48
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,35	13,42	16,38	18,37	17,04	17,18	16,89
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,10	12,31	12,27	11,35	12,52	12,75	12,41
MnO	0,17	0,16	0,18	0,17	0,17	0,19	0,19
MgO	8,24	11,74	5,45	5,04	5,73	5,20	5,58
CaO	10,44	11,00	9,53	9,81	9,48	8,68	8,77
Na <sub>2</sub> O	2,97	2,28	3,37	3,92	3,56	3,65	3,27
K <sub>2</sub> O	1,07	0,76	1,23	1,42	1,34	1,37	1,39
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,55	0,40	0,72	0,83	0,68	0,91	0,75
P.F.	0,48	0,10	0,08	0,47	0,20	0,40	0,80
Total	100,53	99,53	98,14	100,92	99,61	99,64	99,62
Rb (ppm)	20,00	14,40	27,00	27,00	25,80	21,10	25,30
Ba	371,00	431,00	359,00	364,00	332,00	270,00	395,00
K	8882,61	6309,14	10210,85	11788,13	11124,01	11373,06	11539,09
Sr	709,00	605,90	824,00	876,00	838,60	884,60	834,10
Ni	110,00	192,00	70,00	60,00	44,00	n.d.	46,00
Cr	150,00	n.d.	50,00	50,00	n.d.	n.d.	n.d.
Co	51,00	57,80	36,00	32,00	36,10	31,90	35,50
Nb	46,00	31,60	61,00	61,00	50,90	55,40	60,40
Zr	227,00	195,70	296,00	303,00	281,40	300,30	329,10
Y	25,00	23,70	30,00	31,00	28,80	31,80	32,50
Hf	5,40	5,10	6,20	6,70	7,10	7,00	8,10
U	0,90	0,80	1,50	1,30	1,30	1,30	1,60
Th	2,80	2,50	6,30	3,90	3,90	3,70	5,30
Pb	< 5,00	0,80	12,00	< 5,00	1,10	1,40	1,40
Ga	22,00	17,40	26,00	24,00	22,10	23,70	22,20
Sc	24,00	29,00	17,00	18,00	19,00	15,00	18,00
Ti	25310,50	17261,25	22008,09	20719,49	23314,67	20797,41	20857,34
V	353,00	267,00	277,00	253,00	262,00	206,00	230,00
Cs	< 0,50	n.d.	< 0,50	< 0,50	0,20	0,20	0,10
Ta	3,50	2,50	4,10	4,40	3,80	3,90	4,30
Sn	2,00	2,00	4,00	3,00	3,00	2,00	3,00
La	31,10	22,40	43,40	43,10	32,80	37,50	38,40
Ce	68,90	48,00	91,70	95,60	68,80	78,90	79,20
Pr	8,77	6,50	11,60	11,90	9,28	10,74	10,63
Nd	36,70	27,90	47,70	50,60	39,60	46,10	44,90
Sm	8,00	6,15	10,00	10,50	8,25	9,13	9,14
Eu	2,52	2,15	3,15	3,25	2,88	3,25	3,10
Gd	7,20	5,98	9,10	9,00	7,39	8,45	8,14
Tb	1,10	0,94	1,30	1,30	1,17	1,29	1,27
Dy	5,50	4,64	6,70	6,60	5,65	6,05	6,16
Ho	1,00	0,84	1,20	1,20	1,03	1,14	1,12
Er	2,40	2,22	3,10	3,10	2,64	2,89	3,06
Tm	0,35	0,32	0,43	0,42	0,39	0,43	0,43
Yb	2,00	1,79	2,60	2,60	2,21	2,41	2,46
Lu	0,31	0,24	0,39	0,39	0,30	0,34	0,35



Tabela 2: Análises químicas de rocha total dos hawaítos da Ilha São Jorge (elementos maiores e menores em % peso; traços e terras raras em ppm). CVM = Complexo Vulcânico Manadas; CVR = Comp. Vul. Rosais; CVT = Comp. Vul. Topo; P.F. = Perda ao Fogo; n.d. = não determinado.

Unidade	CVM	CVM	CVT	CVM	CVT	CVT	CVT	CVM
Tipo de rocha	Hawaíto							
Amostra	SJ-11/08	SJ-14/08	SJ-05/08	SJ-15/08	SJ-04/08	SJ-10/08	SJ-08/08	SJ-02/08
SiO <sub>2</sub> (%)	45,96	46,17	46,18	46,94	47,38	47,45	48,19	48,36
TiO <sub>2</sub>	3,52	3,39	3,33	3,33	3,48	3,56	3,45	3,44
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,89	17,11	14,88	17,95	16,61	16,20	15,85	16,55
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,87	11,29	11,92	11,47	12,68	13,13	12,49	11,69
MnO	0,19	0,17	0,19	0,17	0,19	0,20	0,19	0,18
MgO	5,26	5,23	8,02	5,39	4,78	4,58	4,19	5,32
CaO	8,65	9,03	9,67	9,22	8,29	8,04	8,44	8,41
Na <sub>2</sub> O	3,77	3,93	3,70	4,02	4,31	4,59	4,04	3,99
K <sub>2</sub> O	1,42	1,45	1,43	1,45	1,34	1,41	1,75	1,80
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,90	0,85	0,63	0,82	0,70	0,68	0,78	0,82
P.F.	0,20	0,23	0,23	0,17	0,10	0,01	0,30	0,31
Total	99,63	98,39	100,18	100,59	99,66	99,83	99,67	100,25
Rb (ppm)	27,10	29,00	28,00	28,00	28,50	27,00	37,80	33,00
Ba	549,00	387,00	394,00	374,00	216,00	344,00	382,00	454,00
K	11788,13	12037,18	11871,15	12037,18	11124,01	11705,12	14527,63	14942,70
Sr	873,50	809,00	658,00	851,00	815,90	934,00	703,90	835,00
Ni	24,00	50,00	120,00	50,00	n.d.	< 20,00	n.d.	50,00
Cr	n.d.	40,00	190,00	30,00	n.d.	<20,00	n.d.	50,00
Co	32,70	33,00	46,00	32,00	32,00	26,00	27,00	32,00
Nb	57,20	62,00	57,00	61,00	55,80	55,00	54,90	75,00
Zr	313,00	304,00	286,00	301,00	300,80	299,00	337,20	371,00
Y	32,30	31,00	32,00	30,00	39,30	39,00	41,80	36,00
Hf	7,20	6,90	6,00	6,90	7,60	6,70	8,90	8,10
U	1,30	1,40	1,30	1,40	1,70	1,30	1,60	2,00
Th	3,90	4,00	3,60	3,90	4,20	4,10	4,50	5,90
Pb	0,70	< 5,00	6,00	< 5,00	1,50	< 5,00	1,40	7,00
Ga	22,10	25,00	23,00	24,00	25,40	25,00	24,60	26,00
Sc	15,00	17,00	23,00	16,00	16,00	15,00	19,00	18,00
Ti	21097,08	20329,91	19934,34	19952,32	20857,34	21324,83	20677,54	20593,63
V	205,00	244,00	284,00	237,00	235,00	251,00	235,00	269,00
Cs	0,20	< 0,50	< 0,50	< 0,50	0,20	< 0,50	0,20	< 0,50
Ta	4,00	4,60	3,80	4,50	3,90	4,10	4,00	4,90
Sn	3,00	4,00	3,00	3,00	3,00	6,00	3,00	4,00
La	39,10	42,90	35,30	43,40	38,40	41,70	38,50	53,00
Ce	82,70	94,50	75,00	94,90	80,00	89,10	79,60	114,00
Pr	11,16	12,00	9,43	12,00	10,43	11,20	10,91	14,30
Nd	46,80	49,70	38,00	50,20	44,50	46,90	48,00	56,70
Sm	9,32	10,40	8,20	10,40	9,22	10,70	10,26	11,80
Eu	3,22	3,31	2,61	3,30	3,29	3,39	3,60	3,63
Gd	8,24	8,90	7,50	9,00	9,14	9,80	9,96	10,70
Tb	1,30	1,30	1,20	1,30	1,49	1,50	1,61	1,60
Dy	6,25	6,80	6,20	6,80	7,43	8,00	7,89	8,00
Ho	1,15	1,30	1,20	1,20	1,31	1,50	1,46	1,50
Er	3,03	3,20	3,00	3,20	3,52	3,70	3,90	3,70
Tm	0,42	0,44	0,43	0,43	0,50	0,53	0,54	0,53
Yb	2,32	2,60	2,50	2,70	2,81	3,10	3,23	3,10
Lu	0,34	0,41	0,39	0,41	0,42	0,48	0,45	0,48

O diagrama  $K_2O$  versus  $Na_2O$  (Figura 13 – Middlemost, 1975) indica que o vulcanismo da Ilha São Jorge é de natureza sódica.

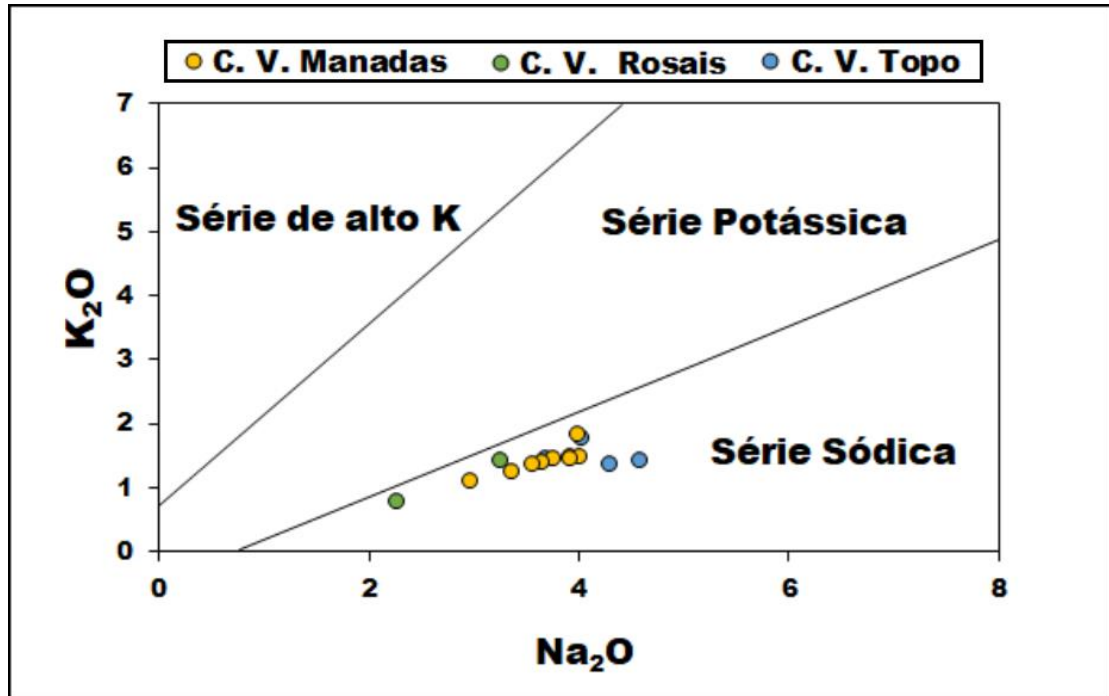


Figura 13: Diagrama  $K_2O$  versus  $Na_2O$  (Middlemost, 1975) que mostra a natureza sódica das rochas efusivas da Ilha São Jorge.

Nos diagramas do tipo *Harker* de elementos maiores e menores em relação ao ID (Figura 14), o  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$  e  $P_2O_5$  apresentam correlação negativa, enquanto o  $CaO$  possui correlação positiva. Os padrões das correlações indicam que a cristalização fracionada de olivina, augita, plagioclásio e minerais opacos é o processo magmático responsável pela geração dos diferentes tipos de rochas.

O padrão da correlação dos óxidos com o ID é similar para os três complexos vulcânicos da Ilha São Jorge (CVT, CVR e CVM). O CVR apresenta maior concentração de  $MgO$  (5,58 a 11,74%) e de  $CaO$  (8,77 a 11,00 %), e menor de  $TiO_2$  (2,88 a 3,48%),  $Al_2O_3$  (13,42 a 16,89%),  $Na_2O$  (2,28 a 3,27%),  $K_2O$  (0,76 a 1,39%) e  $P_2O_5$  (0,40 a 0,75%) em relação às amostras do CVT e CVM.

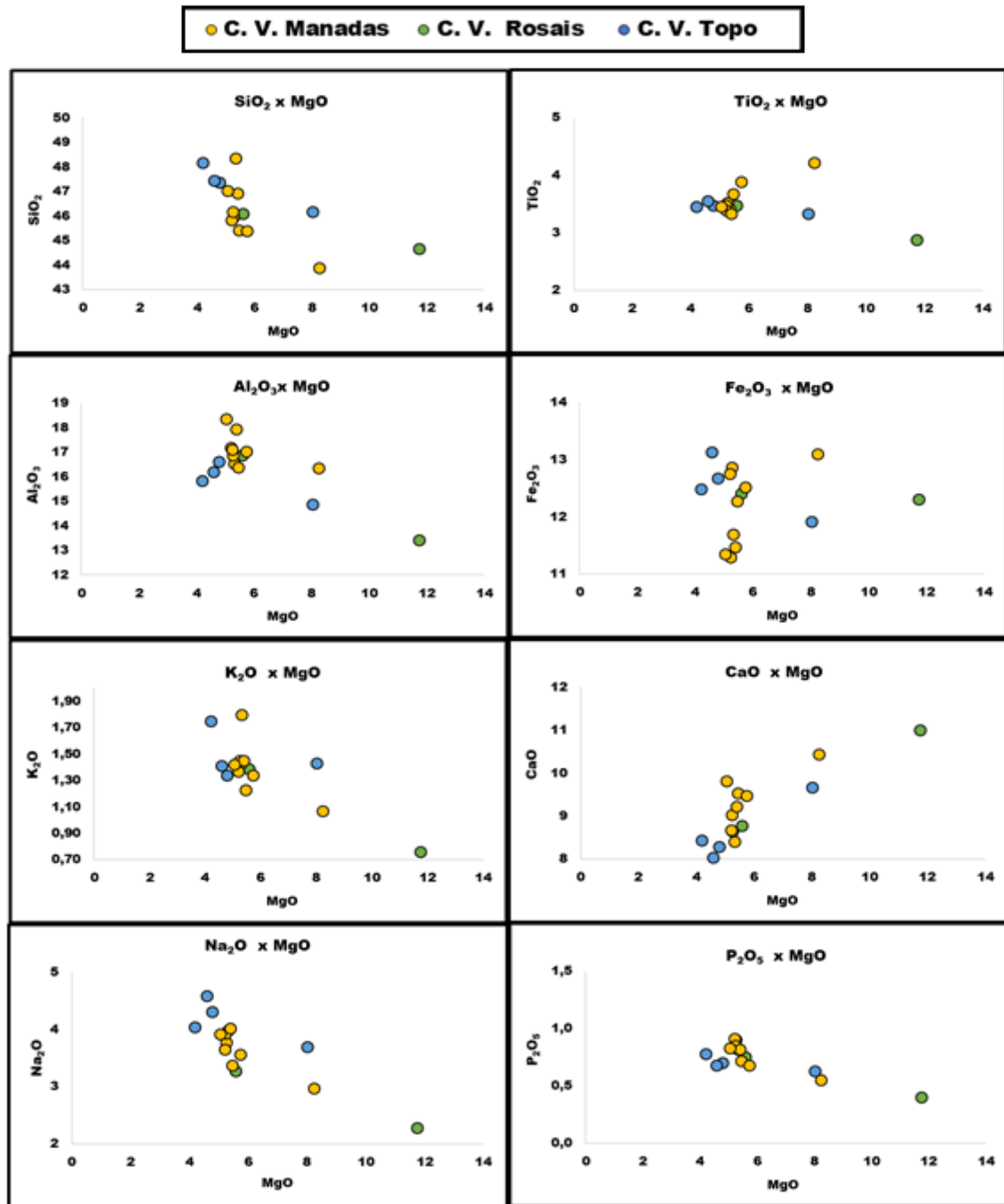


Figura 14: Diagramas do tipo *Harker* de variação de elementos maiores e menores (% em peso) *versus* MgO (% em peso), para as rochas efusivas da Ilha São Jorge.

Nos diagramas do tipo *Harker* de elementos-traço em relação ao ID (Figura 15), observa-se que Ba, Sr e Cr mostram correlações negativas, enquanto que Ni, Co e Sc apresentam correlações positivas.

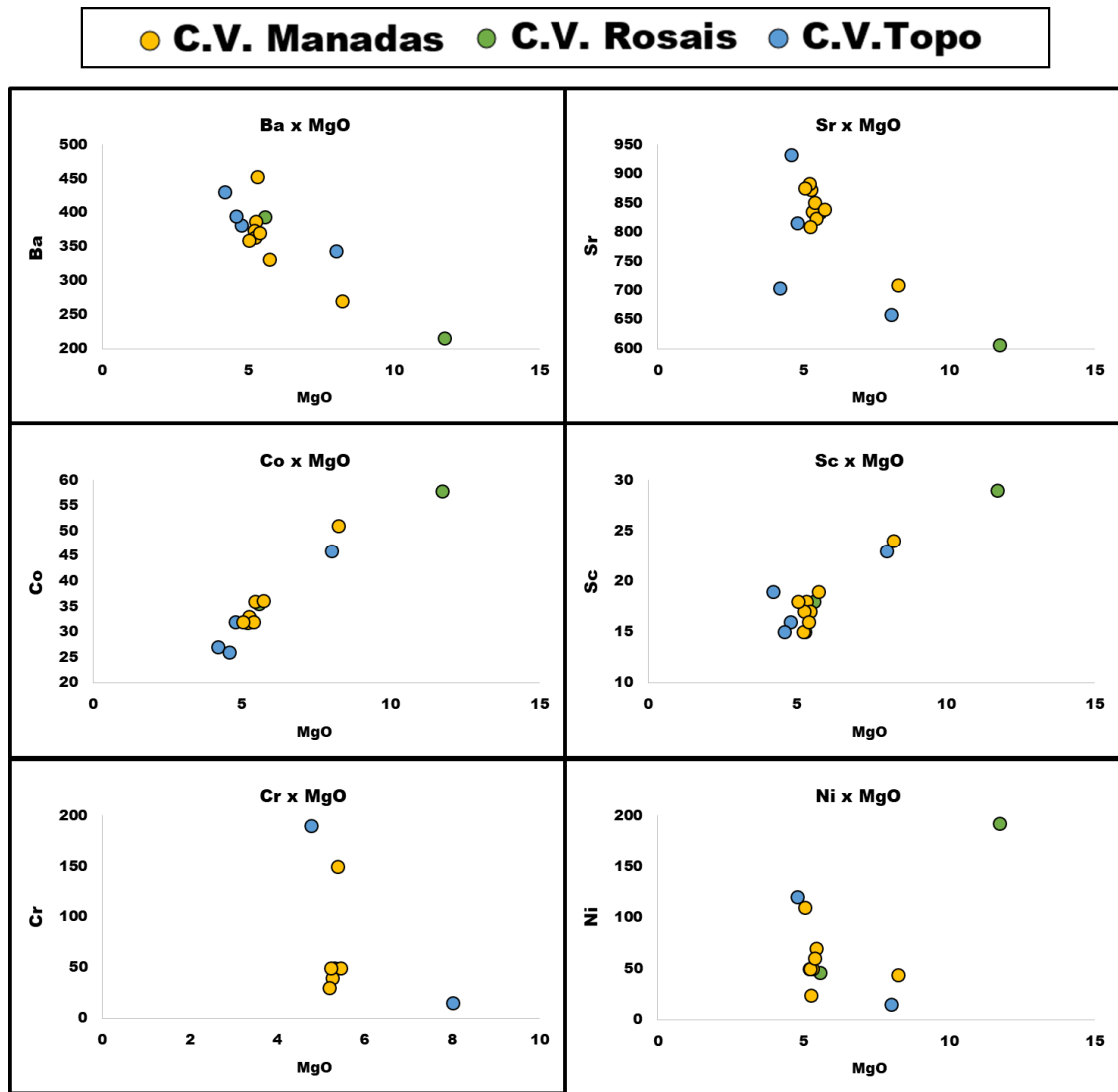


Figura 15: Diagramas do tipo *Harker* de variação de elementos-traço (ppm) *versus* MgO (% em peso), para as rochas efusivas da Ilha São Jorge.

No diagrama multi-elementar de elementos-traço normalizados pelo manto primitivo segundo Sun & McDonough (1989; Figura 16), as amostras das três unidades vulcânicas da Ilha São Jorge (CVT, CVR e CVM) apresentam características semelhantes, com enriquecimento de elementos litófilos de grande raio iônico (LILE) e elementos de alto potencial iônico (HFSE) em relação aos elementos terras raras pesados (ETRP). As rochas possuem anomalias positivas de U, Ta e Sr, e anomalias negativas de K. As amostras do CVM apresentam anomalia positiva de Ti. Um basanita (SJ-01/08) da CVR é o menos enriquecido com relação a todos os elementos incompatíveis.

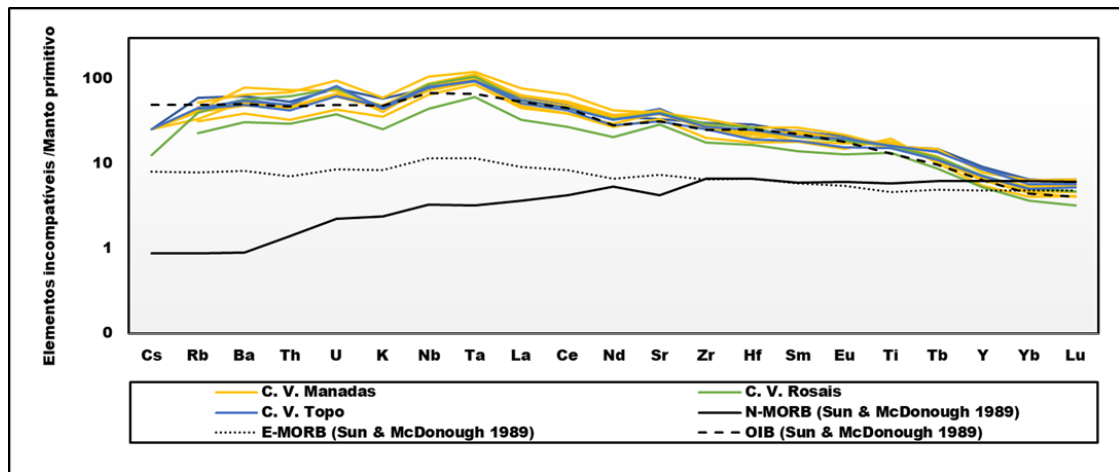


Figura 16: Diagrama multi-elementar de elementos-traço das rochas efusivas da Ilha São Jorge, normalizados pelo manto primitivo (Sun & McDonough, 1989).

O diagrama multi-elementar de elementos terras raras (ETR) normalizados para os valores do condrito segundo Sun & McDonough (1989; Figura 17), para as rochas efusivas da Ilha São Jorge, mostra um padrão de enriquecimento em elementos terras raras leves (ETRL) em relação aos ETRP. As amostras de dois hawaítos (CVM - SJ-02/08 e CVT - SJ-04/08) são as rochas mais enriquecidas em ETRL. Todas as amostras apresentam anomalia negativa de Eu. O padrão observado nas rochas da Ilha São Jorge é semelhante ao padrão dos basaltos de ilha oceânica (OIB) (Figura 16), corroborando com um ambiente geotectônico do tipo intraplaca definido para o Arquipélago dos Açores.

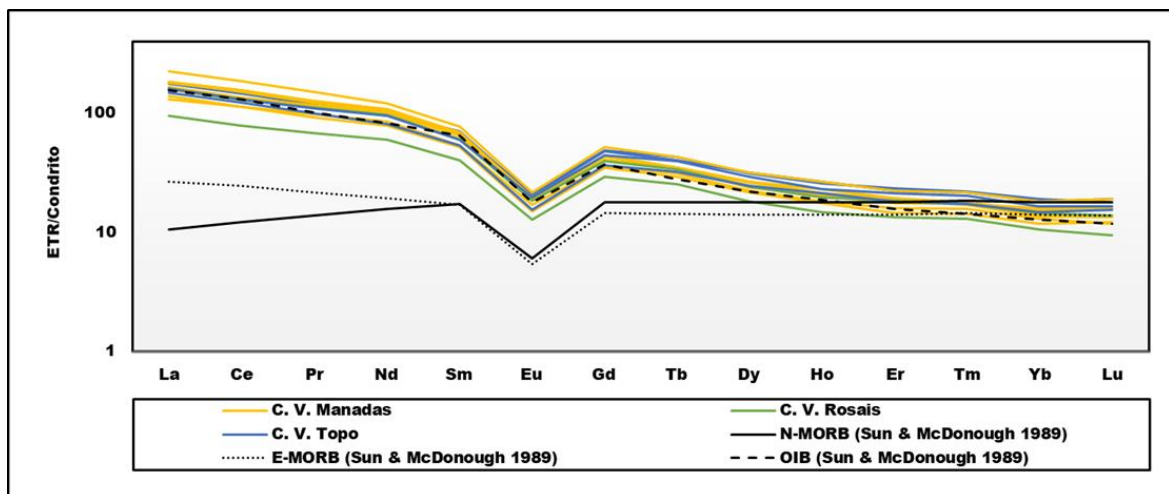


Figura 17: Diagrama multi-elementar de elementos terras raras das rochas efusivas da Ilha São Jorge, normalizados para os valores do condrito (Sun & McDonough, 1989).

## DISCUSSÕES

A presença de textura porfirítica é frequente nas rochas vulcânicas da Ilha São Jorge e sugere que, no mínimo, dois estágios de cristalização fracionada ocorreram no líquido magmático. O primeiro ocorreu em alta temperatura, com pequenas taxas de resfriamento, gerando os fenocristais. A segunda fase permitiu a formação dos cristais da matriz, devido ao resfriamento rápido (Ribeiro, 2011).

A feição de reabsorção observada com frequência em fenocristais de olivina, augita e plagioclásio (textura *sieve*), é típica de desequilíbrio relacionado à rápida descompressão do magma, um processo comum na mineralogia de rochas vulcânicas (Nelson & Montana, 1992; Ribeiro, 2011). Esta textura é decorrente da mudança de pressão, temperatura, teor de água e composição do magma (Renjith, 2014).

A textura *sieve* grossa se desenvolve durante o processo de descompressão, quando o magma subsaturado em água ascende rapidamente (Nelson & Montana, 1992; Renjith, 2014). Como consequência, a pressão da água do sistema aumenta e a estabilidade do plagioclásio se reduz, causando dissolução (Nelson & Montana, 1992; Renjith, 2014). A textura *sieve* fina é formada devido à dissolução parcial dos cristais pré-existentes na câmara, por reação com magma mais quente e rico em Ca, que foi trazido por eventos de recarga. O processo de reabsorção gera “buracos” na superfície do cristal, devido à dissolução, que podem ser preenchidos por outros minerais, na forma de inclusões (Renjith, 2014).

O embainhamento nas bordas da olivina e do plagioclásio indica que ocorreu uma cristalização precoce dos minerais, os quais posteriormente, entraram em desequilíbrio durante a cristalização fracionada, à medida que a composição do magma evoluiu, resultando em corrosão magmática (Ribeiro, 2011).

A zonação observada em alguns fenocristais de augita e plagioclásio ocorre como resultado de pequenas variações na composição química do mineral, devido à sua incapacidade de manter o

equilíbrio químico durante o resfriamento rápido do magma, com variações bruscas de temperatura e pressão (Beier *et al.*, 2006; Ribeiro, 2011).

A epidotização, que ocorre em alguns cristais de augita, consiste em um produto de alteração relacionado ao intemperismo (Teixeira *et al.*, 2000).

A boulingita é o produto da alteração da olivina, principalmente rica em Mg (Delvigne *et al.*, 1979), sob condições deutéricas tardi-magmáticas, resultante da interação com fluidos (Almeida & Hollanda, 2009).

A borda de reação de minerais opacos na kaersutita indica desequilíbrio em profundidade rasa do mineral. Isto sugere que a cristalização da kaersutita ocorreu em níveis mais profundos e que seria um xenocristal trazido à superfície pelo magma hospedeiro (Ribeiro, 2011). A presença de xenólitos em lavas de composições primitivas sugere ascensão rápida do magma e como consequência, os xenocristais desenvolvem bordas de reação, decorrentes da diminuição brusca da pressão (desidratação) (Beier *et al.*, 2006). Nicholis & Rutherford (2004) sugerem que a descompressão produz dissolução dos cristais, mas como o material é transportado para longe, devido às altas taxas de difusão, as bordas de reação não se desenvolvem. Neste caso, para gerar condições para a formação de bordas de reação, a kaersutita precisa estar em profundidade rasa, fora do campo de estabilidade do anfibólio, com transporte suprimido. Portanto, as bordas de reação na kaersutita sugerem algum tempo de residência do magma em nível superficial. Os minerais opacos da borda de reação foram descritos como magnetita nas rochas da São Jorge (Nicholis & Rutherford, 2004; Ribeiro, 2011).

Nos diagramas do tipo *Harker* de elementos maiores e menores, o empobrecimento em CaO, observado nas rochas ao longo da evolução magmática, reflete a cristalização de plagioclásio e clinopiroxênio cálcico. As correlações negativas do  $\text{TiO}_2$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  com o ID ao longo da diferenciação, indicam fracionamento de minerais opacos ricos em Fe-Ti (provavelmente titanomagnetita), marcado principalmente pela diminuição do conteúdo destes elementos em algumas amostras do CVM. A variação do conteúdo de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  em relação ao ID reflete o fracionamento de plagioclásio, que é mais acentuado para três amostras do CVT, com um empobrecimento deste elemento quando o

$\text{MgO} \cong 5,5\%$ . Estas inflexões de algumas rochas do CVT para o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ocorrem quando o fracionamento de plagioclásio se torna predominante e se sobrepõe a cristalização de olivina e augita. A correlação negativa de  $\text{SiO}_2$  com o ID é compatível com a cristalização da olivina, enquanto que a correlações negativas de  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$  com o  $\text{MgO}$  indicam que esses óxidos não representaram fases importantes durante a evolução do magma.

Nos diagramas do tipo *Harker* de elementos-traço, observa-se que Ba, Sr e Cr mostram correlações negativas com o  $\text{MgO}$ , sugerindo que esses elementos não tiveram participações relevantes em estágios avançados da diferenciação magmática para as amostras de algumas unidades da ilha. Contudo, as amostras do CVM apresentam diminuição da concentração de Sr e Cr (quando o  $\text{MgO} \cong 5,0\%$ ), sugerindo que o plagioclásio e a augita, respectivamente, são fases importantes durante os processos de diferenciação magmática para essas amostras. As correlações positivas do Ni, Co e Sc com a evolução do magma, refletem o fracionamento de olivina e augita.

As rochas do CVT e do CVM são as mais enriquecidas em elementos incompatíveis (Ba, Sr) e as mais empobrecidas em elementos compatíveis (Co e Sc), comparando-se às amostras do CVR.

Os padrões observados nos diagramas do tipo *Harker* de elementos maiores, menores e traço podem ser explicados pela cristalização fracionada de olivina  $\pm$  augita  $\pm$  plagioclásio  $\pm$  minerais opacos. Estes dados são coerentes com os dados petrográficos das rochas da ilha.

Nas rochas da Ilha São Jorge, o plagioclásio é cálcico e a olivina é magnesiânica, sendo que, segundo Ribeiro (2011), o primeiro corresponde a bytownita e labradorita ( $\text{An}_{81-55}$ ) e o segundo corresponde a fosterita ( $\text{Fo}_{87-60}$ ).

As características presentes no diagrama multi-elementar de elementos-traço normalizados em relação ao manto primitivo (Sun & McDonough, 1989), como o enriquecimento em LILE e HFSE com relação aos ETRP, são típicas de ambientes de OIB. A anomalia negativa de K está relacionada com a composição da fonte. As anomalias positivas de Sr (em todas as amostras) e de Ti (nas amostras do CVM), refletem, respectivamente, a acumulação de plagioclásio e de minerais opacos. Esse acúmulo de fenocristais ocorre devido ao fluxo magmático e coincide com as texturas



glomeroporfíricas observadas na petrografia de alguns basaltos alcalinos e hawaítos. As anomalias positivas de U e Ta são compatíveis ao magmatismo intraplaca oceânico. Estes dados de elementos-traço sugerem que a fonte de OIB da ilha São Jorge é um pouco mais enriquecida nesses elementos incompatíveis que a média do padrão de OIB, de acordo com Sun & McDonough (1989).

Os dados do diagrama de ETR normalizados pelo condrito (Sun & McDonough, 1989) mostram os padrões de distribuição de ETRL mais fracionados em relação aos ETRP, com maior enriquecimento para as amostras do CVM. Essa característica é típica de lavas de ilha oceânica (Machado *et al.*, 2008). Os padrões das amostras estudadas formam *trends* subparalelos e são similares aos de rochas resultantes de baixo grau de fusão parcial, e segundo Machado *et al.* (2008), são originadas de fontes mantélicas enriquecidas em ETR ou de uma fonte com granada. A anomalia negativa de Eu, observada em todas as amostras, sugere fracionamento de plagioclásio.

## CONCLUSÕES

Na Ilha São Jorge ocorrem basanitos, basaltos alcalinos e hawaítos, os quais pertencem às unidades vulcânicas CVR, CVT e CVM. Os dois últimos complexos vulcânicos apresentam composições mais enriquecidas em relação ao primeiro, com enriquecimento em elementos-traço incompatíveis (Ba, Sr, Nb, Ta, Zr, Hf e Y) e empobrecimento em elementos-traço compatíveis (Co e Sc). Além disso, as rochas do CVT e do CVM são mais evoluídas, com maiores concentrações de SiO<sub>2</sub> e menores de MgO, quando comparadas às rochas do CVR.

O *trend* evolutivo das rochas da Ilha São Jorge nos diagramas do tipo *Harker* é o resultado da cristalização de olivina ± augita ± plagioclásio ± minerais opacos. A cristalização ocorreu em dois estágios. O primeiro ocorreu em alta temperatura, com a geração de fenocristais. O segundo permitiu a formação dos cristais da matriz, devido ao resfriamento rápido.

As feições de reabsorção encontradas em fenocristais de olivina, augita e plagioclásio, a textura *sieve* no plagioclásio, o embainhamento nas bordas de olivina e plagioclásio, a zonação em cristais

de augita e plagioclásio, e as bordas de reação na kaersutita indicam que o magma sofreu descompressão rápida, com variação brusca de temperatura e pressão.

As diferenças encontradas nos padrões de elementos-traço incompatíveis, como a anomalia positiva de Ti nas amostras do CVM e um menor enriquecimento de todos os elementos incompatíveis em um basanita da CVR, sugerem pequenas variações no grau de fusão parcial, durante a geração do magma da Ilha São Jorge.

Os padrões de ETR observados para as rochas da Ilha São Jorge apresentam teores similares, com *trends* subparalelos, que indicam que as rochas foram geradas por baixas taxas de fusão parcial.

Os dados químicos das rochas da Ilha São Jorge são compatíveis com dados de ambiente geotectônico do tipo intraplaca oceânico (OIB). As lavas de composição basáltica são predominantes, de afinidade alcalina sódica, originadas a partir de um magma mantélico enriquecido.

Trabalhos futuros, com a obtenção da composição isotópica das lavas contribuirão para o entendimento das heterogeneidades mantélicas e para a discussão da gênese das rochas dos Açores, sobretudo em relação às divergências existentes entre as composições de rochas da Ilha São Jorge e de rochas das outras ilhas do Grupo Central. Outrossim, a obtenção de dados de química mineral ajudará a identificar alterações composicionais nos minerais relacionadas às variações de temperatura e pressão.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia (Portugal) e à CAPES (Convênio FCT-CAPES 330/13), pelo financiamento do Projeto de Cooperação Bilateral “Estratigrafia e Geoquímica das Sequências Vulcânicas da Ilha da Graciosa e São Jorge – Arquipélago dos Açores”.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABDEL MONEM, A.A.; FERNANDEZ, L.A.; BOONE, G.M. **K-Ar-Ages from the eastern Azores group (Santa Maria, Sao Miguel and the Formigas islands)**. *Lithos*, v.8, p. 247–254. 1975.
2. ALMEIDA, V.V. & HOLLANDA M.H.B.M. **Petrografia, química mineral e litoquímica de diques máficos cambrianos do extremo oriental do estado da Paraíba**. *Revista Brasileira de Geociências*, 39(3): 580-598. 2009.
3. AZEVEDO, J.M.M.; ALVES, E.I.; DIAS, J.L. **Contributo para a interpretação vulcanoestrutural da ilha do Corvo, Açores**. *Ciências da Terra (UNL)*, N° Esp. V: A5-A8. 2003.
4. AZEVEDO, J.M. & FERREIRA, M.R.P. **The volcanotectonic evolution of Flores Island, Azores (Portugal)**. *Journ. Vulcanol. Geother. Res.* 156, p. 90–102. 2006.
5. BEIER, C.; HAASE, K.M.; HANSTEEN, T.H. **Magma evolution of the Sete Cidades Volcano, São Miguel, Azores**. *Journal of Petrology*, 47, p. 1375–1411. 2006.
6. BEIER, C.; TURNER, S.; PLANK, T.; WHITE, W. **A preliminary assessment of the symmetry of source composition and melting dynamics across the Azores plume**. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol. 11, Q02004, doi: 10.1029/2009GC002833. 2010.
7. BEIER, C.; HAASE, K.M.; TURNER, S.P. **Conditions of melting beneath the Azores**. *Lithos*, 144–145, p. 1–11. 2012.
8. CHACE, F.M. **Abbreviations in field and mine geological mapping**. *Scientific Communications. Economy Geology*, v. 51, pp. 712-723. 1956.
9. DELVIGNE, J.; BISDOM, E.B.A.; SLEEMAN, J.; STOOPS, G. **Olivines, their pseudomorphs and secondary products**. *Pedologie*, 29, 247-309. 1979.
10. DEMAND, J.; FABRIOL, R.; GERAD, F.; LUNDT, F.; CHOVELON, P. **Prospection geothermique, iles de Faial et de Pico (Acores): rapport geologique, geochimique et gravimetrique**. *Rapport B.R.G.M. 82S.G.N.003G.H.T.* 65p. 1982.
11. FERREIRA, M.P. & AZEVEDO, J.M. **Evolução geológica do arquipélago dos Açores baseada na geocronologia**. *Seminar Geologia Atlântica, A.P.G. 9*, Ponta Delgada (São Miguel, Açores). 1995.
12. FORJAZ, V.H. & FERNANDES, N.S.M. **Folha “B” da ilha de S. Jorge (Açores) da Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000**. *Serv. Geol. Portugal*. 1970.
13. FORJAZ, V. H. & FERNANDES, N. S. M. **Carta Geológica de Portugal na escala de 1:50000. Noticia explicativa das Folhas “A” e “B”, Ilha de São Jorge (Açores)**. *Serv. Geol. Portugal*, 32p. 1975.
14. FRANÇA, Z.; CRUZ, J.; NUNES, J.C.; FORJAZ, V.H. **Geologia dos Açores: Uma perspectiva actual**. *Revista Açoreana*, 10: 140p. 2005.
15. FRANÇA, Z. **Tipicidade Vulcânica do Arquipélago Açoriano**. Disponível em: [www.researchgate.net/publication/236174126\\_Tipicidade\\_Vulcanica\\_do\\_Arquipelago\\_Acoriano](http://www.researchgate.net/publication/236174126_Tipicidade_Vulcanica_do_Arquipelago_Acoriano). Acessado em: 28/11/2016.
16. GENTE, P.; DYMENT, J.; MAIA, M.; GOSLIN, J. **Interaction between the Mid-Atlantic Ridge and the Azores hotspot during the last 85 Myr: Emplacement and rifting of the hotspot-derived plateaus**. *G3* (4) 10, 8514. 2003.

17. GEORGEN, J.E. **Lithospheric control on the spatial pattern of Azores hotspot seafloor anomalies: Constraints from a model of plume-triple junction interaction.** *Geophysical Research Letters*, vol. 38, L19305, doi:10.1029/2011GL048742. 2011.
18. HILDENBRAND, A.; MADUREIRA, P.; MARQUES, F.O.; CRUZ, I.; HENRY, B.; SILVA, P. **Multi-stage evolution of a sub-aerial volcanic ridge over the last 1.3 Myr: S. Jorge Island, Azores Triple Junction.** *Earth and Planetary Science Letters*, 273, 289–298. 2008.
19. HILDENBRAND, A.; MARQUES, F.O.; COSTA, A.C.G.; SIBRANT, A.L.R.; SILVA, P.F.; HENRY, B. **Reconstructing the architectural evolution of volcanic islands from combined K/Ar, morphologic, tectonic, and magnetic data: The Faial Island example (Azores).** *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 241–242, 39–48. 2012.
20. LARREA, P.; WIJBRANS, J.R.; GALÉ, C.; UBIDE, T.; LAGO, M.; FRANÇA, Z.  **$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  constraints on the temporal evolution of Graciosa Island Azores (Portugal).** *Bulletin of Volcanology*, 76, 796. 2014.
21. LARREA, P.; WIDOM, E.; FRANÇA, Z.; LAGO, M. **Petrology of the Azores Islands.** *Volcanoes of the Azores, Active Volcanoes of the World*, [https://doi.org/10.1007/978-3-642-32226-6\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-642-32226-6_10). 2018.
22. MACDONALD, G.A. **Composition and origin of Hawaiian lavas.** In: Coats R. R., Hay R. L. & Anderson, C. A. (eds.). *Studies in volcanology: a memoir in honour of Howel Williams*. 23. *Geol. Soc. Amer. Mem.* 116, 477-522. 1968.
23. MACHADO, A., AZEVEDO, J.M.M., ALMEIDA, D.P.M., CHEMALE JR., F. **Geochemistry of Volcanic Rocks from Faial Island (Azores):** *E-Terra, Revista Eletrónica de Ciências da Terra*, v. 5, p. 1–14. 2008.
24. MENDES, V.B.; MADEIRA, J.; SILVEIRA, A.B.; TROTA, A.; ELOSEGUI, P.; PAGARETE, J. **Present-day deformation in São Jorge Island, Azores, from episodic GPS measurements (2001–2011).** *Advances in Space Research*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2012.10.019>. 2013.
25. MIDDLEMOST, E.A.K. **The basalt clan.** *Earth Science Reviews*, 11, 337-364. 1975.
26. MIDDLEMOST, E.A.K. **Naming materials in the magma/igneous rock system.** *Earth Science Review*, v. 37, p. 215-224. 1994.
27. NELSON, S.T. & MONTANA, A. **Sieve-textured plagioclase in volcanic rocks produced by rapid decompression.** *American Mineralogist*, Volume 77, pages 1242-1249. 1992.
28. NICHOLIS, M.G. & RUTHERFORD, M.J. **Experimental constraints on magma ascent rate for the Crater Flat volcanic zone hawaiite.** *Geology*, 32: 489-492. 2004.
29. NUNES, J.C. **A actividade vulcânica na ilha do Pico do Plistocénico Superior ao Holocénico: mecanismo eruptivo e hazard vulcânico.** Tese de Doutoramento, Dep. Geociências, Univ. Açores, 357 pp (não publicado). 1999.
30. PACHECO, J.M.; FERREIRA, T.; QUEIROZ, G.; WALLENSTEIN, N.; COUTINHO, R.; CRUZ, J.V.; PIMENTEL, A.; SILVA, R.; GASPAS, J.L.; GOULART, C. **Notas sobre a geologia do arquipélago dos Açores.** In: DIAS, R.; ARAÚJO, A.; TERRINHA, P.; KULLBERG, J.C. (Eds), *Geologia de Portugal*, vol. 2, Escolar Editora, 595-690. 2013.
31. RENJITH, M.L. **Micro-textures in plagioclase from 1994 e 1995 eruption, Barren Island Volcano: Evidence of dynamic magma plumbing system in the Andaman subduction zone.** *Geoscience Frontiers*, 5: 113-126. 2014.
32. RIBEIRO, L.J.C. **Caracterização Petrológica e Geoquímica do Vulcanismo da Ilha de São Jorge, Açores.** Tese de Doutoramento. Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro, Portugal, 275p. 2011.

33. ROSSETTI, M.M.M.; LIMA, E.F.; ROSSETTI, L.M.M.; SCHERER, C.M.; LUZ, F.R.; SOMMER, C.A. **Caracterização Morfológica das Lavas Básicas na Erupção de 1580 da Ilha de São Jorge, Açores.** Simpósio de Vulcanismo e Ambientes Associados, Cidade Universitária, Universidade de São Paulo-USP. 2015.
34. SHIVOLA, J. & SCHMID, R. **List of Mineral Abbreviations.** Recommendations by the IUGS Subcommittee on the Systematics of Metamorphic Rocks. 2007.
35. SUN, S.S. & MCDONOUGH, W.F. **Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes.** In: Saunders, A.D. and Norry, M.J. (Eds.). *Magmatism in ocean basins*, Geological Society of London, Special, Publication, 42, 313-345. 1989.
36. TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M.C.M.; FAIRCHILD, T.R.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra.** Série de Textos Básicos de Geociências. Editora Oficina de Textos. 2000.
37. WHITE, W.M.; SCHILLING, J.-G.; HART, S.R. **Evidence for the Azores mantle plume from strontium isotope geochemistry of the Central North Atlantic.** *Nature*, 263: 659-663. 1976.

## **CAPÍTULO 3 – Conclusões**

### 3. CONCLUSÕES

As rochas vulcânicas da Ilha São Jorge foram classificadas, segundo dados químicos, como basanitos, basaltos alcalinos e hawaítos, com afinidade alcalina sódica. Essas rochas estão inseridas nos Complexos Vulcânicos Topo, Rosais e Manadas.

Os dados petrográficos mostraram que as rochas são formadas por fenocristais de olivina, augita, plagioclásio, minerais opacos e kaersutita, imersos em uma matriz com composição mineralógica igual aos fenocristais e vidro vulcânico. As micro-texturas encontradas, como a textura *sieve*, que ocorre em alguns fenocristais de plagioclásio; feições de reabsorção em olivina, augita e plagioclásio; embainhamento nas bordas de olivina e plagioclásio; zonação em alguns fenocristais de augita e plagioclásio; e bordas de reação na kaersutita são causadas devido à descompressão rápida do magma, com variação brusca de temperatura e pressão. A epidotização, que ocorre em alguns cristais de augita, é um produto de alteração resultante do intemperismo. A boulingita, que ocorre nas fraturas de alguns cristais de olivina, é resultante da interação com fluidos, sob condições deutéricas tardi-magmáticas.

Os diagramas do tipo *Harker* para elementos maiores, menores e traço mostram cristalização fracionada de olivina  $\pm$  augita  $\pm$  plagioclásio  $\pm$  minerais opacos. Esses dados são coerentes com a caracterização mineralógica da petrografia.

A interpretação do diagrama multi-elementar de elementos-traço permite concluir que as lavas são de ambiente de OIB, com enriquecimento em LILE e HFSE com relação aos ETRP. As anomalias positivas de U e Ta são compatíveis ao magmatismo intraplaca oceânico.

Os padrões de enriquecimento de ETR, mostram fracionamento de ETRL em relação aos ETRP, que é uma característica típica de lavas de ilha oceânica. Eles também apontam que as rochas são resultantes de baixo grau de fusão parcial, originadas de fontes mantélicas enriquecidas.

## **ANEXOS**



## **ANEXO 1: CONDIÇÕES PARA SUBMISSÃO DE ARTIGO CIENTÍFICO NA REVISTA GEOCIÊNCIAS DA UNESP (UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO) DE RIO CLARO.**

Como parte do processo de submissão, os autores são obrigados a verificar a conformidade da submissão em relação a todos os itens listados a seguir. As submissões que não estiverem de acordo com as normas serão devolvidas aos autores.

### **TIPO DE TRABALHO PUBLICADO**

A revista publica artigos com dados e resultados originais e inéditos de pesquisas científicas e técnicas, redigidos em português, inglês ou espanhol.

### **APRESENTAÇÃO DO TRABALHO**

a) O trabalho deve ter:

1) Título, coerente com o conteúdo.

2) A versão do artigo deve ser “cega”, ou seja, sem identificação dos autores, para os trâmites de avaliação.

3) O nome dos autores, bem com as Instituições/empresa(s) a que se vincula(m), com endereço(s) (logradouro, CEP, cidade, estado, endereço eletrônico), completos e sem abreviaturas ou siglas, devem constar no Passo 3. Inclusão de Metadados.

4) Sumário dos itens e subitens, mostrando a hierarquia deles.

5) Resumo de até 200 palavras, em parágrafo único, sem incluir citações bibliográficas, seguido de até cinco palavras-chave que reflitam a natureza e conteúdo do trabalho e escritos na língua utilizada no artigo.

6) Título, resumo e palavras-chave vertidos para outra língua dentre as indicadas acima.

b) A estrutura do artigo deve ter, ressalvada a natureza do trabalho que exija explanação diferente e mais adequada à boa exposição das informações:

1) Introdução, contextualizando o trabalho e definindo o objetivo do artigo.

2) Materiais, métodos e técnicas.

3) Apresentação de dados.

4) Discussões, interpretações e resultados.

5) Conclusões ou considerações finais.

6) Agradecimentos.

7) Lista das referências bibliográficas citadas.

c) A hierarquia de itens e subitens deve ser feita em até 5 níveis:

1) Nível 1: negrito, em maiúsculas, centrado. Ex.: **INTRODUÇÃO.**

2) Nível 2: negrito, caixa alta, alinhado à esquerda. Ex.: **LITOLOGIA.**

3) Nível 3: negrito, primeiras letras em maiúsculas e as demais em minúsculas, alinhado à esquerda. Ex.: **Aspectos do Relevo.**

4) Nível 4: itálico, negrito, primeiras letras em maiúsculas e as demais em minúsculas, alinhado à esquerda. Ex.: ***Xistos do Grupo São Roque.***

5) Nível 5: itálico, não-negrito, primeiras letras em maiúsculas e as demais em minúsculas, alinhado à esquerda.

Ex.: *Características Texturais dos Sedimentos.*

## ENTREGA DO ARTIGO

a) O texto deve ser elaborado em folhas A4, margens de 2 cm, espaço duplo, recuos (parágrafos) de 0,5 cm, fonte *Times New Roman* de 12 pontos, sem formatação, sem hifenização, utilizando o *Microsoft Word*. Extensão: até 30 páginas, incluindo texto, ilustrações e referências bibliográficas. Não são aceitos textos escaneados.

1) Unidades e símbolos de medidas devem seguir o sistema de padronização internacional (exs.: M para milhão, G para bilhão, m, cm, km, kb, MPa). Símbolos não-usuais e abreviaturas, quando utilizados, devem ter os significados explicitados quando da primeira citação no texto.

2) Equações e fórmulas devem ser inseridas no texto em formato JPG. Todos os símbolos e abreviaturas utilizados devem ter seus significados explicitados. Se forem citadas no texto podem ser numeradas com algarismos arábicos sucessivos, colocados à direita.

3) Palavras estrangeiras e citações, se usadas, devem aparecer em itálico.

4) Notas de rodapé não são aceitas (inclusive para indicação dos nomes de instituições ou empresas). Eventuais notas complementares podem ser inseridas no fim do texto, referidas como APÊNDICES, limitados à exposição de detalhes imprescindíveis à compreensão do texto (p. ex., minúcias de ensaios, deduções de equações).

5) A redação deve ser impessoal (terceira pessoa).

## ILUSTRAÇÕES

a) As ilustrações e suas legendas devem ser apresentadas em separado do texto, com as respectivas legendas.

b) São ilustrações:

1) TABELAS (sem molduras verticais das células) e QUADROS (com molduras horizontais e verticais das células) elaboradas no *Word* ou *Excel*, dispostas em formato Retrato.

2) FIGURAS, que são mapas, perfis, diagramas e assemelhados, em Preto & Branco ou coloridas, numeradas sequencialmente com algarismos arábicos, na ordem de inserção no texto. As figuras devem ser apresentadas apenas em formato .jpg ou .tif, que permita elaboração para o padrão da revista. No texto devem ser apontados os locais de inserção em uma linha logo após o parágrafo em que é feita a primeira citação.

3) FOTOS, FOTOMICROGRAFIAS, IMAGENS e assemelhados, e PRANCHAS, que são quadros de tais documentos. Devem ser apresentadas em tons de cinza ou coloridas, em originais ou escaneadas em formato .jpg, com resolução mínima de 300 dpi. Não são aceitas cópias xerográficas. Inserir escala gráfica, se necessário. Indicações devem ter tamanhos ou espessuras que comportem redução e visibilidade no tamanho de largura máxima entre 8 a 17 cm (largura útil da página impressa).

## CITAÇÕES BIBLIOGRÁFICAS

a) Citações no texto

1) de um autor – ex.: Adams (1989), (Adams, 1996);

2) de dois autores – exs.: Cox & Singer (1986), (Cox & Singer, 1986);

3) de trabalhos de mais de 2 autores – exs.: Lopes et al. (1992), (Lopes et al., 1992);

4) de mais de um trabalho do mesmo autor e do mesmo ano ou de anos distintos – exs.: Johnson (1995a, b, c); Roberts (1996, 1997); (Johnson, 1995a, b; Roberts, 1996a, b, 1997);

5) Para citações indiretas, usar segundo em vez de apud – ex.: Lucas (1975, segundo Silva, 1993).

6) Evitar o uso de op. cit. – ex.: Martins (1998) em vez de Martins (op. cit.).

**b) Lista de REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:**

1) Seguir a ordem alfabética dos nomes dos autores e numerar consecutivamente. Se houver mais de um trabalho do(s) mesmo(s) autor(es) num ano, indicar no final (a), (b), (c)...

2) Entrada de um autor – ex.: SILVA, A.L. DA.

3) Entrada de dois autores – ex.: SILVA, J.L. & RUIZ, A. DA S.

4) Entrada de três ou mais autores – citar todos. Ex.: LIMA, E.S.; MARQUES, J.S.; CAMPOS, A.

5) Exemplos de citação de publicações:

Livros, monografias, relatórios:

COSTA, M.C. da & ANGÉLICA, R.S. (Coordenadores). Contribuições à Geologia da Amazônia. Belém: Financiadora de Estudos e Projetos e Sociedade Brasileira de Geologia/Núcleo Norte, 446 p., 1997.

CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Jacupiranga-Guaçu - geologia, levantamento geoquímico, processamento aerogeofísico e metalogenia das folhas SG22-X-8-VI-2 (Jacupiranga) e SG22-X-B-VI- 4 (Rio Guaçu), Estado de São Paulo, Escala 1 :50.000. São Paulo: Convênio Secretaria de Estado de Energia / Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil, 245 p., 1999.

Capítulos de livros:

ROOSEVELT, A.C. The influence of geology on soils, biota and the human occupation of Amazonia. In: COSTA, M.C. da & ANGÉLICA, R.S. (Coordenadores), Contribuições à Geologia da Amazônia. Belém: Financiadora de Estudos e Projetos e Sociedade Brasileira de Geologia/Núcleo Norte, p. 1-14, 1997.

Dissertações e Teses:

SANTOS, M. DOS. Serra da Mantiqueira e Planalto do Alto Rio Grande: a bacia terciária de Aiuruoca e evolução morfotectônica. Rio Claro, 1999. 134 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

Artigos de periódicos:

FERREIRA, M.C. Análise espacial da densidade de drenagem em Sistema de Informação Geográfica através de um modelo digital de distâncias interfluviais. Geociências, v. 18, n. 1, p. 7-22, 1999.

Resumos (estendidos ou não) publicados em eventos técnico-científicos:

ROY, P. *Estuaries and coastal valley-fills in Southeast Australia*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 6, 1997, Curitiba. Resumos Expandidos... São Paulo: Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, 1997, p. 12-13.

c) Outros

1) Programas de computação (softwares) citados no texto devem ser referenciados como trabalhos, com dados de autoria, versão, local, data.

2) Documentos consultados na Internet: citar a URL e data de acesso. Ex.: C.M.L. da Cunha & I.A. Mendes. Proposta de análise integrada dos elementos físicos da paisagem: uma abordagem geomorfológica. Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/igce/grad/geografia/revista/Sumario0301.htm>. Acessado em: 25jan2006.

3) Trabalhos aceitos para publicação ou no prelo: citar, com indicação da situação.

4) Comunicações pessoais e trabalhos em preparação ou submetidos para publicação não devem ser citados na listagem bibliográfica, mas apenas no texto.

5) Não devem ser citados documentos (relatórios e outros) confidenciais ou inacessíveis aos leitores.

## ANÁLISE DOS TRABALHOS E PROCEDIMENTOS DA EDITORIA

1) O autor ou primeiro autor será comunicado da recepção do trabalho, dos resultados das avaliações pelos Consultores e aceitação para publicação.

2) Os trabalhos receberão avaliação crítica do mérito por dois membros do Conselho Editorial e/ou Corpo Consultivo tendo em vista a publicação na revista. O prazo para avaliação é de 30 dias.

3) Trabalhos não recomendados serão devolvidos. Aqueles cuja aceitação dependa de modificações ou ajustes serão devolvidos ao(s) autor (es) para adequação.

4) Revisões de aspectos formais dos trabalhos, antes da impressão final, serão efetuadas pelo Conselho Editorial.

5) Os autores receberão uma cópia do volume em que o trabalho for publicado e 20 separatas, que serão remetidas ao primeiro autor.

6) Os dados, informações e conceitos emitidos nos trabalhos são de inteira responsabilidade dos autores. O autor ou primeiro autor do trabalho responde pela autorização de sua publicação e cessão de direitos autorais à revista.

## INTERNET

A revista está disponível na Internet, podendo ser acessada no portal <http://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/>

## ANEXO 2: Comprovante de submissão do artigo científico

### [Geociencias] Agradecimento pela Submissão

---

De: Prof. Dr. Norberto Morales (revigeoc@rc.unesp.br)

Para: karolmecenass@yahoo.com.br

Data: domingo, 24 de março de 2019 12:16 BRT

---

Senhorita Karoline Ferreira da Silva Mecenass,

Agradecemos a submissão do seu manuscrito "AS ROCHAS VULCÂNICAS DA ILHA SÃO JORGE, AÇORES (PORTUGAL): PETROGRAFIA E GEOQUÍMICA" para Geosciences = Geociências. Através da interface de administração do sistema, utilizado para a submissão, será possível acompanhar o progresso do documento dentro do processo editorial, bastando logar no sistema localizado em:

URL do Manuscrito:

<http://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/author/submission/14004>

Login: mecenass

Em caso de dúvidas, envie suas questões para este email. Agradecemos mais uma vez considerar nossa revista como meio de transmitir ao público seu trabalho.

Prof. Dr. Norberto Morales  
Geosciences = Geociências

---

Geosciences = Geociências

<http://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias>

### **ANEXO 3: Justificativa de coautorias do artigo científico**

**Adriane Machado:** A coautora teve papel de extrema importância na realização da pesquisa, com a realização dos trabalhos de campo, obtenção de dados químicos e envolvimento nas discussões relativas à interpretação dos dados.

**Alan Dantas Cardoso:** O coautor auxiliou na interpretação dos dados petrográficos e químicos, na edição das figuras e tabelas, bem como, envolveu-se nas discussões do trabalho.

**Luiz Henrique Passos:** O coautor participou da interpretação dos dados petrográficos e químicos, na edição dos diagramas químicos e nas discussões ao longo do desenvolvimento do trabalho.

**Cristine Lenz:** A coautora contribuiu de forma considerável para a elaboração do artigo científico, principalmente na interpretação e discussão dos dados químicos e conclusões da pesquisa.

**APÊNDICE 1:** Identificação das amostras, localização, litologia e unidades vulcanoestratigráficas.

<b>Amostra</b>	<b>Coordenadas UTM</b>	<b>Litologia</b>	<b>Unidade</b>
<b>SJ-01/08</b>	398845 / 4284259	basanita	Complexo Vulc. Rosais
<b>SJ-02/08</b>	408777 / 4280854	hawaíto	Comp. Vulc. Manadas
<b>SJ-03/08</b>	408627 / 4281644	basalto alcalino	Comp. Vulc. Manadas
<b>SJ-04/08</b>	428515 / 4267200	hawaíto	Comp. Vulc. Topo
<b>SJ-05/08</b>	433729 / 4267329	hawaíto	Comp. Vulc. Topo
<b>SJ-08/08</b>	425486 / 4267151	hawaíto	Comp. Vulc. Topo
<b>SJ-10/08</b>	422818 / 4269082	hawaíto	Comp. Vulc. Topo
<b>SJ-11/08</b>	404003 / 4281960	hawaíto	Comp. Vulc. Manadas
<b>SJ-12/08</b>	403477 / 4281111	basalto alcalino	Comp. Vulc. Manadas
<b>SJ-14/08</b>	403368 / 4278740	hawaíto	Comp. Vulc. Manadas
<b>SJ-15/08</b>	412400 / 4277227	hawaíto	Comp. Vulc. Manadas
<b>SJ-16/08</b>	400195 / 4278745	hawaíto	Comp. Vulc. Manadas
<b>SJ-17/08</b>	396732 / 4280401	basanita	Comp. Vulc. Manadas
<b>SJ-19/08</b>	411417 / 4278754	basalto alcalino	Comp. Vulc. Manadas
<b>SJ-21/08</b>	393105 / 4284838	basalto alcalino	Complexo Vulc. Rosais



**APÊNDICE 2:** Dados da contagem modal baseada na porcentagem (%) de fenocristal e matriz das rochas vulcânicas estudadas da Ilha São Jorge (Abreviaturas: Siivola & Schmid, 2007).

<b>Amostra</b>	<b>Litologia</b>	<b>Ol</b>	<b>Aug</b>	<b>Pl</b>	<b>Op</b>	<b>Krs</b>	<b>Matriz</b>
<b>SJ-01/08</b>	basanito	12,2	23,2	5,4	0	0	59,2
<b>SJ-17/08</b>	basanito	4,9	4,6	8,3	0,3	0	81,9
<b>SJ-03/08</b>	basalto alcalino	1,8	0,2	7,7	1,8	0,3	88,2
<b>SJ-12/08</b>	basalto alcalino	0,6	1,1	17,5	0,4	1,2	79,2
<b>SJ-19/08</b>	basalto alcalino	1,2	0	13	0,8	0	85
<b>SJ-21/08</b>	basalto alcalino	3,3	3,5	6,3	0	0	86,9
<b>SJ-02/08</b>	hawaíto	1,4	0,7	1,9	0,2	0	95,8
<b>SJ-04/08</b>	hawaíto	0	0	0,3	0	0	99,7
<b>SJ-05/08</b>	hawaíto	1,9	0,3	0	0	0,1	97,7
<b>SJ-08/08</b>	hawaíto	0	0	1	0	0	99
<b>SJ-10/08</b>	hawaíto	4,7	0,9	0,1	0	0	94,3
<b>SJ-11/08</b>	hawaíto	0,7	1,3	10,8	1,6	1,1	84,5
<b>SJ-14/08</b>	hawaíto	0,2	0	0,8	0	0	99
<b>SJ-15/08</b>	hawaíto	5,6	3,2	22,2	0	0	69
<b>SJ-16/08</b>	hawaíto	1	2,3	13,2	1,1	0	82,4